



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

---

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y  
MATERIALES

**“SINTESIS DE HIDRÓXIDO DE ALUMINIO  $Al(OH)_3$  ALÚMINA ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) A PARTIR DE CHATARRA DE ALUMINIO (Al) Y SU EVALUACIÓN COMO REFLECTOR DIFUSO DE REFUERZO EN SISTEMAS SOLARES”**

**TESIS**

---

**PRESENTA:** Grecia Valeria Rodríguez Martínez

Para obtener el grado en: Lic. en Ingeniería de Materiales.

**DIRECTORES DE TESIS:**

M.C Demetrio Fuentes Hernández

M.C Miguel Ángel Ortega González

Dr. Felipe Legorreta García

Dr. Juana Guadalupe Herrera Pérez





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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 16 de enero de 2026

Número de control: ICBI-D/066/2026  
Asunto: Autorización de impresión.

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

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería de Materiales **Grecia Valeria Rodríguez Martínez**, quien presenta el trabajo de titulación "**Síntesis de Hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$  alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) a partir de chatarra de Aluminio (Al) y su Evaluación como Reflector Difuso de Refuerzo en Sistemas Solares.**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Felipe Legorreta García

**Secretario:** M. en C. Miguel Ángel Ortega González

**Vocal:** M. en C. Demetrio Fuentes Hernández

**Suplente:** Dra. Juana Guadalupe Herrera Pérez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez,  
Director del ICBI



GVR/MMM

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  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

RESUMEN .....	6
INTRODUCCIÓN.....	6
1. MARCO TEÓRICO.....	7
1.1. Métodos de obtención de la alúmina.....	7
1.1.1. Proceso Bayer .....	7
1.1.2. Sol-gel .....	8
1.1.3. Extracción ácida .....	8
1.1.4. Lixiviación .....	9
1.2 Energía Solar.....	9
1.2.1 Sistemas Solares .....	10
1.2.2 Clasificación de sistemas solares .....	12
1.2.3 Sistema fotovoltaico: .....	12
1.2.4 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red: .....	13
1.2.5 Sistemas fotovoltaicos aislados: .....	13
1.2.6 Sistema de captación térmica:.....	13
1.2.6.1 Colectores solares planos: .....	14
1.2.6.2 Colectores de tubos de vacío:.....	14
1.2.7 Sistema térmico-fotovoltaico: .....	14
2. Reflectores difusos de refuerzo.....	15
2.1 Reflectores difusos para paneles solares térmicos:.....	15
2.1.2 Reflectores difusos para colectores solares térmicos de concentración: .....	15
2.1.3 Reflectores difusos en sistemas solares fotovoltaicos de seguimiento: .....	15
2.1.4 Reflectores difusos en instalaciones fotovoltaicas de gran escala:.....	16
2.1.5 Reflectores difusos en sistemas solares térmicos y fotovoltaicos integrados en edificios: 16	
3. Síntesis de recubrimientos .....	16
3.1. Sustratos como reflectores difusos de refuerzo .....	17
4. Propiedades ópticas y mecánicas de la alúmina como precursor para recubrimiento.....	17
5. Generalidades del aluminio.....	20
5.1. Mineral bauxita y su producción .....	21
5.2. Estructura, propiedades y anfoterismo del aluminio .....	22
5.3. Especies sólidas y líquidas más comunes del aluminio.....	24

5.4.	Aplicaciones del aluminio .....	25
5.5.	Generalidades de la alúmina .....	27
5.6.	Polimorfismo de la $Al_2O_3$ .....	28
5.7.	Propiedades y aplicaciones de alúmina alfa y gamma .....	28
6.	Propiedades de la luz .....	29
6.1.	Teoría de Kubelka-Munk .....	31
7.	Reflectancia .....	32
7.1.	Reflectancia difusa .....	32
7.2.	Reflectancia especular .....	33
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	33
4.	JUSTIFICACIÓN .....	34
5.	HIPOTESIS .....	35
6.	OBJETIVOS .....	35
6.1	Objetivo general .....	35
6.2	Objetivos específicos .....	36
7.	METODOLOGÍA .....	36
7.1	Técnicas de caracterización .....	36
7.1.1	Microscopía electrónica de barrido (MEB). .....	36
7.1.2	Espectroscopia infrarroja (IR): .....	36
7.1.3	Difracción de rayos X (XRD). .....	36
7.1.4	Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) .....	37
7.1.5	Espectroscopia UV-VIS .....	37
7.2	Pruebas mecánicas .....	37
7.2.1	Prueba de adherencia mediante cinta, norma ASTM D3359 .....	37
7.3	Prueba de dureza mediante lápiz, norma ASTM D3363 .....	38
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
8.2.	Análisis cristalográfico y químico elemental del Al pulverizado. ....	42
8.3	Análisis cristalográfico de $Al(OH)_3/SiO_2$ , alúmina $\gamma-Al_2O_3$ y alúmina $\alpha-Al_2O_3$ .....	43
8.4	Estudio de microscopía electrónica de barrido de los compuestos obtenidos .....	45
8.5	Análisis de la espectroscopia de reflectancia difusa relativa (pd) .....	46
8.5.1	Análisis de reflectancia relativa (pd) de $(\gamma-AlO(OH)/SiO_2)$ , $\gamma-Al_2O_3$ , $\alpha-Al_2O_3$ en polvo 46	
8.5.2	Análisis del recubrimiento utilizando $\gamma-AlO(OH)/SiO_2$ , $\gamma-Al_2O_3$ , $\alpha-Al_2O_3$ .....	47

8.5.3	<i>Análisis del recubrimiento mediante la medición de la reflectancia relativa utilizando <math>\text{Al}(\text{OH})_3/\text{SiO}_2</math>, <math>\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3</math>, <math>\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3</math></i> .....	47
8.6	<i>Análisis de dureza</i> .....	47
8.7	<i>Análisis de adherencia</i> .....	48
9.	Conclusiones .....	48
	Bibliografía .....	50

## INDICE DE FIGURA

<b>Figura 1.</b>	Comparación entre sistemas PV, PVT y térmicos solares (Hasan and Sumathy, 2010). ...	12
<b>Figura 2.</b>	Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico conectado a la red CFE (Ventajas de los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red, 2018) .....	13
<b>Figura 3.</b>	Espectro electromagnético (Khan Academy, s.f.) .....	31
<b>Figura 4.</b>	Escala de medición de adherencia (Cai, 2020).....	38
<b>Figura 5.</b>	Escala de medición de dureza (Lee, 2020).....	39
<b>Figura 6.</b>	Proceso de obtención de alúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y alúmina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) .....	40
<b>Figura 7.</b>	Imágenes de la metodología para la obtención de dos tipos de alúmina.....	42
<b>Figura 8.</b>	Identificación de las fases del ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ ) .....	43
<b>Figura 9.</b>	Identificación de las fases de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ calcinado a $900^\circ$ .....	44
<b>Figura 10.</b>	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ calcinado a $1400^\circ$ . Los índices de Miller color naranja corresponden al óxido de aluminio y silicio $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ .....	44
<b>Figura 11.</b>	a) Micrografía de $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ .....	45
<b>Figura 12.</b>	b) Micrografía de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	45
<b>Figura 13.</b>	c) Micrografía de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ .....	46

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Propiedades mecánicas de la alúmina (Fecha, s.f.).....	18
<b>Tabla 2.</b>	Propiedades ópticas de la alúmina y su descripción (Doremus, 2008). .....	20
<b>Tabla 3.</b>	Propiedades físicas del aluminio Al. ....	22
<b>Tabla 4.</b>	Propiedades químicas del aluminio Al.....	23
<b>Tabla 5.</b>	Aplicaciones y su descripción del Al. ....	25
<b>Tabla 6.</b>	Reflectancia difusa relativa de ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ ), $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . .....	46
<b>Tabla 7.</b>	Reflectancia difusa relativa de los recubrimientos. ....	47
<b>Tabla 8.</b>	Dureza del recubrimiento de $\text{Al}(\text{OH})_3$ , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	48
<b>Tabla 9.</b>	Adherencia del recubrimiento utilizando $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	48

## RESUMEN

La presente tesis trata la síntesis de hidróxido de aluminio y alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) a partir de chatarra de aluminio como materia prima y su uso como reflector difuso de refuerzo en sistemas solares. El material fue procesado a través del proceso Bayer, obteniendo un producto con propiedades ópticas y mecánicas adecuadas para su uso en energía solar. Las pruebas de caracterización, que siguen las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), incluyen microscopía electrónica, espectroscopia, pruebas de adherencia y dureza. Los resultados indicaron que la alúmina reciclada alcanza las propiedades ópticas y físicas requeridas para su uso como recubrimiento de los sistemas de concentración solar, lo que permite un modelo de economía circular. Este último tiene un impacto ambiental positivo y expande el rango de tecnologías candidatas basadas en el reciclaje.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo contemporáneo, el desarrollo de tecnologías sostenibles se ha vuelto fundamental para enfrentar las crecientes preocupaciones ambientales y energéticas. Entre los materiales que han cobrado relevancia en este contexto, el aluminio destaca por ser uno de los metales más abundantes y versátiles, ampliamente utilizado en sectores como la construcción, el transporte y la energía, debido a sus propiedades notables como su baja densidad, resistencia a la corrosión y facilidad de reciclaje. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la obtención primaria de aluminio a partir de la bauxita implica un impacto ambiental considerable. Este procedimiento conlleva un gran uso de energía y la producción de desechos peligrosos, como el lodo rojo, que constituyen un reto para el medio ambiente debido a su gestión y disposición. Además, la fabricación de aluminio primario aporta significativamente a la liberación de gases de efecto invernadero, agravando así el problema del cambio climático. No obstante, se ha demostrado que, con una correcta administración de la residual de aluminio, se puede disminuir significativamente estos efectos adversos. La reutilización de este metal facilita el progreso hacia modelos de economía circular y de cero desechos, reduciendo el uso de energía y minimizando el impacto ecológico de este procedimiento. Derivada del aluminio, la alúmina representa un material de gran interés por sus propiedades ópticas, mecánicas y térmicas, lo que la hace ideal para aplicaciones como recubrimientos reflectantes en sistemas solares. En particular, los reflectores difusivos de refuerzo se han identificado como una solución eficaz para mejorar la captación de energía solar en sistemas de concentración, contribuyendo al incremento de su rendimiento y sostenibilidad (Gonzalez, y otros, 2024) (Paul, 2019). Por lo tanto, en este trabajo de investigación se propone la síntesis de hidróxido de aluminio y alúmina a partir de chatarra de aluminio, como una alternativa sostenible y económica para la elaboración de recubrimientos reflectantes en aplicaciones solares. A través del proceso Bayer y el empleo de diversas técnicas de caracterización óptica y mecánica, se evaluará la viabilidad de los materiales obtenidos. Esta propuesta no solo pretende aportar al avance científico y tecnológico, sino también ofrecer una solución viable a la problemática de la acumulación de residuos de aluminio, promoviendo un enfoque sostenible en el desarrollo de sistemas energéticos alternativos.

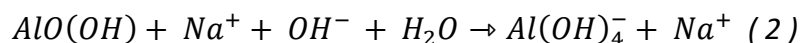
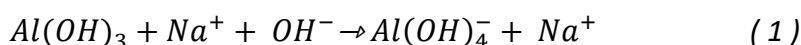
## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Métodos de obtención de la alúmina

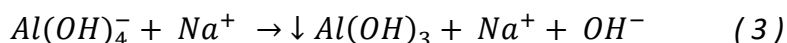
Debido a la importancia que tiene la alúmina en la industria de catálisis se han realizado numerosas investigaciones para desarrollar y controlar de mejor manera sus propiedades físicas, químicas y de superficie (Trueba & Trasatti,  $\Gamma$ -alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects, 2005). Todos los métodos de obtención de alúmina se basan en la deshidratación térmica de los hidróxidos de aluminio ( $\text{NaOH}$ ), por lo que las investigaciones están enfocadas en obtener un buen hidróxido de aluminio y a controlar su deshidratación (Hsu, 2018). La alúmina es un óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que se encuentra en la naturaleza en forma de minerales como la bauxita y la criolita (Muñoz Portero, 2016). Algunos de los métodos de obtención de alúmina se describen a continuación.

#### 1.1.1. Proceso Bayer

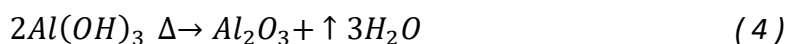
Es el ideal para obtener alúmina, la obtención industrial de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se realiza mediante el histórico proceso que extrae los compuestos de aluminio del mineral bauxita ( gibbsita + bohemita + diásporo) disolviéndolos con ( $\text{NaOH}$ ) en condiciones severas (T:  $200 - 240^\circ \text{C}$  y altas presiones) para formar aluminatos  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  (Villavicencio Cevallos, 2016), la ecuación (1), muestra la reacción de disolución de gibbsita y la ecuación (2) muestra la reacción de disolución de la bohemita y el diásporo presentes en la mineral bauxita (Davis K. , 2010).



Los aluminatos formados son precipitados como cristales de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  mediante despresurización y enfriamiento de la solución (Villavicencio Cevallos, 2016), de acuerdo con la ecuación (3).



El hidróxido de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$  es calcinado para obtener óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) según indica la ecuación (4) (Villavicencio Cevallos, 2016).

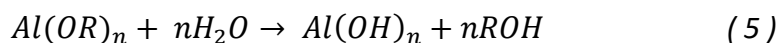


Más del 90% de la alúmina producida a través del proceso Bayer se destina a aplicaciones industriales, principalmente a la producción de aluminio metálico mediante reducción

electrolítica, mientras que solo un pequeño porcentaje se utiliza para otras aplicaciones (Villavicencio Cevallos, 2016)

### 1.1.2. Sol-gel

Este método implica la hidrólisis de un precursor de aluminio en una solución para producir un gel de alúmina (García Mayorga, 2018). El gel se seca y se calcina para obtener alúmina de alta pureza. La ruta sol-gel es una de las técnicas más utilizadas para la obtención de alúminas debido a su sencillez y versatilidad, emplea sales de aluminio o compuestos orgánicos de aluminio (metilatos, etilatos, alcoholatos, isopropóxidos, bióxidos de aluminio, etc.) que al ser hidrolizadas generan geles coloides altamente puros, el mecanismo general de reacción se describe en la ecuación (5) (Chandradass & Balasubramanian, 2006).



La característica del hidróxido de aluminio obtenido depende del precursor empleado, de la concentración, de la temperatura de hidrolisis, la velocidad y del tiempo de mezcla y del tiempo de envejecimiento (Kocjan, Dakskobler, & Kosmač, 2012). En la ruta sol-gel se puede diferenciar dos vías de obtención de hidróxido de aluminio (Luisa, 2012):

- La ruta xerogel cuando se evapora el disolvente mediante calentamiento
- La ruta aerogel cuando se extrae el solvente mediante filtración, sin involucrar calentamiento que cambia las propiedades finales del hidróxido de aluminio.

El método sol-gel para la extracción de alúmina ofrece varias ventajas, como la posibilidad de obtener materiales con alta pureza, homogeneidad y control de tamaño de partícula (Luisa, 2012). Además, es una técnica versátil que permite la incorporación de dopantes y la formación de estructuras complejas. Por estas razones, el método sol-gel es ampliamente utilizado en la síntesis de materiales cerámicos, incluida la extracción de alúmina (Ciriminna, y otros, 2013).

### 1.1.3. Extracción ácida

La extracción ácida para obtener alúmina implica el uso de ácidos fuertes para disolver la alúmina presente en la materia prima, generalmente la bauxita (Tilley G. S., 1927). El proceso de extracción ácida generalmente se lleva a cabo utilizando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o ácido clorhídrico (HCl) como agentes de disolución. A continuación, se presenta una descripción general de los pasos involucrados en un proceso típico de extracción ácida para obtener alúmina (Chen, Zhang, Lv, Chao, & Yang, 2022):

*Trituración y molienda:* La bauxita se tritura y se muele en partículas finas para aumentar su superficie y facilitar la reacción con el ácido (Tilley G. S., 1927).

*Digestión ácida:* La bauxita molida se mezcla con el ácido fuerte (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o HCl) y se somete a una reacción química en un reactor o autoclave. El ácido reacciona con la alúmina presente en la bauxita, formando aluminato soluble en ácido (Tilley G. S., 1927).

*Filtración y separación:* La suspensión resultante se filtra para separar el licor ácido, que contiene el aluminato disuelto, de los sólidos no disueltos, que son impurezas y otros componentes de la bauxita (Tilley G. S., 1927).

*Precipitación y recuperación de alúmina:* El licor ácido que contiene el aluminato se trata químicamente para precipitar el hidróxido de aluminio (alúmina hidratada). Luego, el hidróxido de aluminio se separa y se somete a un proceso de calcinación para obtener alúmina pura (Tilley G. S., 1927).

#### **1.1.4. Lixiviación**

La lixiviación es un proceso utilizado para extraer sustancias solubles de un sólido, en este caso, para obtener alúmina a partir de minerales de aluminio como la bauxita. El proceso de obtención de alúmina mediante lixiviación se lleva a cabo de la siguiente manera (Barry, Uysal, Birinci, & Erdemoğlu, 2019):

- 1. Extracción del mineral:* Es el mineral primario que contiene óxidos de aluminio. Se extrae de minas a cielo abierto.
- 2. Trituración y molienda:* Se tritura y muele para reducir su tamaño y facilitar la extracción de la alúmina.
- 3. Digestión:* El material triturado se combina con una solución alcalina, como hidróxido de sodio, dentro de reactores operados a condiciones de alta presión y calor. Este procedimiento permite disolver el óxido de aluminio presente en la bauxita, dejando otros elementos como hierro y sílice intactos.
- 4. Separación de fases:* La mezcla obtenida, llamada licor de aluminato sódico, se divide para separar los residuos sólidos no disueltos mediante técnicas como filtración o decantación.
- 5. Precipitación del hidróxido:* El equilibrio químico del licor se ajusta para provocar la formación de hidróxido de aluminio a partir de la alúmina en solución.
- 6. Purificación y secado:* El hidróxido resultante se somete a procesos de lavado y deshidratación con el objetivo de eliminar contaminantes y garantizar un producto más refinado.
- 7. Calcinación:* El material lavado se expone a temperaturas elevadas en hornos especializados, transformándose en alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bajo la forma de un polvo blanco.
- 8. Aplicación de la alúmina:* Este producto final tiene aplicaciones diversas en sectores como la producción de aluminio metálico, la fabricación de productos cerámicos, la industria química, entre otros.

#### **1.2 Energía Solar**

La energía solar es una forma de energía renovable que se obtiene al convertir la radiación electromagnética del Sol en energía térmica o eléctrica. Esta radiación incluye luz visible, infrarroja y ultravioleta (PEREZ, 2024). Uno de los principales dispositivos para captar esta energía son los paneles solares, conocidos en México como celdas fotovoltaicas. Estos están

formados por celdas solares, las cuales contienen materiales semiconductores, como el silicio (Soto, 2005) (Castellano, 2010). Las celdas solares absorben la luz solar y generan corriente eléctrica al liberar electrones, esta electricidad puede utilizarse directamente en sistemas aislados o integrarse a la red eléctrica para abastecer hogares y empresas (De Kuyper, 2018). Un concepto fundamental en el estudio de la energía solar es la constante solar, definida como la cantidad de energía que alcanza una superficie perpendicular al Sol, ubicada en el límite de la atmósfera terrestre, a una distancia media entre la Tierra y el Sol. Su valor estimado es de aproximadamente 1.353 kilowatts por metro cuadrado ( $\text{kW/m}^2$ ) (Lojano Chacha, 2013).

La energía solar tiene numerosas aplicaciones prácticas. En primer lugar, se utiliza en la generación de electricidad a gran escala. Los parques o plantas solares consisten en una gran cantidad de paneles solares conectados en serie o en serie-paralelo para producir electricidad a partir de la radiación solar (Iqbal, 2012) (ROLDÁN VILORIA, 2008). Estas plantas solares pueden alimentar comunidades enteras o suministrar energía a la red eléctrica. Además, también se utiliza en sistemas más pequeños, como paneles solares instalados en techos de viviendas o edificios comerciales. Estos sistemas de energía solar residenciales o comerciales permiten a los propietarios generar su propia electricidad y reducir su dependencia de la red eléctrica convencional (Sánchez Pacheco, 2010). Otra aplicación común de la energía es la iluminación pública. Las lámparas solares utilizan paneles solares y baterías para almacenar la energía durante el día y proporcionar iluminación durante la noche, sin necesidad de una conexión a la red eléctrica (Boxwell, 2010) (Abella, 2005). La energía solar también se utiliza para la calefacción de agua, mediante sistemas de calentamiento solar, que aprovechan la radiación utilizada en hogares, piscinas o procesos industriales (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2011).

Uno de los aspectos más destacados de la energía solar es su carácter limpio y renovable. Al utilizar la energía solar, no se emiten gases de efecto invernadero ni otros contaminantes que contribuyan al cambio climático o la contaminación del aire (Sen, 2008). Además, la energía solar es una fuente inagotable, ya que el Sol continuará irradiando energía durante miles de millones de años (Sivaram, 2018). En resumen, la energía solar es una fuente valiosa y prometedora de energía limpia y renovable, su captura y utilización a través de paneles solares nos permite aprovechar la radiación solar para generar electricidad, calentar agua, iluminar espacios y alimentar una variedad de dispositivos y sistemas (Abdin, y otros, 2013). Con el continuo desarrollo de la tecnología solar, se espera que la energía solar desempeñe un papel cada vez más importante en la transición hacia una matriz energética más sostenible y libre de emisiones (Dawn, Tiwari, Goswami, & Mishra, 2016).

### **1.2.1 Sistemas Solares**

La energía proveniente del sol presenta dos características específicas muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales: dispersión e intermitencia (Gowrisankaran, Reynolds, & Samano, 2016). La dispersión se refiere a que la densidad de energía solar, en condiciones favorables, rara vez supera los  $1 \text{ kW/m}^2$ , lo cual es

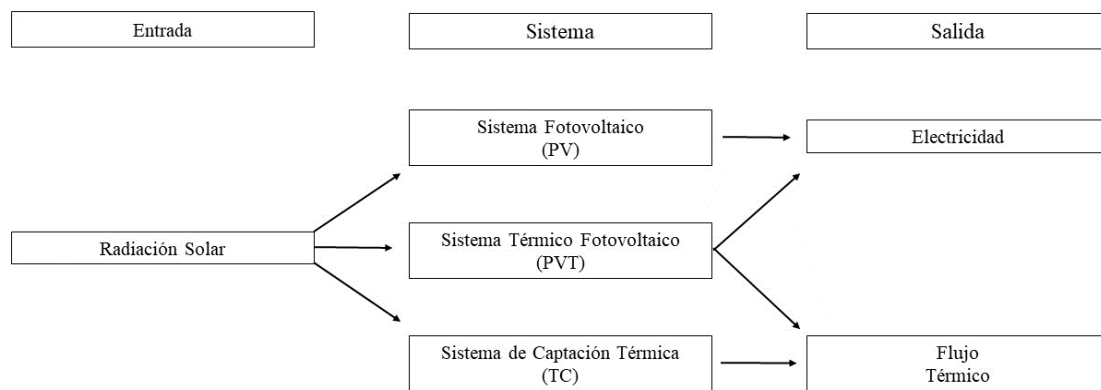
considerablemente bajo en comparación con las densidades energéticas con las que se trabaja en ingeniería (Twidell, 2021). Esto implica que para obtener altas densidades energéticas se requieren grandes superficies de captación o sistemas de concentración de rayos solares. Por otro lado, la intermitencia es otra cualidad distintiva (Villalobos, 1995), esto significa que la disponibilidad de energía solar varía a lo largo del día y está sujeta a factores climáticos, como la presencia de nubes o la temporada del año (Sen, 2008). Debido a esta intermitencia, resolver estas limitaciones requiere un desarrollo tecnológico significativo adaptado a cada necesidad específica. Entre las opciones disponibles, los sistemas fotovoltaicos convierten la radiación luminosa en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Los paneles de este tipo contienen celdas fabricadas con materiales semiconductores como el silicio, generando corriente eléctrica al recibir luz solar (Velasco, 2009). Se emplean ampliamente en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales (Noguera-Salas, 2018) , a continuación se presentan los sistemas solares más utilizados .

- *Sistemas solares térmicos de baja temperatura:* Estos sistemas captan la radiación solar y utilizan el calor contenido en ella para calentar agua o fluidos de transferencia de calor (Gautam & Saini, 2020). Se utilizan para calentar agua en viviendas, piscinas o procesos industriales que requieren temperaturas moderadas (Evangelisti, De Lieto Vollaro, & Asdrubali, 2019).
- *Sistemas solares de concentración de alta temperatura:* Estos sistemas utilizan espejos o lentes para concentrar la radiación solar en un punto focal, generando altas temperaturas (Meinel, Aplicaciones de la energía solar., 1982). El calor concentrado se utiliza para producir vapor y alimentar turbinas de generación de electricidad. Los sistemas de concentración de alta temperatura son especialmente eficientes en regiones con alta radiación solar y se utilizan en plantas solares termoeléctricas de gran escala (Tecnologías Solares Termoeléctricas, s.f.). Así pues, el primer paso para el aprovechamiento de la energía solar es su captación, aspecto dentro del que se pueden distinguir dos sistemas de características muy diferentes: sistemas pasivos y sistemas activos (Kalogirou S. A., 2023).
  - *Sistemas pasivos:* Son aquéllos que no necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar, existiendo una íntima relación entre el Sol, el almacenamiento del calor y el espacio, relación que se logra por la aplicación de distintos elementos arquitectónicos (Mazria, 1979) (Bustamante Ruiz, 2020).
  - *Sistemas activos:* Se basan en la captación de la radiación solar por medio de un elemento de unas determinadas características, denominado colector (Reyes, 2012). Según las características del colector, el aprovechamiento de la energía solar se puede realizar bajo dos puntos de vista bien diferenciados: la conversión térmica, o aprovechamiento del calor contenido en la radiación solar, y la conversión eléctrica, o aprovechamiento de la energía luminosa (fotones) de la radiación solar para generar directamente corriente eléctrica (efecto fotovoltaico) (Pascual, 2012) (Sadhishkumar & Balusamy, 2014). A su vez, la conversión térmica se basa en tres técnicas que difieren entre sí en función de la temperatura que puede alcanzar la superficie captadora

(Bruned, 2010). Así, se habla de tecnología de baja temperatura, de temperaturas medias y de altas temperaturas, según que la captación sea directa, de bajo índice de concentración o de alto índice de concentración, respectivamente (Bustamante Paredes, 2013). Figura 1.

### 1.2.2 Clasificación de sistemas solares

Los sistemas de energía solar fotovoltaica (PV) generan electricidad directamente, los sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PVT) aprovechan tanto la electricidad como el calor solar, y los sistemas solares térmicos se enfocan principalmente en la generación de calor (Kumar Verma, Kumar, Barthwal, & Rakshit, 2022). La elección del sistema depende de las necesidades energéticas específicas y las aplicaciones deseadas, considerando factores como la disponibilidad de luz solar, el espacio disponible y el presupuesto

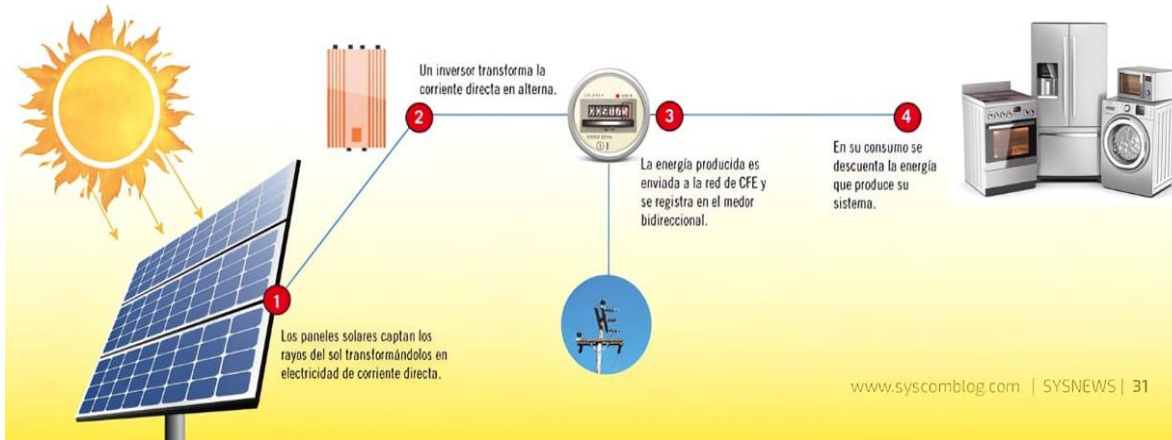


(Gutiérrez García, 2018) (Yin, Kim, Trifonov, Podhajny, & Wang, 2022).

*Figura 1. Comparación entre sistemas PV, PVT y térmicos solares (Hasan and Sumathy, 2010).*

### 1.2.3 Sistema fotovoltaico:

Un sistema fotovoltaico conectado a la red consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional (Eltawil & Zhao, 2010). El concepto de inyección a red tiene un amplio margen de aplicaciones, desde pequeños sistemas de pocos kilowatts pico (KWp) de potencia instalada hasta centrales de varios megawatts pico (MWp) (Ramakumar & Bigger, 1993). En la Figura 2, se muestra un diagrama de los componentes principales de un sistema de conexión a red.



**Figura 2.** Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico conectado a la red CFE (Ventajas de los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red, 2018)

El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, que, en lugar de ser almacenada en baterías, como en los sistemas aislados e híbridos, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica de distribución (Paniagua García, 2022) (Manwell, 2004).

#### 1.2.4 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red:

Estos sistemas no requieren baterías, ya que la energía generada se usa directamente o se inyecta a la red eléctrica pública. Son ideales para áreas con acceso a electricidad convencional y pueden funcionar como un respaldo económico al reducir el consumo de energía de la red. Además, permiten vender el excedente de energía a la compañía eléctrica, dependiendo de las políticas locales (Kouro, Leon, Vinnikov, & Franquelo, 2015) (Mohammed, Mohammed, & Ibrahim, 2017).

#### 1.2.5 Sistemas fotovoltaicos aislados:

En contraste, los sistemas aislados operan de forma independiente de la red eléctrica. Requieren baterías para almacenar energía, asegurando suministro durante las noches o días nublados (Spataru, 2016). Son la solución preferida en áreas remotas donde no existe acceso a la red pública, aunque su costo inicial es mayor debido a los componentes de almacenamiento. Estas diferencias reflejan cómo cada tipo de sistema está diseñado para responder a necesidades energéticas específicas y condiciones de infraestructura.

#### 1.2.6 Sistema de captación térmica:

Es aquel que utiliza dispositivos específicos para absorber y recolectar la radiación solar con el fin de generar calor y transferirlo a un fluido de trabajo (Kalogirou S. A., 2004). Estos dispositivos incluyen:

1. *Colectores solares térmicos*: Son los dispositivos principales para captar la radiación solar y convertirla en calor (Kalogirou S. A., 2004).
2. *Paneles solares térmicos*: Utilizados también para recolectar energía térmica, especialmente en aplicaciones como calefacción de agua y climatización de espacios (Kalogirou S. A., 2004).

Estos sistemas aprovechan la energía térmica del sol para aplicaciones como calefacción de agua, climatización de espacios o procesos industriales (Jamar, Majid, Azmi, Norhafana, & Razak, 2016). Algunos ejemplos de sistemas de captación térmica son los siguientes:

#### **1.2.6.1 Colectores solares planos:**

Son uno de los sistemas de captación térmica más comunes. Consisten en una caja metálica con una cubierta transparente y una placa absorbente en su interior (Hottel H. C., 1942). La cubierta transparente permite el paso de la radiación solar hacia el interior del colector, donde la placa absorbente, generalmente pintada de color oscuro, absorbe la radiación y la convierte en calor (Salvi, 2018). El calor transferido se utiliza para calentar un fluido, como agua o un fluido térmico, que luego se almacena o se utiliza directamente en aplicaciones de calefacción o agua caliente sanitaria (Sharif, 2015).

#### **1.2.6.2 Colectores de tubos de vacío:**

Son otro tipo de sistema de captación térmica utilizado para generar calor. Estos colectores consisten en una serie de tubos de vidrio cilíndricos que contienen un tubo metálico en su interior (Chopra, 2018). El espacio entre los tubos de vidrio se evacua para crear un vacío que reduce las pérdidas de calor. En el tubo metálico se encuentra una barra absorbente que captura la radiación solar y la convierte en calor (Fortuin, 2022). El calor se transfiere a un fluido que circula a través de la barra absorbente, el cual puede ser utilizado para calefacción de agua o procesos industriales.

Estos dos ejemplos ilustran diferentes tecnologías de captación térmica que aprovechan la radiación solar para generar calor de manera eficiente y sostenible (Hu, 2010). Los sistemas de captación térmica son una opción atractiva para reducir el consumo de combustibles fósiles y disminuir la huella de carbono, contribuyendo así a la transición hacia una energía más limpia y renovable (Muradov, 2008).

#### **1.2.7 Sistema térmico-fotovoltaico:**

Un colector PVT es un sistema híbrido porque combina dos tecnologías solares en un solo sistema: un panel solar fotovoltaico (para generar electricidad) y un colector solar térmico (STC, para generar calor) (Herez, El Hage, Lemenand, Ramadan, & Khaled, 2020). Ambas tecnologías trabajan de manera simultánea, utilizando la misma área para producir electricidad y calor a partir de la misma fuente de energía: la radiación solar (Mellor, y otros, 2018). El sistema híbrido PVT maximiza el aprovechamiento de la energía solar, lo que lo

hace más eficiente al generar una mayor cantidad de energía por unidad de área en comparación con los sistemas fotovoltaicos o térmicos por separado (Chow, 2018). Mientras que los sistemas tradicionales fotovoltaicos y térmicos requieren diferentes superficies para generar calor y electricidad, el sistema PVT optimiza el uso del espacio al combinar ambas funciones en un solo sistema (Pérez Estrella, 2021).

La superficie utilizada por un sistema PVT es mayor que la de los colectores convencionales, pero, a pesar de ello, ofrece una mayor producción de energía (tanto eléctrica como térmica) en esa misma área, lo que lo hace más eficiente que los sistemas tradicionales cuando operan de forma individual (Herez, El Hage, Lemenand, Ramadan, & Khaled, 2020). Este diseño híbrido lo convierte en una opción ideal en lugares donde la disponibilidad de superficie es limitada, ya que maximiza la generación de energía sin necesidad de ampliar el área de instalación (Lian, Zhang, Ma, Yang, & Chaima, 2019).

## **2. Reflectores difusos de refuerzo**

Estos reflectores son dispositivos utilizados para aumentar la intensidad de la iluminación en áreas específicas, al dirigir y dispersar la luz de manera más uniforme (Pode, 2011) (Wang & Qi, 2019). Estos reflectores están diseñados con superficies especiales que ayudan a difundir la luz de manera más amplia, evitando la formación de sombras o puntos de luz concentrados (Bielawny, 2019). En el siguiente apartado se describen algunos ejemplos de aplicaciones de reflectores difusos de refuerzo.

### **2.1 Reflectores difusos para paneles solares térmicos:**

En los sistemas solares térmicos, se pueden utilizar reflectores difusos para aumentar la captación de radiación solar en los paneles (Kalogirou S. A., 2004). Estos reflectores se colocan estratégicamente alrededor de los paneles solares térmicos para dirigir la luz solar hacia ellos desde diferentes ángulos, lo que aumenta la eficiencia de captación de calor (Ahmad, Khordehghah, Malinauskaite, & Jouhara, 2020).

#### **2.1.2 Reflectores difusos para colectores solares térmicos de concentración:**

Los colectores solares térmicos de concentración utilizan espejos para concentrar la radiación solar en un punto focal (Kalogirou S. A., 2004). Los reflectores difusos se pueden utilizar en combinación con los espejos para dispersar la luz concentrada de manera más uniforme sobre la superficie del colector, aumentando así la eficiencia de captación de calor (Sharaf & Orhan, 2015).

#### **2.1.3 Reflectores difusos en sistemas solares fotovoltaicos de seguimiento:**

Los sistemas solares fotovoltaicos de seguimiento siguen la trayectoria del sol para maximizar la captación de radiación solar (Ajayi, Majekodunmi, & Shittu, 2013). Los reflectores difusos se pueden emplear en estos sistemas para redirigir la luz solar hacia los

paneles fotovoltaicos a lo largo del día, especialmente en momentos en los que la incidencia de luz directa es menor, como al amanecer o al atardecer (Sharp, Lindsey, Dols, & Coker, 2014).

#### **2.1.4 Reflectores difusos en instalaciones fotovoltaicas de gran escala:**

En las grandes plantas solares fotovoltaicas, los reflectores difusos se pueden utilizar para aumentar la cantidad de luz que llega a los paneles solares (Weinstein, y otros, 2015) . Estos reflectores se instalan alrededor de los paneles para reflejar y dispersar la luz solar, asegurando que se aproveche al máximo la radiación disponible y mejorando así la producción de electricidad (Li, y otros, 2020).

#### **2.1.5 Reflectores difusos en sistemas solares térmicos y fotovoltaicos integrados en edificios:**

En los sistemas solares integrados en edificios, como en techos o fachadas, los reflectores difusos se pueden utilizar para mejorar la captación de energía solar (Meinel, Aplicaciones de la energía solar, 1982). Estos reflectores se colocan estratégicamente para redirigir la luz solar hacia los paneles solares integrados, permitiendo una mayor eficiencia en la generación de calor o electricidad (Palacios, Barreneche, Navarro, & Ding, 2020).

### **3. Síntesis de recubrimientos**

La síntesis de recubrimientos es un proceso fundamental en el cual se crea una capa protectora reflectivas en una superficie determinada (Nieto, 1994). Estos recubrimientos pueden estar compuestos por una amplia variedad de materiales, como pinturas, barnices, películas delgadas, revestimientos cerámicos, entre otros (Sørensen, Kiil, Dam-Johansen, & Weinell, 2009). Existen diversas técnicas para llevar a cabo la síntesis de recubrimientos, entre las cuales se encuentra el método sol-gel (Zheludkevich, Miranda Salvado, & Ferreira, 2005). Este método se basa en la formación de una solución coloidal, conocida como sol, que posteriormente se transforma en un gel y finalmente se deposita sobre la superficie a recubrir (Vega & Leonardo, 2017). El proceso sol-gel ofrece varias ventajas, como la posibilidad de obtener recubrimientos de espesor controlado, la capacidad de recubrir superficies complejas y la opción de incorporar aditivos para mejorar las propiedades del recubrimiento (Hench & West, 1990).

Además del método sol-gel, existen otras técnicas ampliamente utilizadas en la síntesis de recubrimientos. La pulverización, por ejemplo, consiste en atomizar el material de recubrimiento y proyectarlo sobre la superficie mediante la aplicación de un gas o aire comprimido (Pierre, 2020). Esta técnica es adecuada para recubrir grandes áreas de manera rápida y uniforme. Otra técnica común es el recubrimiento por inmersión, en la cual la superficie a recubrir se sumerge en una solución del material de recubrimiento (Brinker, 2013). A medida que se retira la superficie de la solución, se forma una capa sobre ella: Esta

técnica es efectiva para obtener recubrimientos uniformes en objetos tridimensionales (Fattakhova-Rohlfing, Zaleska, & Bein, 2014).

La deposición química en fase vapor (CVD) y la deposición física en fase vapor (PVD) son técnicas utilizadas principalmente en la fabricación de películas delgadas (Morosanu, 2016) (Shishkovsky, 2011). En el caso de CVD, se introduce un precursor gaseoso que reacciona en la superficie para formar el recubrimiento deseado (Choy, 2003). Mientras tanto, en PVD se utiliza la evaporación o sputtering para depositar átomos o moléculas del material de recubrimiento sobre la superficie (Ortiz, 2020). Finalmente, la deposición electroquímica (ECD) es una técnica en la que se aplica una corriente eléctrica controlada para depositar el recubrimiento sobre la superficie (Ammam, 2014). Esta técnica es especialmente utilizada en aplicaciones médicas y biomédicas, ya que permite obtener recubrimientos de alta calidad y uniformidad en dispositivos médicos e implantes (Cometa, 2019).

### **3.1. Sustratos como reflectores difusos de refuerzo**

Un sustrato se refiere a un material de base o superficie sobre la cual se aplican o construyen diferentes capas o estructuras (Askeland, 1998). En el contexto de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos, un sustrato puede ser un componente clave en el diseño de reflectores difusos de refuerzo (Alzahrani, Shanks, & Mallick, 2021). Estos reflectores se utilizan para mejorar la captación de radiación solar al dispersar y redirigir la luz incidente hacia los componentes de captación, como paneles o colectores solares (Malato Rodríguez, y otros, 2004). Los sustratos pueden desempeñar este papel de varias formas: Superficies pintadas o recubiertas con materiales reflectantes y difusos, como pinturas o películas especiales (Maile, Pfaff, & Reynders, 2005). Algunos sustratos están fabricados con materiales reflectantes, como láminas de aluminio o películas metalizadas. Estos materiales reflejan la luz solar incidente y la dispersan en diversas direcciones, lo que incrementa la eficiencia de captación en los sistemas solares (Tong, 2019). La texturización de los sustratos puede generar una dispersión de la luz solar incidente, actuando como un reflector difuso de refuerzo. La superficie texturizada dirige y dispersa la luz en diferentes ángulos, permitiendo una mayor interacción de los fotones con los componentes de captación y mejorando la eficiencia del sistema (Schuster, y otros, 2022).

*Diseño de estructuras multicapa:* Algunos sustratos se diseñan con estructuras multicapa que incluyen capas reflectantes y difusoras (Spiller, 1976). Estas capas pueden redirigir y dispersar la luz solar de manera óptima hacia los componentes de captación, maximizando la captación de radiación y mejorando el rendimiento del sistema solar (Tian, Guo, Zhang, Ivasishin, & Yan, 2023).

*Uso de materiales compuestos:* Los sustratos compuestos se pueden diseñar específicamente para actuar como reflectores difusos de refuerzo (Meola, 2016). Estos materiales combinan propiedades reflectantes y difusas en una sola estructura, optimizando la dispersión y el direccionamiento de la luz solar hacia los componentes de captación (Kohl, 2004).

## **4. Propiedades ópticas y mecánicas de la alúmina como precursor para recubrimiento.**

*Propiedades Mecánicas:*

La alúmina presenta varias características comunes a otros materiales cerámicos policristalinos (Johnson, Biswas, Ramavath, Kumar, & Padmanabham, 2012). Estas incluyen una resistencia moderada a la tracción y flexión, así como un comportamiento de fractura frágil, que es su principal desventaja en términos de propiedades mecánicas (Sarker, Mumu, Al-Amin, Zahangir Alam, & Gafur, 2022). La alúmina es un sólido con enlaces iónicos, lo que implica que no se deforma bajo carga como los metales y las aleaciones. Los fuertes enlaces químicos presentes en la alúmina dan lugar a diversas características, como una baja conductividad eléctrica y térmica, un alto punto de fusión que dificulta su moldeado por colada, y una alta dureza que dificulta su mecanizado, haciéndolo complejo y costoso (Lam & Chen, 2019). La fragilidad de la alúmina es una preocupación principal en el diseño de componentes que la utilizan y además, dado que las cerámicas policristalinas contienen una variedad de defectos con diferentes tamaños y ubicaciones aleatorias dentro del material, las relaciones entre la distribución de tensiones, la probabilidad de falla y la resistencia en las cerámicas deben ser consideradas estadísticamente (Brostow & Hagg Lobland, 2010) (Mezquita, 2001). La alúmina exhibe una serie de características inherentes a los materiales cerámicos policristalinos (Ben-Nissan, 2008). Es fundamental comprender las limitaciones y desafíos asociados con la fragilidad de la alúmina al diseñar componentes cerámicos (Palmero, y otros, 2014).

*Alta dureza:* La alúmina es conocida por su excepcional dureza, siendo uno de los materiales cerámicos más duros disponibles (Mari, 1998). Esta propiedad le confiere resistencia al desgaste y la abrasión, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde se requiere resistencia al desgaste, como rodamientos, revestimientos de alta resistencia y herramientas de corte (Malagón, 2005).

*Alta resistencia a la compresión:* La alúmina exhibe una excelente resistencia a la compresión, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde se requiere soportar cargas pesadas o someterse a compresión, como componentes estructurales en la industria aeroespacial y de ingeniería (Pérez, 1980).

*Resistencia a altas temperaturas:* La alúmina tiene una alta resistencia a temperaturas elevadas, lo que la hace adecuada para su uso en entornos de alta temperatura, como aplicaciones en hornos, catalizadores y motores de alta temperatura (Meetham, 2000).

*Baja conductividad térmica:* La alúmina tiene una baja conductividad térmica, lo que significa que puede actuar como un aislante térmico eficiente en ciertas aplicaciones, como en sistemas de aislamiento térmico y en componentes que requieren protección contra cambios bruscos de temperatura (Tychanicz-Kwiecień, Wilk, & Gil, 2019). Otras propiedades mecánicas y sus valores se presentan en la Tabla 1 (Fecha, s.f.).

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas de la alúmina (Fecha, s.f.).

Propiedades Mecánicas	Unidades	
Módulo Young's (elasticidad)	322 – 338	Gpa
Módulo de cizalladura	~130 – 136	Gpa

Módulo de volumen	~206 – 217	Gpa
Coeficiente de Poisson's	~0,21 – 0,27	-----
Límite elástico (cedencia)	~190 – 210	Mpa
Resistencia a la tracción	~190 – 210	Mpa
Resistencia a la compresión	~1,9× 10 <sup>3</sup> – 2,1× 10 <sup>3</sup>	Mpa
Elongación	~0,06 – 0,07	%ε
Dureza - Vickers	1,22× 10 <sup>3</sup> – 1,34× 10 <sup>3</sup>	HV
Resistencia a la fatiga (10 <sup>7</sup> ciclos)	~162 – 189	Mpa
Esfuerzo de fractura	3,3 – 3,7	[Mpa*m <sup>1/2</sup> ]
Coeficiente de pérdidas mecánicas	~1× 10 <sup>-5</sup> – 2 × 10 <sup>-5</sup>	-----

#### *Propiedades Ópticas:*

La transparencia es una propiedad óptica de los materiales no absorbentes que está fuertemente determinada por diversos parámetros como la densidad y porosidad, el tamaño de poro y en el caso de materiales birrefringentes, como es la alúmina, también el tamaño de grano (Apetz & Bruggen, 2003) . Para obtener materiales con altos valores de transmitancia en el rango visible es necesario alcanzar elevadas densidades, pequeños tamaños de grano, y reducida porosidad, teniendo que ser inferior al 0.05% (Dericioglu & Kagawa, 2003). Las propiedades ópticas de la alúmina dependen mucho su composición química. Los pigmentos son óxidos, sulfuros, oxo-hidróxidos, silicatos, sulfatos o carbonatos (Nayar, y otros, 2014). Generalmente incluyen cationes de metales de transiciones en sus composiciones químicas, la mayoría de los compuestos inorgánicos son cristalinos, es decir sus átomos o iones presentan un arreglo periódico en el espacio (Wells, 2012). Los pigmentos inorgánicos presentan estructuras cristalinas generalmente del tipo: cúbica, tetragonal, romboidal, hexagonal y mono cíclica (Kumar, Dixit, Singh, Prakash Gupta, & S. Jamal Beg, 2021). El desarrollo del color en los pigmentos se debe a la manera en que absorben la radiación electromagnética; y en el caso de los pigmentos luminiscentes, a la manera en que absorben y emiten de acuerdo con la composición química y al tipo de red cristalina que presenten (Muñoz, 2013). Entonces las propiedades ópticas de pigmentos son propiedades de absorción y dispersión de luz (Hottel, Sarofim, Dalzell, & Vasalos, 1971). Si la absorción es muy pequeña comparada con la dispersión, el pigmento es blanco; si la absorción es mucho mayor que la dispersión, sobre región visible, el pigmento es negro (Levinson, Berdahl, & Akbari, Solar spectral optical properties of pigments—Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements, 2005). En pigmentos coloridos (no incluyen blancos ni negros), la absorción

y dispersión son selectivas, es decir depende de la longitud de onda de la luz visible que incide sobre ellos (Levinson, Berdahl, & Akbari, Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants, 2005). Existen varias clasificaciones de pigmentos, basadas en sus composiciones químicas, en sus estructuras cristalinas y las más reciente basadas en color que presentan y en los mecanismos del desarrollo del color de ellos (Bueno, y otros, 2012). Algunas propiedades ópticas se describen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades ópticas de la alúmina y su descripción (Doremus, 2008).

Propiedades	Descripción
Interacción con la luz.	La alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tiene diversas propiedades ópticas que dependen de su estructura cristalina y del tipo de luz con la que interactúa (Mathur, Veith, Shen, Hübner, & Jilavi, 2002).
Alta reflectividad en el infrarrojo.	La alúmina tiene una alta reflectividad en el rango infrarrojo, lo que la hace adecuada para aplicaciones de espejos y reflectores utilizados en sistemas de calefacción por infrarrojos y en tecnologías de sensores infrarrojos (Hass, Schroeder, & Turner, 1956).
Baja absorción de radiación electromagnética.	La alúmina tiene una baja absorción de radiación electromagnética en un amplio rango de frecuencias, lo que la hace útil en aplicaciones donde se requiere alta transmisión o baja pérdida de señal, como en dispositivos de comunicación y componentes electrónicos (Fontal B. S., 2005).

## 5. Generalidades del aluminio.

El aluminio es un elemento químico que pertenece al grupo de los metales y se encuentra en el periodo 3 y grupo 13 de la tabla periódica, es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, representando aproximadamente el 8% de esta (Stwertka, 2002). Su símbolo químico es *Al* y su número atómico es 13, es conocido por sus propiedades físicas y químicas particulares que lo hacen ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y cotidianas (Ramírez, 2022). Dentro de sus propiedades físicas resaltan, es un metal ligero, con una densidad de aproximadamente 2.7 gramos por centímetro cúbico. Tiene un punto de fusión de alrededor de 660 grados Celsius, lo que lo hace fácilmente fundible, su conductividad térmica y eléctrica es alta en comparación con otros metales, lo que lo hace útil en aplicaciones de transferencia de calor y conducción eléctrica (Wade, 2017).

*Resistencia y durabilidad:* A pesar de ser ligero, exhibe una buena resistencia mecánica, tiene una resistencia a la tracción relativamente alta y una buena capacidad de soportar cargas (Dávila, 2011). Además tiene una excelente resistencia a la corrosión debido a una

capa delgada de óxido de aluminio que se forma en su superficie, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en entornos agresivos (Vazquez, 2014).

*Maleabilidad y facilidad de procesamiento:* Es altamente maleable y dúctil, lo que significa que puede ser conformado en diversas formas y tamaños, es fácil de trabajar mediante procesos de conformado, como el laminado, extrusión y forjado (Bravo Vargas, 2016). Además, es altamente reciclable, lo que contribuye a su sostenibilidad y ahorro de recursos (Bermeo-Paucar, Rea-Sánchez, López-Bermúdez, & Pico-Yépez, 2018).

*Aplicaciones industriales:* Se utiliza en una amplia variedad de industrias debido a sus propiedades versátiles, ampliamente utilizado en la construcción, en la fabricación de vehículos (automóviles, aviones, barcos), en la industria de empaques (latas de bebidas, envases) y en aplicaciones eléctricas y electrónicas, entre otras (Gutiérrez-Vázquez & Oñoro, 2008).

*Aspectos medioambientales:* Es considerado un material amigable con el medio ambiente debido a su alta capacidad de reciclaje y baja huella de carbono en comparación con otros metales, el reciclaje requiere menos energía que la producción primaria, lo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al ahorro de recursos naturales (de Macho, 1988).

### **5.1. Mineral bauxita y su producción**

La bauxita es un material heterogéneo, proveniente de la meteorización de rocas ígneas en condiciones geomorfológicas favorables (Komlóssy, van Deursen, & Raahauge, 2022). Es un mineral natural compuesto principalmente por uno o más minerales de hidróxido de aluminio y varias mezclas de sílices, óxidos de hierro y titanio, aluminosilicatos y trazas de impurezas (Rivas Mercury, 2009). Los principales constituyentes minerales con alta proporción de aluminio son la gibsita  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  y polimorfos, bohemita ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ ) y diáspora  $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$  (Tilley G. S., 1927). La Bauxita se clasifica comúnmente de acuerdo con su aplicación comercial; las más comunes son abrasivas, químicas, metalúrgicas, refractarias y para cemento (Plunkert P. A., 2000). De toda la bauxita explotada aproximadamente el 85% es convertido en Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para la posterior producción de aluminio metálico, el 10% se usa en aplicaciones para la producción de alúminas especiales y el 5% restante es usado en aplicaciones no metálicas como materia prima para la producción de diferentes compuestos químicos (Sampaio, 2005).

Estos minerales contienen átomos de aluminio, hidrógeno y oxígeno. En particular, los hidróxidos de aluminio están presentes en la bauxita y es la alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  la más comúnmente producida (Restrepo Hoyos, 2019). La producción de bauxita implica la extracción del mineral de la tierra, su trituración y lavado para eliminar las impurezas, y su posterior refinamiento para separar la alúmina de la sílice y otros minerales (León, 2021). El proceso de refinamiento se conoce como el proceso Bayer, y consiste en la disolución de la bauxita en una solución de hidróxido de sodio a alta temperatura y presión, la alúmina se separa de la solución mediante la filtración y el secado, y se utiliza para producir aluminio (Bayer, 2016). La producción mundial de bauxita en 2020 fue de alrededor de 370 millones de toneladas métricas, con Australia, Guinea y Brasil como los principales productores (Mudd, 2021). La bauxita es un recurso limitado, y la demanda mundial de aluminio ha

llevado a la sobreexplotación de algunas minas, lo que ha llevado a preocupaciones sobre la sostenibilidad de la producción de aluminio (Shiva, 2004).

## 5.2. Estructura, propiedades y anfoterismo del aluminio

### *Estructura*

La estructura cristalina del Al es del tipo cúbica centrada en las caras (FCC), lo que significa que los átomos de aluminio están organizados en una red tridimensional de celdas unitarias, donde cada átomo está rodeado por doce átomos vecinos (Perez, 2024). Esta estructura le confiere al aluminio una alta ductilidad y maleabilidad, lo que lo hace útil para la fabricación de diversos objetos (Perez, 2024). El aluminio es un metal con varias propiedades físicas y químicas distintivas (Callister W. D., 2019). En resumen, de las propiedades del aluminio se observa en la tabla 3.

**Tabla 3.** *Propiedades físicas del aluminio Al.*

Propiedades físicas	Descripción
Densidad	Tiene una densidad relativamente baja en comparación con otros metales, alrededor de 2.7 g/cm <sup>3</sup> . Esta baja densidad hace que el aluminio sea un metal ligero y fácil de manejar (Schmitz, 2006).
Punto de fusión	Aproximadamente 660 grados Celsius (°C). Puede fundirse y moldearse a temperaturas relativamente bajas en comparación con metales como el hierro o el cobre (Koech, 2012).
Conductividad térmica	Es un excelente conductor térmico. Tiene una alta capacidad para transferir calor, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere disipación de calor, como en radiadores y sistemas de enfriamiento (Medina, 2020).
Maleabilidad y ductilidad	Se puede deformar y dar forma fácilmente sin romperse. Esto permite que el aluminio se procese en láminas delgadas, alambres y otros productos con formas complejas (Kalpakjian, 2002).
Resistencia a la corrosión	Al estar expuesto al aire, el aluminio se recubre automáticamente con una capa de óxido de aluminio que protege el metal de

Reflectividad	la oxidación adicional. Esta capa proporciona una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos (Ávila, Más allá de la herrumbre 1. , 2013). Tiene una alta reflectividad, lo que significa que refleja bien la luz y las radiaciones electromagnéticas. Esto lo hace útil en aplicaciones que requieren reflectores, como en iluminación, paneles solares y espejos (Perez de Los Reyes, 2008)
---------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabla 4.** *Propiedades químicas del aluminio Al.*

Propiedades químicas	Descripción
Reactividad con el oxígeno	Forma una capa de $(Al_2O_3)$ en su superficie al reaccionar con el aire. Actúa como una barrera protectora contra una mayor oxidación, lo que confiere al aluminio una excelente resistencia a la corrosión (Vaamonde, 2000).
Reactividad con ácidos	Reacciona con ácidos fuertes, como el ácido clorhídrico (HCl) o el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), liberando gas hidrógeno ( $H_2$ ) y formando sales de aluminio (Figuroa, 2010).
Reactividad con bases	Reacciona con bases fuertes, como el hidróxido de sodio (NaOH), para formar aluminato de sodio y liberar gas hidrógeno (Sverdlin, 2003).
Aleación	Al combinar el aluminio con otros elementos, como cobre, magnesio, silicio o zinc, se pueden obtener aleaciones de aluminio con propiedades mejoradas, como mayor resistencia mecánica o resistencia a altas temperaturas. (Kammer, 2018)
Reducción	Se obtiene a través de un proceso de reducción electrolítica del $(Al_2O_3)$ en un proceso conocido como electrólisis de Hall-Héroult. Este proceso aprovecha la capacidad del aluminio para reducirse a sí

---

mismo en presencia de corriente eléctrica (Slocum, 2017).

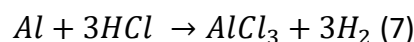
---

### *Anfoterismo*

El Al es un metal con propiedades anfóteras, lo que implica que puede funcionar tanto como un ácido como una base en reacciones químicas, esto significa que su comportamiento puede variar dependiendo de la sustancia con la que interactúe (Bertsch, 1996). Cuando el aluminio reacciona con una base fuerte, como el (NaOH), actúa como un ácido y forma aluminato de sodio ( $\text{NaAlO}_2$ ) como producto (Vallejo Gallardo, 2013). La reacción se representa de la siguiente manera:



En esta reacción, el aluminio dona un ion de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) al hidróxido de sodio, formando el aluminato de sodio y liberando gas hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) como subproducto. Por otro lado, cuando el aluminio se encuentra en presencia de un ácido fuerte, como el ácido clorhídrico (HCl), se comporta como una base y forma cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ). La ecuación química correspondiente es la siguiente:



En esta reacción, el aluminio acepta tres iones de hidrógeno del ácido clorhídrico, formando cloruro de aluminio y liberando gas hidrógeno. Estas reacciones ilustran la capacidad del aluminio para interactuar tanto como ácido o base en diferentes contextos químicos. Esta propiedad anfótera del aluminio es importante en diversas aplicaciones, como en la industria química y metalúrgica, donde el aluminio puede participar en reacciones de neutralización, formación de sales y otras reacciones químicas específicas.

### **5.3. Especies sólidas y líquidas más comunes del aluminio.**

El aluminio se puede presentar en diferentes especies sólidas y líquidas (Barnhisel & Bertsch, 2015), a continuación, se describen algunas de ellas.

#### *Sólidas.*

*Aluminio metálico (Al):* Es un metal ligero y resistente, tiene una alta conductividad térmica y eléctrica, es ampliamente utilizado en la industria debido a su baja densidad y su capacidad para resistir la corrosión (Gregor, Químico, Palabras, El aluminio, & del elemento., s.f.). Se encuentra en numerosas aplicaciones, como la fabricación de estructuras, envases, cables eléctricos y componentes de automóviles y aviones (Campbell Jr, 2011).

*Óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):* También conocido como alúmina, es un compuesto cerámico muy duro y resistente (Paquet, 2010). Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y de ingeniería, se utiliza como abrasivo en la producción de papel de lija y en la fabricación de cerámicas técnicas, como aislantes eléctricos y refractarios de alta temperatura (Boch P. &.).

*Hidróxido de aluminio (Al(OH)<sub>3</sub>):* Es un sólido blanco y amorfo, se utiliza en la industria farmacéutica como antiácido y en productos cosméticos como agente suavizante (Willhite, y otros, 2014). También se utiliza en la fabricación de materiales refractarios y retardantes de llama debido a su capacidad para liberar agua cuando se calienta (Musselman, 1990).

*Sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>):* Es un compuesto sólido utilizado principalmente como coagulante en el tratamiento de aguas, se utiliza en plantas de tratamiento de agua potable y en sistemas de tratamiento de aguas residuales para eliminar partículas suspendidas y materia orgánica (Luttrell, 2015).

*Fluoruro de aluminio (AlF<sub>3</sub>):* Es un sólido cristalino utilizado en la producción de aluminio mediante electrólisis. También se utiliza en la fabricación de cerámicas y como aditivo en la producción de vidrio para reducir su punto de fusión (Tabereaux, Aluminum production. , 2014).

*Líquidas.*

*Aleaciones de aluminio:* Se utiliza en la formación de aleaciones líquidas con otros metales, como cobre, magnesio y silicio, estas aleaciones líquidas se utilizan en diversas industrias, como la aeroespacial y la automotriz, debido a su resistencia, ligereza y conductividad térmica (Davis J. , 1993).

*Cloruro de aluminio líquido (AlCl<sub>3</sub>):* El (AlCl<sub>3</sub>) en estado líquido se utiliza como catalizador en una amplia variedad de reacciones químicas, como la producción de polímeros y la síntesis de compuestos orgánicos. También se utiliza en la producción de productos farmacéuticos y químicos finos (Bruice, 2015). Es corrosivo y altamente reactivo, por lo que se maneja con precaución en entornos controlados (Shreir, 2013).

#### 5.4. Aplicaciones del aluminio

El aluminio es un material muy versátil que tiene numerosas aplicaciones que se describen en la Tabla 5.

**Tabla 5.** *Aplicaciones y su descripción del Al.*

Aplicación	Descripción
Industria de la construcción	Se utiliza para fabricar ventanas, puertas, fachadas, revestimientos, estructuras, entre otros elementos (Lane, 2020).
Industria del transporte	Se utiliza en la fabricación de aviones, barcos, automóviles, bicicletas y trenes, gracias a su bajo peso y alta resistencia a la corrosión (Skillingberg & Green, 2007).

Envases y embalajes	Es un material muy utilizado en la fabricación de envases y embalajes para alimentos, bebidas, productos farmacéuticos y cosméticos. Debido a su alta capacidad de protección y conservación (Sarkar, 2020).
Electrónica	Se utiliza en la fabricación de componentes en dispositivos electrónicos, como disipadores de calor, carcasas de ordenadores y dispositivos móviles, gracias a su capacidad para disipar el calor de manera eficiente y su resistencia a la corrosión (Brough & Jouhara, 2020).
Industria del deporte	Se utiliza en la fabricación de bicicletas, raquetas, palos de golf, entre otros elementos deportivos (Chen S. , 2024).
Decoración	Se utiliza en la fabricación de elementos decorativos, como lámparas, muebles, marcos de fotografías, entre otros elementos (Sheller, 2014).
Industria médica	Se utiliza en la fabricación de implantes médicos, prótesis y equipos médicos (Festas, Ramos, & Davim, 2020).
Industria del aluminio	Se utiliza principalmente en la producción de aluminio primario y secundario. La producción de aluminio primario implica la extracción de alúmina a partir de la bauxita y su posterior reducción mediante electrólisis en celdas de reducción (Tabereaux, Aluminum production., 2024). El aluminio secundario se obtiene a partir de la chatarra de aluminio reciclado (Schlesinger, 2006).
Metalurgia	Se utiliza como agente reductor en la obtención de metales como el hierro y el cromo. También se utiliza en aleaciones

con otros metales, como el acero aluminizado, que ofrece una mayor resistencia a la corrosión (Ávila, Más allá de la herrumbre 1, 2013).

Química orgánica

Se utiliza en la síntesis de compuestos orgánicos, como catalizador en reacciones de Friedel-Crafts (Calloway, 1935).

---

### 5.5. Generalidades de la alúmina

La ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) está disponible en varias formas, como polvo, partículas y bloques sólidos (Correa Arango, 2015). Una de las principales aplicaciones de la alúmina se encuentra en la fabricación de cerámicas técnicas y refractarias. Debido a su resistencia y estabilidad térmica, se utiliza en la producción de ladrillos refractarios, tubos y crisoles para aplicaciones de alta temperatura, como hornos industriales y revestimientos de chimeneas (Cardarelli, 2008). Además, la alúmina desempeña un papel crucial en la producción de aluminio. Se utiliza como materia prima en el proceso de obtención de aluminio primario a través de la electrólisis de la alúmina en celdas de reducción (Tabereaux, Aluminum production, 2024). También se utiliza en la producción de aluminio secundario a partir de la chatarra de aluminio reciclado (Wallace, 2011). La alúmina encuentra aplicaciones en la fabricación de catalizadores, donde su estructura porosa y su alta área superficial permiten reacciones químicas eficientes. Los catalizadores de alúmina se utilizan en la industria petroquímica, en la producción de plásticos, en la refinación de petróleo y en muchas otras aplicaciones químicas (Márquez-Alvarez, Žilková, Pérez-Pariente, & Čejka, 2008). Otro campo de aplicación importante es la fabricación de abrasivos. La alúmina se utiliza en forma de polvo abrasivo para pulir y rectificar metales, cerámicas y otros materiales (Marinescu, 2015). Los abrasivos de alúmina son ampliamente utilizados en la industria del automóvil, en la fabricación de herramientas y en procesos de acabado de superficies (Deja, 2021). Además de su amplio uso en aplicaciones industriales, la alúmina es un material seguro e inerte, lo que la hace adecuada para su uso en aplicaciones médicas y dentales. Se utiliza en la fabricación de implantes ortopédicos, prótesis dentales y otros dispositivos biomédicos (Popat, 2006). Así mismo, la alúmina tiene aplicaciones en la industria electrónica, donde se utiliza como material dieléctrico en condensadores de película delgada y como recubrimiento protector en componentes de alta tecnología (Anich, Bagshaw, Margolis, & Skillingberg, 2016). La alúmina también encuentra aplicaciones en recubrimientos para su uso como reflectores de refuerzo (Rooy, 1990). Estos recubrimientos se utilizan en diversas industrias donde se requiere un alto rendimiento de reflexión de la luz y la radiación térmica (Boström, Wäckelgård, & Westin, 2003). A continuación, se describen algunas de las aplicaciones ópticas de la alúmina.

*Reflectores solares:* En la fabricación de recubrimientos reflectantes para paneles y concentradores solares. Estos reflectores ayudan a dirigir y concentrar la luz solar en las

células fotovoltaicas o en los receptores de energía solar térmica, aumentando así la eficiencia de conversión de energía (Atkinson, Sansom, Almond, & Shaw, 2015).

*Iluminación de alta potencia:* En recubrimientos reflectantes para lámparas de alta potencia, como las utilizadas en iluminación industrial y en proyectores. Estos recubrimientos permiten un mayor aprovechamiento de la luz emitida, mejorando la eficiencia luminosa y la distribución de la luz (Krames, y otros, 2007).

*Espejos de precisión:* Recubrimientos para la fabricación de espejos de precisión utilizados en aplicaciones científicas (microelectrónica y semiconductores, tecnología espacial, astronomía y telescopios espaciales) y tecnológicas (industrial aeroespacial y satelital, tecnología láser y óptica de precisión, automoción y sensores avanzados) (Aegerter, y otros, 2008).

## 5.6. Polimorfismo de la $\text{Al}_2\text{O}_3$

En la ciencia de los materiales, el polimorfismo se refiere a la capacidad de un material para existir en diferentes formas o estructuras cristalinas (Bernstein, 2020). En el caso de la alúmina, también conocida como ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), se han identificado varias formas polimórficas (Shirai, 2009). Los principales polimorfos de la alúmina son:

*$\alpha$ -Alúmina:* También conocida como corindón, es la forma más común y estable de alúmina. Tiene una estructura cristalina hexagonal, en la que los átomos de aluminio y oxígeno forman capas hexagonales apiladas (Ervin Jnr, 1952). ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es dura y resistente, y se utiliza en la fabricación de abrasivos, como las muelas abrasivas (Jackson & Toward, 2021).

*$\gamma$ -Alúmina:* Es una forma meta estable que se obtiene mediante la deshidratación controlada de hidróxido de aluminio amorfo o gel de alúmina (Lamouri, 2017). La  $\gamma$ -alúmina tiene una estructura amorfa y es altamente porosa, lo que la hace útil en aplicaciones catalíticas y como soporte de catalizadores (Trueba & Trasatti,  $\Gamma$ -alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects, 2005).

*$\vartheta$ -Alúmina:* Es otra forma meta estable de alúmina que se puede obtener mediante tratamientos térmicos de  $\alpha$ -alúmina a alta temperatura (Matori, 2012). Tiene una estructura cristalina distorsionada y se utiliza en aplicaciones de catalizadores y como precursor para la síntesis de otros materiales (Stuart, 2021). Estos polimorfos de la alúmina difieren en su estructura cristalina, propiedades físicas y aplicaciones (Stevens & Binner, 1984). La capacidad de la alúmina para existir en diferentes formas polimórficas brinda flexibilidad y versatilidad en su uso en diversas industrias, desde aplicaciones abrasivas hasta aplicaciones catalíticas y cerámicas técnicas (Boch P. &, 2010). Es importante destacar que el polimorfismo no se limita a la alúmina, sino que es un fenómeno común en muchos materiales, donde diferentes estructuras cristalinas pueden coexistir en función de las condiciones de formación, la temperatura y otros factores (Riedel & Chen, 2008).

## 5.7. Propiedades y aplicaciones de alúmina alfa y gamma

El polimorfismo de la  $\alpha$ -alúmina y  $\gamma$ -alúmina les permite tener una gran variedad de propiedades y aplicaciones, las cuales se abordan a continuación:

### *Alúmina alfa ( $\alpha$ -alúmina):*

#### *Propiedades:*

1. *Estructura cristalina:* Tiene una estructura cristalina hexagonal, también conocida como estructura corindón.
2. *Dureza:* La  $\alpha$ -alúmina es extremadamente dura y posee una alta resistencia a la abrasión.
3. *Estabilidad térmica:* Es estable a altas temperaturas y puede soportar temperaturas de hasta 2,000 °C sin descomponerse.
4. *Transparencia:* La alúmina alfa es transparente en el rango del espectro visible.
5. *Conductividad térmica:* Tiene una buena conductividad térmica.

#### *Aplicaciones:*

1. *Cerámicas técnicas:* Debido a su alta dureza y resistencia, la  $\alpha$ -alúmina se utiliza en la fabricación de cerámicas técnicas, como herramientas de corte, sustratos electrónicos y componentes resistentes al desgaste.
2. *Abrasivos:* La alúmina alfa se utiliza en la fabricación de muelas abrasivas, discos de corte y papel de lija debido a su dureza y capacidad para eliminar material.
3. *Refractarios:* Debido a su alta estabilidad térmica, se utiliza en aplicaciones de alta temperatura, como ladrillos refractarios, revestimientos de hornos y crisoles.

### *Alúmina gamma ( $\gamma$ -alúmina):*

#### *Propiedades:*

1. *Estructura cristalina:* La alúmina gamma tiene una estructura cúbica.
2. *Porosidad:* La  $\gamma$ -alúmina es altamente porosa, lo que le confiere una gran área superficial y una estructura de porosidad abierta.
3. *Superficie activa:* Debido a su alta área superficial, la  $\gamma$ -alúmina es químicamente activa y puede funcionar como un soporte para catalizadores.
4. *Capacidad de adsorción:* La alúmina gamma tiene una buena capacidad para adsorber moléculas y gases.

#### *Aplicaciones:*

1. *Catalizadores:* La  $\gamma$ -alúmina se utiliza ampliamente como soporte de catalizadores en diversas reacciones químicas debido a su alta área superficial y su capacidad para interactuar con los reactantes.
2. *Adsorbentes:* Debido a su porosidad y capacidad de adsorción, se utiliza en aplicaciones de purificación y filtración, como la eliminación de contaminantes y la purificación de gases y líquidos.
3. *Materiales cerámicos:* La  $\gamma$ -alúmina se utiliza en la fabricación de materiales cerámicos porosos y de baja densidad, como membranas cerámicas y filtros.

## **6. Propiedades de la luz**

Las propiedades ópticas de la luz son los diversos comportamientos y características que exhibe la luz en su interacción con la materia (Espinoza Tapia, 2016). Estas propiedades son fundamentales para comprender y estudiar los fenómenos de la óptica, que abarcan desde la reflexión y refracción hasta la difracción y la interferencia (Malacara Hernández, 2015). La luz es una forma de energía radiante que se propaga en forma de ondas electromagnéticas Figura 3 (Ishimaru, 2017). Estas ondas tienen una naturaleza dual, ya que pueden comportarse tanto como partículas (fotones) como ondas (Henriksen, Angell, Vistnes, & Bungum, 2018). Las propiedades ópticas de la luz están determinadas por sus características ondulatorias (Arias, 2008). Una de las propiedades ópticas más fundamentales de la luz es su velocidad de propagación, que en el vacío es constante y tiene un valor de aproximadamente 299,792 kilómetros por segundo (Tipler, 2021). Sin embargo, la velocidad de la luz se modifica al atravesar medios materiales, lo que da lugar a fenómenos de refracción. La refracción es la desviación de la luz cuando pasa de un medio a otro, y está determinada por el índice de refracción del material (Kaur & Gurnani, 2025). El índice de refracción es una medida de la velocidad de la luz en un medio en comparación con su velocidad en el vacío. Cuando la luz pasa de un medio con un índice de refracción alto a uno con un índice de refracción bajo, se refracta hacia la normal a la superficie de separación. Por el contrario, si pasa de un medio con un índice de refracción bajo a uno con un índice de refracción alto, la luz se refracta lejos de la normal (Kaur & Gurnani, 2025). La reflexión es otro fenómeno óptico importante que se produce cuando la luz incide sobre una superficie y se devuelve al mismo medio. La reflexión puede ser especular, cuando la luz se refleja de forma ordenada y mantiene la dirección incidente, o difusa, cuando la luz se refleja en múltiples direcciones debido a la irregularidad de la superficie (Nicodemus, y otros, 1977). La ley de reflexión establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión respecto a la normal a la superficie. La luz también puede sufrir fenómenos de absorción y transmisión al interactuar con la materia (Bohren, 2008). La absorción ocurre cuando la luz es absorbida por un material y se convierte en energía térmica. (Kim, Lee, Kang, & Kim, 2018) La transmisión se produce cuando la luz atraviesa un material sin ser absorbida ni reflejada. Además de estas propiedades básicas, la luz también presenta fenómenos de interferencia y difracción (Born, 2013). La interferencia ocurre cuando dos o más ondas de luz se superponen y se combinan, lo que puede resultar en patrones de franjas de interferencia, como las que se observan en los experimentos de doble rendija (Beynon, 1988). La difracción, por otro lado, es la capacidad de la luz para cambiar de dirección al pasar por una abertura o alrededor de un obstáculo, lo que da lugar a patrones de difracción característicos (Lüders & Pohl, 2018). La reflectancia se refiere a la capacidad de un objeto o superficie para reflejar la luz que incide sobre ella. Es una medida de la cantidad de luz que se refleja en comparación con la cantidad de luz que incide sobre la superficie. Se puede expresar como un porcentaje o como un valor decimal entre 0 y 1 (Kortüm, 2012). Una superficie blanca y brillante, como la nieve, tendrá una alta reflectancia: mientras que una superficie oscura, como el asfalto, tendrá una baja reflectancia (Mc Ilvaine, Barkaszi, Beal, & Anello, 1993). Es importante en muchas áreas, incluyendo la fotografía, la medición de la calidad del agua y la detección de objetos en la industria aeroespacial (Salerno, 1976).

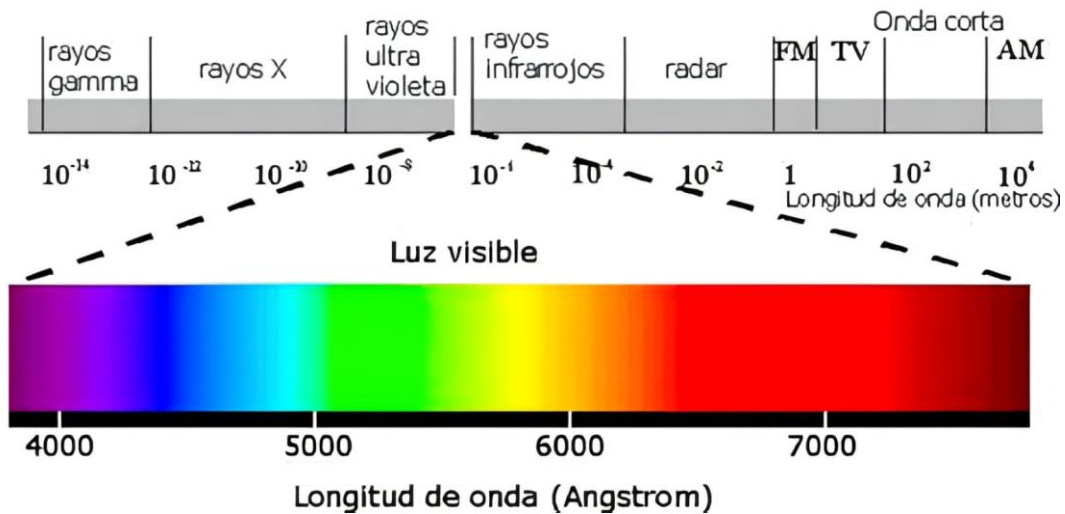


Figura 3. Espectro electromagnético (Khan Academy, s.f.).

### 6.1. Teoría de Kubelka-Munk

La teoría de Kubelka-Munk es una herramienta matemática utilizada para describir la interacción de la luz con materiales opacos y absorbentes (Alcaraz de la Osa, Iparragirre, Ortiz, & Saiz, 2020). Esta teoría proporciona una relación entre las propiedades ópticas del material, como la reflectancia y la transmitancia, y los coeficientes de absorción y dispersión de la luz (Džimbeg-Malčić, 2012). La teoría se basa en el modelo de una capa de material homogéneo e infinitamente espesa que interactúa con la luz incidente (Donner, 2005). Se utiliza principalmente en la caracterización de recubrimientos, tintas, pigmentos y materiales fibrosos, donde la interacción de la luz con el material es compleja debido a la absorción y dispersión interna (Jordà Linares, 2011).

La teoría de Kubelka-Munk se expresa mediante las siguientes fórmulas (Vargas & Niklasson, 1997):

1. Coeficiente de absorción (k):

$$K = \frac{(1-R)^2}{(2R)} \quad (8)$$

Donde R es la reflectancia del material.

2. Coeficiente de dispersión (s):

$$s = \frac{(1-R)^2}{(2R(1+R))} \quad (9)$$

Donde R es la Reflectancia del material.

Estos coeficientes se utilizan para determinar las propiedades ópticas del material y se pueden relacionar con otras propiedades físicas, como la concentración del colorante o el tamaño de las partículas en el material (Yang & Kruse, 2004). Un ejemplo de aplicación de

La teoría de Kubelka-Munk es en la industria de la pintura y los pigmentos, se utiliza para determinar las propiedades de opacidad, el poder cubriente y la calidad del color de las pinturas y los pigmentos (Diebold, 2014). Al conocer los coeficientes de absorción y dispersión, se pueden realizar cálculos para optimizar la formulación de pinturas y pigmentos y lograr los efectos visuales deseados (Merkus, 2014).

## **7. Reflectancia**

Cuando la luz incide sobre una superficie, parte de la luz puede ser absorbida por el material, parte puede transmitirse a través del material y el resto es reflejado (Ditchburn, 2013). La cantidad de luz reflejada depende de varios factores, como las propiedades ópticas del material, la longitud de onda de la luz incidente, la geometría de la superficie y la rugosidad de esta (Nayar S. K., 1989). La reflectancia se puede medir utilizando diferentes métodos, como espectrofotometría o técnicas de reflectometría (Levinson, Akbari, & Berdahl, Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods, 2010). Estas técnicas permiten cuantificar la reflectancia en función de la longitud de onda de la luz, lo que permite obtener información detallada sobre cómo un material refleja la luz en diferentes colores (Real Peña, 2012). La reflectancia se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, en la industria de los recubrimientos y pinturas, la reflectancia se utiliza para evaluar la calidad del acabado y determinar la apariencia visual de los materiales (Westlund & Meyer, 2001). En la industria textil y de la moda, la reflectancia se utiliza para medir el brillo y el aspecto de los tejidos y las prendas (Choudhury, 2014). Además, en campos como la astronomía y la teledetección, la reflectancia se utiliza para analizar y caracterizar la composición de objetos y superficies a partir de la luz reflejada (Schott, 2007). Es una propiedad óptica importante que se utiliza para evaluar la apariencia visual de materiales, medir el brillo y el aspecto de superficies, así como para analizar y caracterizar la composición de objetos a partir de la luz reflejada. Existen dos tipos de reflectancia, difusa y especular que a continuación se describe (Hunter, 1987).

### **7.1. Reflectancia difusa**

La reflectancia difusa se refiere a la cantidad de luz que se refleja en diferentes direcciones después de que incide sobre una superficie (Wolff L. B., Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces, 1994). La luz reflejada se dispersa en muchas direcciones diferentes, en lugar de reflejarse en una sola dirección específica, como ocurre con la reflectancia especular (Wolff L. B., Relative brightness of specular and diffuse reflection, 1994). La reflectancia difusa se utiliza comúnmente en la medición de la calidad de la iluminación de los espacios interiores, ya que esta propiedad afecta la uniformidad y la distribución de la luz en una habitación (Kruisselbrink, Dangol, & Rosemann, 2018). La reflectancia difusa de una superficie depende de la composición y textura de la superficie, así como del ángulo de incidencia la longitud de onda de la luz (Torrent & Barrón, 2015). Se mide generalmente utilizando un espectrofotómetro o un medidor de luminancia (Nevas, Manoocheri, & Ikonen, 2004).

## 7.2. Reflectancia especular

Se refiere a la cantidad de luz que se refleja en una dirección específica después de incidir sobre una superficie (Torrance & Sparrow, 1967). Esta propiedad se utiliza comúnmente en la evaluación de la calidad de superficies brillantes o espejadas, como el vidrio, el metal o el plástico pulido (Nayar S. H., 1990). Puede ser medida utilizando un goniómetro, que mide la intensidad de la luz reflejada en un ángulo específico en relación con el ángulo de incidencia de la luz (Wolff L. B., 1994). La reflectancia especular de una superficie puede variar según la longitud de onda de la luz incidente, el ángulo de incidencia y la composición y textura de la superficie (Good, y otros, 2016). Es importante en aplicaciones de ingeniería y diseño, como en la fabricación de espejos, lentes ópticas y pantallas de visualización (González, 2007).

## 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, los combustibles fósiles continúan siendo la principal fuente de energía, sin embargo, su uso ha generado preocupaciones ambientales significativas debido a la emisión de gases contaminantes, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) (Dincer, Energy and environmental impacts: Present and future perspectives, 1998). Estos compuestos han sido identificados como los principales responsables del calentamiento global, el deterioro de la calidad del aire y el incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la población (Manisalidis, Stavropoulou, Stavropoulos, & Bezirtzoglou, 2020). En respuesta a esta problemática, se han impulsado alternativas energéticas sostenibles, destacando la energía solar por su disponibilidad y bajo impacto ambiental (Dincer, Renewable energy and sustainable development: a crucial review, 2000). No obstante, su eficiencia aún enfrenta desafíos, particularmente en la optimización de la captación y aprovechamiento de la radiación solar (Al-Shahri, y otros, 2021).

Dentro de los sistemas solares de concentración, los reflectores difusos de refuerzo desempeñan un papel crucial al mejorar la eficiencia de conversión energética mediante la redirección y dispersión de la luz solar (Imenes & Mills, 2004). Sin embargo, los materiales actualmente utilizados en estos reflectores presentan limitaciones en términos de durabilidad, eficiencia óptica y sostenibilidad. Por esta razón, resulta fundamental la investigación y el desarrollo de nuevos materiales que no solo optimicen el rendimiento de estos sistemas, sino que también sean económicamente viables y ambientalmente responsables (Kennedy, 2005).

En este contexto, la ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se perfila como una alternativa innovadora debido a sus destacadas propiedades ópticas y mecánicas (García Ferré, y otros, 2013). Su obtención a partir de chatarra de aluminio, mediante el proceso Bayer, permitiría establecer un modelo de economía circular, reduciendo el impacto ambiental asociado con la extracción de bauxita y la producción primaria de aluminio (Ma, Preveniou, Kladis, & Pettersen, 2022). Sin embargo, antes de su implementación, es necesario evaluar su viabilidad como material para reflectores difusos en aplicaciones solares, considerando aspectos clave como su

capacidad de reflectancia, resistencia mecánica y estabilidad en condiciones ambientales adversas (Chen & Lu, 2020).

Por lo tanto, esta investigación se enfoca en la síntesis de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) a partir de chatarra de aluminio, con el propósito de analizar su potencial aplicación en recubrimientos reflectantes dentro de sistemas solares. Mediante pruebas de caracterización óptica y mecánica, se busca determinar si la alúmina obtenida mediante este proceso cumple con los estándares requeridos para mejorar la eficiencia de los sistemas de concentración solar, promoviendo al mismo tiempo la reducción de residuos y el aprovechamiento de materiales reciclados.

En un escenario global donde la demanda de energía continúa en ascenso y la necesidad de disminuir las emisiones de carbono se vuelve cada vez más apremiante, la implementación de materiales avanzados y sostenibles, como la alúmina reciclada, podría representar una solución innovadora y eficiente para optimizar los sistemas de captación solar. Así, este estudio no solo contribuirá al avance científico, sino también al desarrollo de nuevas tecnologías energéticas fundamentadas en la sostenibilidad y la eficiencia energética.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

La realización de la síntesis de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) a partir de chatarra de (Al) y su evaluación como reflector difuso de refuerzo en sistemas solares se fundamenta en la necesidad crítica de buscar soluciones sostenibles y eficientes que mitiguen los impactos adversos de la dependencia de combustibles fósiles. A continuación, se destacan los puntos clave que respaldan esta investigación:

##### **1. Reducción de la Dependencia de Combustibles Fósiles:**

La transición hacia fuentes de energía más limpias es esencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles. La implementación exitosa de sistemas solares puede desempeñar un papel crucial en este cambio, contribuyendo a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica asociada con la combustión de hidrocarburos.

##### **2. Aprovechamiento de Residuos Urbanos:**

La síntesis de hidróxido de aluminio y alúmina a partir de chatarra de aluminio aborda de manera efectiva el problema de la acumulación de basura urbana. Al reutilizar y transformar la chatarra de aluminio en materiales valiosos para aplicaciones solares, se contribuye a la reducción de residuos sólidos y se fomenta la economía circular.

##### **3. Mejora de la Eficiencia en la Captación de Energía Solar:**

La evaluación de estos compuestos como reflector difuso de refuerzo busca mejorar la eficiencia de los sistemas solares al optimizar la captación y distribución de la radiación solar. Esta mejora no solo impacta positivamente en la generación de energía solar, sino que también aumenta la viabilidad y competitividad de esta fuente de energía renovable.

#### **4. Impacto en la Salud Humana:**

La relación entre el uso de combustibles fósiles y problemas de salud es innegable. La contaminación del aire causada por las emisiones de la quema de combustibles fósiles ha sido vinculada a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Lewtas, 2007). Al fomentar la adopción de sistemas solares, esta investigación contribuye indirectamente a la mejora de la salud pública al reducir la exposición a contaminantes del aire.

#### **5. Perspectiva de Cambio Sostenible:**

En un contexto más amplio, esta investigación aboga por un cambio sostenible en la forma en que obtenemos y utilizamos la energía. La propuesta no solo resuelve problemas inmediatos, como la acumulación de chatarra y la mejora de la eficiencia solar, sino que también establece un camino hacia prácticas más sostenibles y conscientes del medio ambiente.

### **5. HIPOTESIS**

La síntesis de ( $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>) y alúmina en sus fases ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) a partir de chatarra de (Al) representa un procedimiento eficiente y eco-sostenible con potencial para generar un material de reflector difuso de refuerzo altamente eficaz en sistemas solares. La utilización de estos materiales derivados de la chatarra de aluminio dará lugar a un reflector con propiedades ópticas superiores, lo que, en última instancia, redundará en una mejora de la eficiencia y la viabilidad económica de los sistemas solares.

### **6. OBJETIVOS**

#### **6.1 Objetivo general**

Sintetizar ( $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>) y alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ), utilizando como materia prima la chatarra de aluminio, con el propósito de evaluar sus propiedades como reflector difuso de refuerzo en sistemas solares, contribuyendo así al desarrollo de soluciones sostenibles en la captación y aprovechamiento de energía solar.

## 6.2 Objetivos específicos

1. Elaborar  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) mediante la transformación química de chatarra para su evaluación como reflector difuso de refuerzo.
2. Transformar la chatarra de aluminio reciclada en un material base, usando métodos físicos y químicos, para luego obtener hidróxido de aluminio y convertirlo en alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ).
3. Sintetizar un recubrimiento mediante el método sol-gel y aplicarlo por aspersión sobre un sustrato de acero bajo en carbono esmaltado SAE 1008 (7.6 cm  $\times$  2.5 cm, calibre 24 (0.6mm)), elegido por su buena adherencia, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica, ideal para aplicaciones en sistemas solares.
4. Caracterizar ( $\gamma$ - $\text{AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\alpha$  y  $\gamma$ ) mediante las técnicas de caracterización MEB/EDS, DRX y UV-VIS para determinar sus propiedades.
5. Caracterizar el recubrimiento mediante UV-VIS, para conocer su reflectancia relativa difusa.
6. Realizar pruebas mecánicas (dureza y adherencia), del recubrimiento como reflector difuso de refuerzo para evaluar su posible uso en sistemas solares.

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 Técnicas de caracterización

Hay varias técnicas de caracterización de materiales utilizadas en ciencia e ingeniería para analizar y comprender las propiedades y estructuras de los materiales (Callister W. D., 2022). A continuación, se describen cinco técnicas de caracterización comunes y su importancia:

#### 7.1.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se utiliza un haz de electrones para generar imágenes de alta resolución de la superficie de muestras (Liu, 2006). Permite examinar la morfología, la topografía y la composición química de los materiales a nivel micro y nano (Oa, 2002). Es especialmente útil para analizar la estructura de fracturas, la distribución de partículas y la calidad de las superficies, y es ampliamente utilizado en campos como la ciencia de materiales, la geología y la biología (Ross, 2007).

#### 7.1.2 Espectroscopia infrarroja (IR):

Se basa en la absorción y emisión de radiación infrarroja por parte de los materiales (Gómez, 2006). Proporciona información sobre los enlaces químicos, las vibraciones moleculares y la composición de los materiales (Gismero, 1998). Es útil para identificar compuestos orgánicos e inorgánicos, así como para analizar la estructura molecular de polímeros, productos farmacéuticos y materiales biológicos (Giraldo, 2015).

#### 7.1.3 Difracción de rayos X (XRD).

Se utiliza para analizar la estructura cristalina de los materiales (Aparicio Ceja & Carbajal Arizaga, 2010). Mediante la interacción de rayos X con el material, se obtienen patrones de difracción que revelan información sobre la disposición atómica en la red cristalina, como la identificación de fases cristalinas, la determinación de parámetros de red y el estudio de deformaciones estructurales (Román, 1992). Es ampliamente utilizada en la caracterización de metales, cerámicas, minerales y compuestos orgánicos (Aparicio Ceja & Carbajal Arizaga, 2010).

#### **7.1.4 Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN).**

Se basa en la interacción de átomos con campos magnéticos para obtener información sobre la estructura molecular y la composición química de los materiales (Fontal B. S., El espectro electromagnético y sus aplicaciones., 2005). Es especialmente valiosa para el análisis de compuestos orgánicos y biomoléculas, permitiendo la identificación de núcleos atómicos y el estudio de la conectividad química, la dinámica molecular y la determinación de la pureza de muestras (Lambert, 2019).

#### **7.1.5 Espectroscopia UV-VIS.**

Se refiere a una técnica de espectroscopia que utiliza radiación electromagnética en el rango de longitud de onda ultravioleta (UV) y visible (VIS) para analizar muestras (MAGDALENA, 2016). Esta técnica se basa en la interacción de la luz con la materia, y se utiliza para determinar la absorbancia o transmitancia de una muestra en función de la longitud de onda (Ramírez-García, 2012). En la espectroscopia UV-VIS, una fuente de luz emite radiación en el rango de UV -VIS, que luego se pasa a través de la muestra, algunas longitudes de onda de la luz son absorbidas selectivamente por la muestra, mientras que otras son transmitidas (Bosch Reig, 2015). Un detector registra la cantidad de luz absorbida o transmitida en cada longitud de onda, y estos datos se utilizan para construir un espectro de absorción o transmitancia (Fontal B. S., El espectro electromagnético y sus aplicaciones, 2005).

## **7.2 Pruebas mecánicas**

### **7.2.1 Prueba de adherencia mediante cinta, norma ASTM D3359**

Es un ensayo mecánico utilizado para evaluar la adhesión de un recubrimiento a un sustrato (Rezaee, y otros, 2019). Consiste en aplicar una cinta adhesiva en la superficie del recubrimiento, ejercer una fuerza de adhesión al pelar la cinta y luego evaluar visualmente el grado de adhesión y el nivel de deterioro del recubrimiento (Schweitzer, 2005). El procedimiento de la prueba involucra los siguientes pasos: se aplica la cinta adhesiva sobre el recubrimiento de manera uniforme y se ejerce presión para asegurar una buena adherencia. Luego, se realiza una rápida retirada de la cinta en un ángulo específico (generalmente 90 grados) en una dirección perpendicular a la superficie, después de la remoción, se evalúa visualmente el grado de adhesión y se clasifica según una escala predefinida que indica el nivel de adhesión y los posibles daños en el recubrimiento

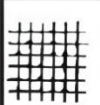
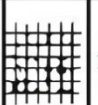


(Anchaluisa Parra, 2018). La clasificación de adhesión varía desde 5B (sin pérdida de adhesión) hasta 0 (pérdida completa de adhesión en áreas grandes), la evaluación visual se realiza mediante la inspección de la muestra para detectar cualquier remoción de recubrimiento, descamación, fracturas u otros daños (Kovac, Lukacs, & Rovensky, 2018). Esta prueba es ampliamente utilizada en la industria para evaluar la calidad y adherencia de los recubrimientos en una amplia variedad de materiales y aplicaciones (Fumero-Pérez, Figueroa-Hernández, González, Tourón Alonso, & Fernández Abreú, 2021). Proporciona información importante sobre la capacidad del recubrimiento para adherirse y resistir fuerzas de pelado, lo que es fundamental para garantizar la durabilidad y el rendimiento adecuado del recubrimiento en diversos entornos y condiciones (Magdaleno-López C. & B., 2020).



*Figura 4. Escala de medición de adherencia (Cai, 2020).*

### **7.3 Prueba de dureza mediante lápiz, norma ASTM D3363**

La norma ASTM D3363 describe el método de prueba estándar para determinar la dureza de un recubrimiento mediante el uso de lápices de grafito (Walker, 1985). Esta prueba proporciona una medida relativa de la resistencia del recubrimiento a la deformación y al rayado, el procedimiento de la prueba consiste en utilizar una serie de lápices de grafito de diferentes durezas, que van desde 6B (más suave) hasta 9H (más duro) (Wai, 2013) como se muestra en la Figura 5. Cada lápiz se utiliza para intentar rayar el recubrimiento en un ángulo y con una presión especificados (Kim, Sung, Seo, Hwang, & Kim, 2016). Para llevar a cabo la prueba, se selecciona el lápiz más suave y se intenta rayar el recubrimiento aplicando una fuerza constante. Si el lápiz no logra rayar el recubrimiento, se pasa al siguiente lápiz más duro y se repite el proceso. Se continúa probando con lápices de dureza creciente hasta que se encuentra el lápiz que logra rayar el recubrimiento (García, 2021). La dureza del recubrimiento se determina por el lápiz de menor dureza que produce un rayado visible en el material (Kim, Sung, Seo, Hwang, & Kim, 2016). La prueba se repite en diferentes áreas del recubrimiento para obtener una evaluación precisa de su resistencia al rayado (Simmons, 2000). La norma ASTM D3363 es ampliamente utilizada en la industria de los recubrimientos para evaluar la dureza de diferentes materiales como pinturas, lacas, esmaltes y otros recubrimientos aplicados en superficies metálicas, plásticas o de madera, proporciona una indicación relativa de la resistencia al rayado de los recubrimientos y ayuda a seleccionar el tipo adecuado de recubrimiento para diferentes aplicaciones en función de los requisitos de dureza y resistencia (Alva & Emma, 2017).

Surface of cross-cut area from which flaking has occurred. (Example for 6 parallel cuts)	None					Greater than 65%
<b>Classification</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

*Figura 5. Escala de medición de dureza (Lee, 2020).*

A continuación, se describe de manera general la metodología empleada para la obtención de dos tipos de alúmina:  $\alpha$ -alúmina y  $\gamma$ -alúmina.

**1. Selección de latas de aluminio:**

Se seleccionaron específicamente latas de aluminio de la marca Coca-Cola para la extracción de alúmina, debido a que contienen el componente deseado. Otras latas de distintas marcas incluyen elementos no útiles para este proceso.

**2. Recolección de latas de aluminio:**

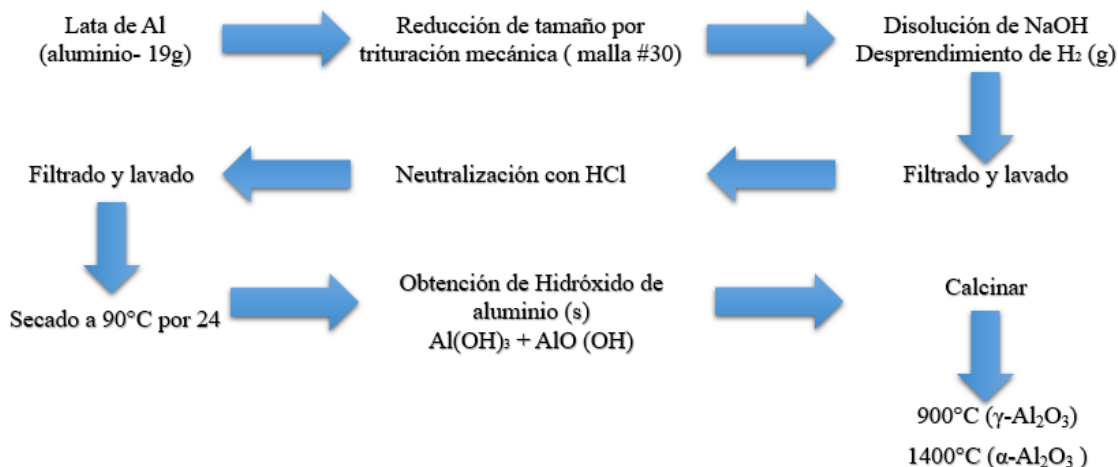
Se recolectaron seis latas de Al de la marca Coca-Cola para ser utilizadas en el proceso de extracción de alúmina.

**3. Preparación de la chatarra de aluminio:**

Las latas recolectadas se lijaron con abrasivo #1500, a fin de separar y eliminar cualquier material no deseado o impureza. Posteriormente se realizó un proceso de trituration mediante un molino, obteniendo 19 g de chatarra de Al, que sirvieron como materia prima para el proceso de extracción.

**4. Obtención de  $\alpha$ -alúmina y  $\gamma$ -alúmina:**

La Figura 6 detalla los procesos llevados a cabo para la obtención de ambos tipos de alúmina a partir de la chatarra de aluminio. Dichos procesos incluyen etapas como la trituration, el lavado, la calcinación, entre otras, que permiten la producción de  $\alpha$ -alúmina y  $\gamma$ -alúmina.



**Figura 6.** Proceso de obtención de alúmina ( $\gamma - Al_2O_3$ ) y alúmina ( $\alpha - Al_2O_3$ ).

A continuación, se detallan dichos procedimientos llevados a cabo:

### 1. Preparación del material

- Se lijaron 6 latas de Coca-Cola con abrasivo #1500 con el objetivo de eliminar el recubrimiento y cualquier impureza o contaminante que pudiera afectar los resultados esperados (Figura 6a).

### 2. Análisis de composición química

- Se realizó un análisis de la composición química elemental del polvo de aluminio obtenido, mediante fluorescencia de rayos X (FRX).
- Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 6, expresados en fracción en masa.

### 3. Preparación de la solución alcalina

- Se pesaron 14.82 g de hidróxido de sodio (NaOH) y se disolvieron en 250 ml de agua destilada para formar una solución (Figura 6c).
- Se añadió el polvo de aluminio gradualmente, manteniendo la solución en agitación constante durante 24 horas, asegurando su completa disolución (Figura 6d).

### 4. Filtración y neutralización

- Una vez disuelto el aluminio, se utilizó papel filtro para separar las impurezas.
- La solución filtrada se neutralizó con HCl, formando una solución blanca y gelatinosa con un pH de 7 (Figura 6e).
- Se eliminaron las sales mediante lavado con agua desionizada (7 ppm) y la solución se dejó en reposo durante 24 horas para medir la concentración de partes por millón (ppm) con un TDS.

- La solución blanca y gelatinosa obtenida correspondía a ( $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>), el cual fue secado en horno a 60°C durante 6 horas (Figura 6f).

### 5. Trituración y análisis químico

- Tras el secado, la ( $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>) se trituró con un mortero hasta obtener un polvo fino.
- Se realizó un nuevo análisis por FRX, con secado de las muestras a 110°C durante dos horas.
- Se pesaron 0.8 g del polvo seco y se mezclaron con 7.8 g de borato de litio (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), realizando una fusión para obtener una perla.

### 6. Resultados del análisis químico

- El análisis por FRX mostró que los polvos obtenidos contenían mayoritariamente aluminio, con una pérdida por calcinación del 21.1% en masa, un valor similar al reportado por Zhang.
- Se detectaron impurezas, incluyendo 1.58% en masa de (SiO<sub>2</sub>) y (Na<sub>2</sub>O), además de trazas de Mg, Ca, Cl, P y S (Ibarra-Cruz, Legorreta-García, Juárez-Tapia, Cobos-Murcia, & Rosario-Olguin, 2024).

### 7. Calcinación y obtención de alúmina

- La bohemita obtenida se sometió a un proceso de calcinación en dos etapas:
  - Primera etapa: 900°C durante 6 horas → Obtención de  $\gamma$ -alúmina.
  - Segunda etapa: 1400°C durante 9 horas → Obtención de  $\alpha$ -alúmina (Figura 5).
  - Este proceso permitió la transformación del hidróxido de aluminio en óxido de aluminio evaluando su pureza y composición para su posible aplicación en recubrimientos reflectantes para sistemas solares.



*Figura 7. Imágenes de la metodología para la obtención de dos tipos de alúmina.*

### **Caracterización**

El polvo de aluminio y la bohemita ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ ) obtenidos se analizó mediante fluorescencia de Rayos X (FRX), para determinar la composición química de los elementos mayoritarios presente en las muestras. La  $\gamma$ -alúmina,  $\alpha$ -alúmina e ( $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ ), se caracterizaron utilizando microscopia electrónica de barrido/espectrometría de dispersión de energía de rayos X (MEB/EDS) con un microscopio electrónico de presión variable Jeol Modelo IT 300 para analizar topografía y morfología. Además, se realizó caracterización por UV-VIS para medir su reflectancia relativa difusa de ambas alúminas y difracción de rayos X (DRX) para verificar las fases existentes con un difractómetro marca INEL modelo Equinox 2000, voltaje de 30Kv, fuente de irradiación de Cobalto ( $\lambda=1.789010 \text{ \AA}$ ) con un detector curvo.

### **Síntesis del recubrimiento reflectante**

Finalmente se realizó la síntesis por sol-gel y se aplicó en forma de recubrimiento por aspersion, sobre un sustrato de acero de bajo carbono SAE 1008 esmaltado. Para posteriormente medir la Reflectancia Relativa Difusa por UV-VIS, DRX y dos propiedades mecánicas:

- 1). Dureza ASTM D3363
- 2). Adherencia ASTM D3359

## **8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **8.2. Análisis cristalográfico y químico elemental del Al pulverizado.**

Se detectaron los planos cristalográficos característicos (111), (200) y (220), que concuerdan con PDF 96-431-3211, confirmando que la aleación posee altos contenidos de aluminio metálico, lo cual coincide con lo reportado por (Ibarra-Cruz, Legorreta-García, Juárez-Tapia, Cobos-Murcia, & Rosario-Olguin, 2024).

La composición elemental de la aleación Al se presenta en (Ibarra-Cruz, Legorreta-García, Juárez-Tapia, Cobos-Murcia, & Rosario-Olguin, 2024), expresada en porcentaje en masa, exhibiendo una diversidad de metales encontrados, con valores típicos para este tipo de aleaciones según (Davis J. , 1993). Resalta la presencia de Al en la muestra, representando el 95.89% en masa, en concordancia con los resultados derivados del análisis cristalográfico. Además, se detecta la existencia de magnesio (Mg) y manganeso (Mn) en aproximadamente el 1% en masa, junto con la presencia de silicio (Si) y hierro (Fe) con valores cercanos al 0.5% en masa.

En este sentido el proceso de lavado y purificación es fundamental para eliminar impurezas formadas durante la síntesis de debido a la reacción del resto de elementos presentes en la aleación y así lograr una alúmina de mayor pureza. Esto puede ser clave para obtener las propiedades deseadas en aplicaciones específicas, permitiendo ajustar la composición para alcanzar los niveles óptimos de reflectancia, adherencia y dureza en los materiales finales.

El  $\text{Al(OH)}_3/\text{SiO}_2$  fue analizado mediante FRX para determinar su composición química. En su masa, se evidenció una pérdida por calcinación del 21.1%, mientras que se detectaron impurezas de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ , representando un 1.58% en masa. Durante la filtración en estado sólido, los demás componentes se manifestaron en forma de óxidos o hidróxidos metálicos. Por otro lado, la composición química del material analizado es la siguiente:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (74.40%),  $\text{SiO}_2$  (1.58%),  $\text{MgO}$  (0.25%),  $\text{CaO}$  (0.55%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.06%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.02%),  $\text{Cl}$  (0.68%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.01%),  $\text{SO}_3$  (0.33%). La suma de estos componentes, junto con la pérdida por calcinación (PXC) del 21.1%, alcanza el 100.00% (Ibarra-Cruz, Legorreta-García, Juárez-Tapia, Cobos-Murcia, & Rosario-Olguin, 2024).

### 8.3 Análisis cristalográfico de $\text{Al(OH)}_3/\text{SiO}_2$ , alúmina $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y alúmina $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

El difractograma de  $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$  se muestra en la Figura 8 inciso a). Las fases identificadas corresponden a la estructura cristalina ortorrómbica de bohemita (ficha PDF 01-083-2384). El ancho y la altura de los picos indican un tamaño de cristal muy pequeño, lo que podría sugerir la presencia de una superficie específica elevada según (Castruita, Perera-Mercado, & Saucedo-Salazar, 2013) (Johnston, Wang, & Hem, 2002).

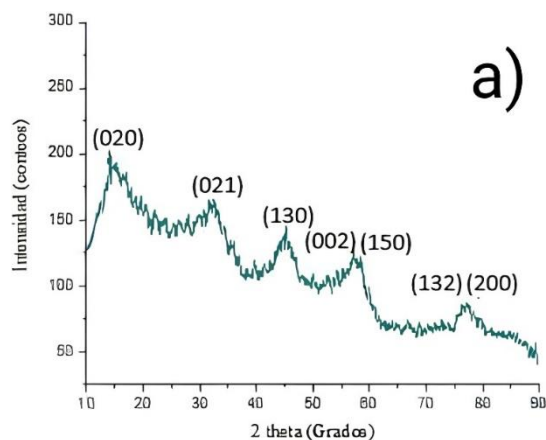


Figura 8. Identificación de las fases del  $(\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2)$ .

b)  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ . Las fases identificadas corresponden a la estructura cristalina cubica y parámetros de celda  $a = 7.9056 \text{ \AA}$ , (ficha PDF 01-080-0955). El ancho y la altura de los picos indica un tamaño de cristal pequeño, por lo tanto, también podría poseer una alta área superficial según (Wen, Chen, Yen, & Huang, 1999).

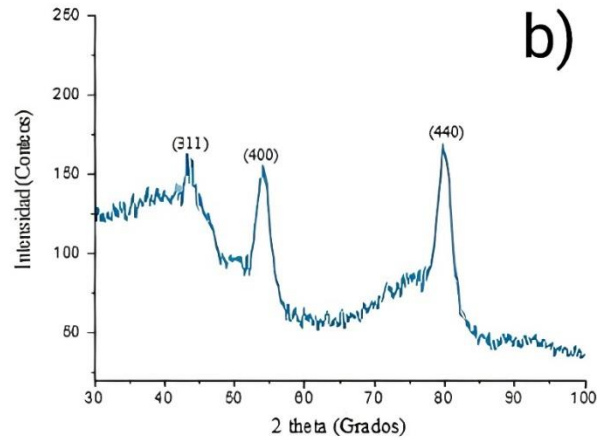


Figura 9. Identificación de las fases de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  calcinado a  $900^\circ$ .

c) En el análisis del polvo  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  se pueden distinguir dos fases distintas. La primera corresponde a óxido de aluminio ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ), la cual exhibe una estructura romboédrica con los picos característicos (012) (104) (110) (113) (024) (116) y parámetros de celda  $a = 4.754 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.99 \text{ \AA}$  (ficha PDF 01-071-1683). El ancho y la altura de los picos indica un tamaño de cristal grande según (Wen H. L., 2000) (Jellinek & Fankuchen, 1945). Por otro lado, la segunda fase corresponde al óxido de aluminio y silicio  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , con (ficha PDF 01-088-0890). Esta última fase cristalina se formó al calcar los polvos a  $1400^\circ\text{C}$ .

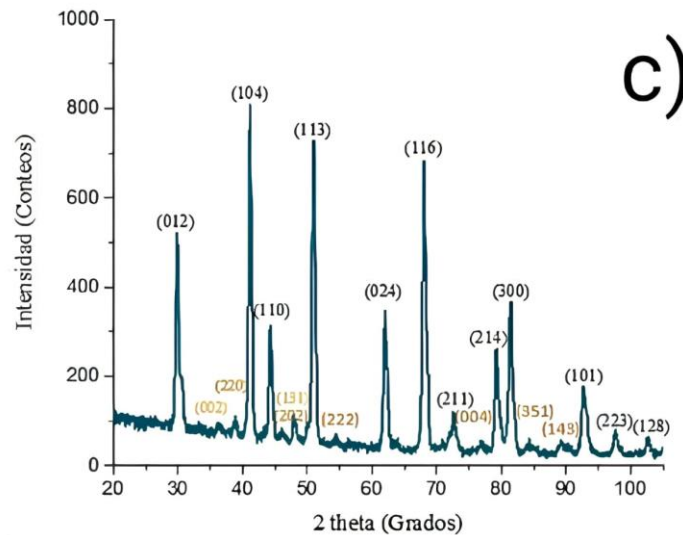


Figura 10.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  calcinado a  $1400^\circ$ . Los índices de Miller color naranja corresponden al óxido de aluminio y silicio  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ .

#### 8.4 Estudio de microscopía electrónica de barrido de los compuestos obtenidos

El polvo de  $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$  obtenido fue analizado por microscopía electrónica de barrido se muestra en la Figura 9 a). Se observan aglomerados de partículas amorfas con formas poligonales y algunas a circulares, que presentan un tamaño de entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ . Estas partículas exhiben una superficie rugosa y están formadas por diferentes tamaños debido a su estructura cristalina.

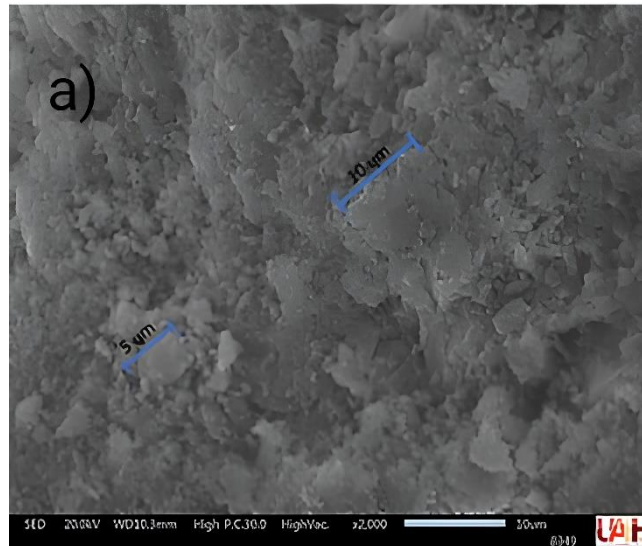


Figura 11. a) Micrografía de  $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})/\text{SiO}_2$ .

b) La alúmina  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  fue analizada mediante MEB. Con una magnificación de x2000, como se muestra en el inciso b). En la micrografía, se pueden observar aglomerados de partículas amorfas la mayoría de forma poligonal los más grandes con un tamaño de 8 y 10  $\mu\text{m}$ , algunas de las cuales presentan una superficie lisa y varían en tamaño.

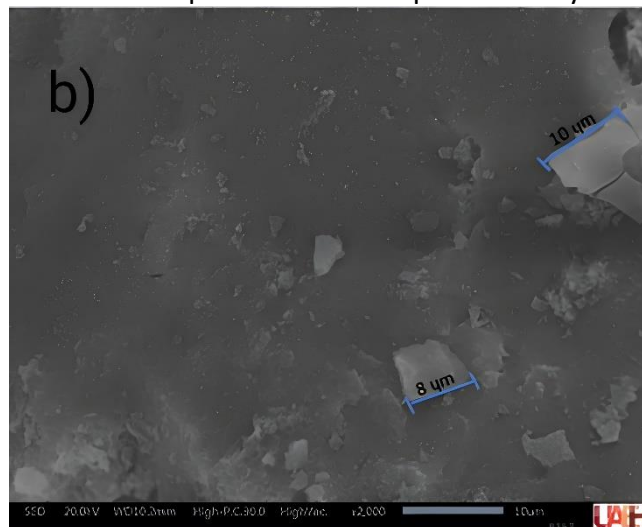


Figura 12. b) Micrografía de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

c) En la alúmina  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  obtenida fue analizada mediante MEB con una magnificación de x2000, como se muestra en c). En la micrografía, se pueden observar grupos de partículas

de tamaño micrométrico con formas de placas más definidas algunas alargadas rectangulares y otras con forma poligonales, la mayoría presentan una superficie lisa y varían en tamaño, las más grandes presentan un tamaño de 8 y 10  $\mu\text{m}$ .

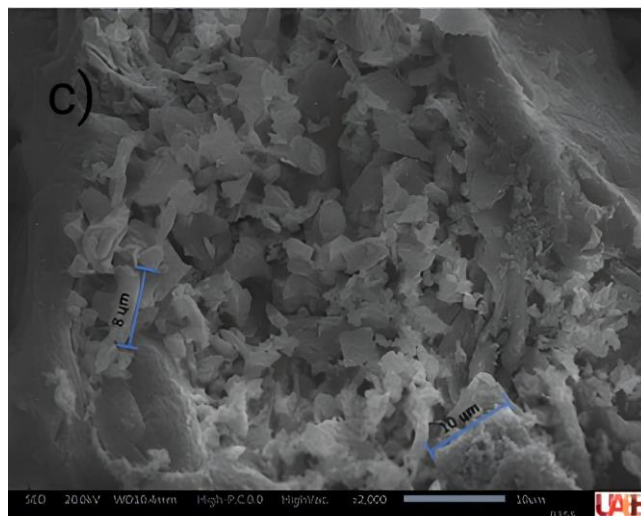


Figura 13. c) Micrografía de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ .

### 8.5 Análisis de la espectroscopia de reflectancia difusa relativa (pd)

En el siguiente apartado se analizó la reflectancia difusa de cada uno de los tres compuestos: bohemita ( $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$ ), alúmina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), y alúmina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ).

#### 8.5.1 Análisis de reflectancia relativa (pd) de ( $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$ ), $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en polvo

El ( $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$ ),  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  y  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  se analizaron para obtener su (pd). Los resultados se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Reflectancia difusa relativa de ( $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$ ),  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Muestra del polvo	pd (%)
$\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$	101.37
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	102.68
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	104.22

Con base en los datos presentados en la Tabla 6, el compuesto que muestra la mayor reflectancia difusa relativa (pd) es la  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , con un valor de 104.22 %, seguido por la  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (102.68 %) y finalmente  $\gamma\text{-AlO(OH)/SiO}_2$  (101.37 %). Esto indica que, entre los tres materiales, la  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  es el más eficiente para reflejar la luz de manera difusa. Su mayor pd puede atribuirse a su estructura cristalina más ordenada y estable, que favorece una mejor

dispersión de la luz incidente, haciéndola ideal para aplicaciones en recubrimientos reflectores solares donde se requiere alta eficiencia óptica.

### 8.5.2 *Análisis del recubrimiento utilizando $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>, $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

Según los resultados presentados en la Tabla 7, el recubrimiento elaborado con  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestra el valor más alto de reflectancia difusa relativa (pd), alcanzando un 87.00 %, lo que lo posiciona por encima de los recubrimientos a base de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (85.08 %) y  $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub> (84.75 %). Este comportamiento sugiere que, una vez aplicado sobre el sustrato, el recubrimiento con  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el que mejor dispersa la luz de manera difusa, característica esencial para aplicaciones en sistemas solares. Este rendimiento superior se debe, en gran parte, a su estructura cristalina bien definida, que proporciona una superficie más regular, promoviendo una mayor eficiencia en la reflexión de la luz. Además, su resistencia térmica y química refuerzan su idoneidad en entornos de operación exigentes. En consecuencia,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se destaca como la opción más favorable para utilizarse como reflector difuso de refuerzo, gracias a su alto desempeño óptico, junto con propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas para su aplicación en tecnologías solares.

*Tabla 7. Reflectancia difusa relativa de los recubrimientos.*

Muestra del recubrimiento	pd (%)
$\gamma$ -AlO(OH)/SiO <sub>2</sub>	84.75
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85.08
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	87.00

### 8.5.3 *Análisis del recubrimiento mediante la medición de la reflectancia relativa utilizando Al(OH)<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>*

En la Tabla 7 y 8 se muestran los resultados de pd (%) de los recubrimientos obtenidos utilizando Al(OH)<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> y  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>.

El recubrimiento con  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> presenta una reflectancia relativa mayor en comparación que las obtenidas con los otros compuestos. Esto se debe a su estructura cristalina ordenada y su superficie uniforme del  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>.

### 8.6 *Análisis de dureza*

La Tabla 7 presenta los valores de dureza de los recubrimientos evaluados. El recubrimiento a base de  $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub> registró una dureza de 4H, mientras que los recubrimientos con  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alcanzaron una dureza de 5H, lo que indica una mayor resistencia mecánica a la penetración o al rayado. Esta diferencia puede estar relacionada con la mayor porosidad del recubrimiento de  $\gamma$ -AlO(OH)/SiO<sub>2</sub>, lo que lo hace más vulnerable a daños mecánicos. En contraste, las alúminas ( $\gamma$  y  $\alpha$ ) poseen estructuras cristalinas más densas y

estables, que proporcionan una mejor cohesión del material y, por tanto, una mayor dureza superficial.

**Tabla 8.** Dureza del recubrimiento de  $Al(OH)_3$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ ,  $\alpha-Al_2O_3$

Muestra del recubrimiento	Dureza
$\gamma-AlO(OH)/SiO_2$	4H
$\gamma-Al_2O_3$	5H
$\alpha-Al_2O_3$	5H

### 8.7 Análisis de adherencia

La Tabla 8 presenta los resultados de adherencia obtenidos para los recubrimientos elaborados con  $\gamma-AlO(OH)/SiO_2$ ,  $\gamma-Al_2O_3$  y  $\alpha-Al_2O_3$ , todos los cuales alcanzaron un valor de 5B, el nivel más alto en la escala de adherencia. Este resultado sugiere que ninguno de los recubrimientos sufrió desprendimiento visible durante la prueba de corte enrejado, lo cual demuestra una excelente adherencia entre el recubrimiento y el sustrato. Este desempeño sobresaliente se puede atribuir a la técnica de aplicación por aspersión, que favorece una distribución uniforme del material, un anclaje mecánico adecuado y una interacción sólida con la superficie esmaltada del sustrato, independientemente del tipo de alúmina utilizada.

**Tabla 9.** Adherencia del recubrimiento utilizando  $\gamma-AlO(OH)/SiO_2$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ ,  $\alpha-Al_2O_3$

Muestra	Adherencia
$\gamma-AlO(OH)/SiO_2$	5B
$\gamma-Al_2O_3$	5B
$\alpha-Al_2O_3$	5B

## 9. Conclusiones

En esta investigación se demostró la viabilidad de sintetizar recubrimientos utilizando  $\gamma-AlO(OH)/SiO_2$  y alúmina en sus formas  $\alpha$  y  $\gamma$ , a partir de chatarra de aluminio como materia prima. Los materiales obtenidos presentaron propiedades ópticas y mecánicas adecuadas para aplicaciones solares, lo que valida el proceso como una opción efectiva para la producción de reflectores difusos de refuerzo. Estos reflectores tienen el potencial de mejorar la captación de energía solar en sistemas de concentración, una de las principales aplicaciones en el campo de la energía solar.

Uno de los resultados más relevantes fue el análisis de la reflectancia difusa relativa (pd) de los materiales sintetizados. El recubrimiento con  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  presentó la mayor reflectancia relativa (87%), lo cual se atribuye a su estructura cristalina altamente ordenada y su superficie uniforme, lo que facilita una dispersión óptima de la luz. Este desempeño superó al de los recubrimientos con  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (85.08%) y  $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{SiO}_2$  (84.75%), destacando la eficiencia óptica de la  $\alpha$ -alúmina. Esta alúmina se estabiliza a 900°C, favoreciendo la formación de una fase más densa con mayor capacidad reflectante. En cambio, la  $\gamma$ -alúmina, estabilizada a 1400°C, presenta una estructura cristalina más compleja, que, aunque mantiene una buena reflectancia, tiene diferencias en su comportamiento térmico y mecánico. Desde el punto de vista mecánico, los recubrimientos con alúmina alfa y gamma mostraron valores de dureza de 5H, colocándolos por encima del hidróxido de aluminio (4H). Estas propiedades de dureza son esenciales en aplicaciones donde la resistencia al desgaste y la abrasión son factores determinantes, como en los sistemas solares. La  $\alpha$ -alúmina es conocida por su excelente estabilidad térmica y resistencia mecánica, siendo capaz de soportar temperaturas elevadas, lo que la hace ideal para condiciones extremas. Por su parte, la  $\gamma$ -alúmina, con una estructura más porosa, muestra mayor flexibilidad en su procesamiento, pero mantiene una excelente resistencia y durabilidad.

Adicionalmente, las pruebas de adherencia demostraron un desempeño sobresaliente para todos los recubrimientos, alcanzando un valor de 5B, el más alto en la escala de adherencia. Esto indica que los recubrimientos se mantienen firmemente adheridos al sustrato durante la prueba de corte enrejado, lo que refleja una fuerte unión entre el recubrimiento y la superficie esmaltada. Este excelente comportamiento en adherencia se debe a la técnica de aplicación por aspersion, que asegura una distribución homogénea del material y un anclaje mecánico robusto. El enfoque de esta investigación, basado en la economía circular mediante el uso de chatarra de aluminio, tiene un impacto significativo en la reducción del impacto ambiental asociado con los residuos de este material. Además, ofrece una alternativa sostenible y eficiente para la producción de materiales avanzados, cerrando el ciclo de vida del aluminio y promoviendo prácticas de producción responsables.

Finalmente, los resultados de este estudio subrayan el enorme potencial de la alúmina reciclada en el ámbito de la energía solar, posicionándola como una opción prometedora para el desarrollo de recubrimientos reflectores en sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. Este avance no solo mejora la eficiencia energética de estos sistemas, sino que también abre nuevas oportunidades para el uso de recursos reciclables en la industria de los materiales avanzados, reforzando el compromiso con la sostenibilidad y el desarrollo tecnológico.

## Bibliografía

- Abdin, Z., Alim, M. A., Saidur, R., Islam, M. R., Rashmi, W., Mekhilef, S., & Wadi, A. (2013). Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 837-852. doi:10.1016/j.rser.2013.06.023
- Abella, M. A. (2005). Sistemas fotovoltaicos. . *SAPT Publicaciones Técnicas, SL*.
- Aegerter, M. A., Almeida, R., Soutar, A., Tadanaga, K., Yang, H., & Watanabe, T. (2008). Coatings made by sol-gel and chemical nanotechnology. *Journal of sol-gel science and technology*, 47(2), 203-236. doi:10.1007/s10971-008-1761-9
- Ahmad, L., Khordehghah, N., Malinauskaitė, J., & Jouhara, H. (2020). Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. *Energy (Oxford, England)*, 207(118254), 118254. doi:10.1016/j.energy.2020.118254
- Ajayi, A., Majekodunmi, O. A., & Shittu, A. S. (2013). Comparison of power output from solar PV panels with reflectors and solar tracker. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 3, 70-77. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/234667435.pdf>
- Alcaraz de la Osa, R., Iparragirre, I., Ortiz, D., & Saiz, J. M. (2020). The extended Kubelka-Munk theory and its application to spectroscopy. *ChemTexts*, 6(1). doi:10.1007/s40828-019-0097-0
- Al-Shahri, O. A., Ismail, F. B., Hannan, M. A., Lipu, M. S., Al-Shetwi, A. Q., Begum, R. A., . . . Soujeri, E. (2021). Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of cleaner production*, 284(125465), 125465. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125465
- Alva, T., & Emma, R. (2017). Evaluación de tres sistemas de acabado para pisos en madera de shihuahuaco (*Dipteryx odorata*), capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y quinilla colorada (*Manilkara bidentata*). Retrieved from <http://45.231.83.156/handle/20.500.12996/2692>
- Alvarado, C. J. (2023). La Energía Solar Fotovoltaica Distribuida y las Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids) como Alternativa para Diversificar la Matriz Energética.
- 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), 110517. doi:10.1016/j.rser.2020.110517
- Ammam, M. (2014). Electrochemical and electrophoretic deposition of enzymes: principles, differences and application in miniaturized biosensor and biofuel cell electrodes. *Biosensors & bioelectronics*, 58, 121-131. doi:10.1016/j.bios.2014.02.030
- Anchaluisa Parra, L. M. (2018). Determinación de los parámetros de calidad de tratamientos superficiales de acuerdo con las normas ASTM D 3363, ASTM D 4138, ASTM D 3359 en los estribos y roll bars de vehículos, y los factores que inciden dentro de los procesos productivos de la empresa.

- Anich, I., Bagshaw, T., Margolis, N., & Skillingberg, M. (2016). The Alumina Technology Roadmap. In *Essential Readings in Light Metals* (Vol. 1, pp. 94-99). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-48176-0\_13
- Aparicio Ceja, M. E. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 3(2), 62-72. Retrieved from [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912010000200062&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-56912010000200062&script=sci_arttext)
- Apetz, R., & Bruggen, M. P. (2003). Transparent alumina: A light-scattering model. *Journal of the American Ceramic Society. American Ceramic Society*, 86(3), 480-486. doi:10.1111/j.1151-2916.2003.tb03325.x
- Arias, A. G. (2008). ¿ Qué es la luz? 2(1), 10.
- Armaroli, N. &. (2016). Solar electricity and solar fuels: status and perspectives in the context of the energy transition. *Chemistry—A European Journal*, 22(1), 32-57.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). México: International Thomson Editores.
- Atkinson, C. S. (2015). Coatings for concentrating solar systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 113-122.
- Atkinson, C., Sansom, C. L., Almond, H. J., & Shaw, C. P. (2015). Coatings for concentrating solar systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 113-122. doi:10.1016/j.rser.2015.01.015
- Ávila, J. &. (2013). *Más allá de la herrumbre 1*. Fondo de cultura económica.
- Ávila, J. &. (2013). *Más allá de la herrumbre 1*. . Fondo de cultura económica.
- Baird, C. (2018). *Química ambiental*. Reverté.
- Barnhisel, R., & Bertsch, P. M. (2015). Aluminum. In *Agronomy Monographs* (Vol. 9, pp. 275-300). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. doi:10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c16
- Barry, T. S. (2019). Thermal and mechanical activation in acid leaching processes of non-bauxite ores available for alumina production—a review. In *Mining, Metallurgy & Exploration*, (Vol. 36, pp. 557-569).
- Barry, T. S., Uysal, T., Birinci, M., & Erdemoğlu, M. (2019). Thermal and mechanical activation in acid leaching processes of non-bauxite ores available for alumina production—A review. *Mining, metallurgy & exploration*, 36(3), 557-569. doi:10.1007/s42461-018-0025-7
- Bayer, L. R. (2016). FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE QUÍMICA.

- Ben-Nissan, B. C. (2008). Cerámica de alúmina. In *En Biocerámica y sus aplicaciones clínicas* (pp. 223-242). Publicación Woodhead.
- Bermeo-Paucar, J., Rea-Sánchez, V., López-Bermúdez, R., & Pico-Yépez, M. (2018). EL RECICLAJE LA INDUSTRIA DEL FUTURO EN ECUADOR. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 22(87), 8-8. Retrieved from <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/183>
- Bernstein, J. (2020). *Polymorphism in Molecular Crystals* (2 ed., Vol. 30). Oxford University Press.
- Bertsch, P. M. (1996). Aluminum. In *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (Vol. 5, pp. 517-550).
- Beynon, J. (1988). Interference. In *Work Out Waves and Optics* (Vol. 52, pp. 52-80). London: Macmillan Education UK. doi:10.1007/978-1-349-10165-8\_3
- Bielawny, A. (2019). Reflectors in lighting design: Reflector-based non-imaging optics for lighting applications. *Advanced optical technologies*, 8(6), 469-481. doi:10.1515/aot-2018-0052
- Bighley, L. D. (1966). *DIFFUSE REFLECTANCE STUDIES OF SOLID-SOLID INTERACTIONS*. The University of Iowa.
- Boch, P. &. (2010). *Ceramic materials: Processes, properties, and applications* (Vol. 98). John Wiley & Sons.
- Boch, P. &. (n.d.). *Ceramic materials: Processes, properties, and application* (2010 ed., Vol. 98). John Wiley & Sons.
- Bohren, C. F. (2008). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons.
- bone, A. o. (2012). Wallace, J. M. In *Bone* (Vol. 50, pp. 420-427).
- Born, M. &. (2013). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Elsevier.
- Bosch Reig, F. &. (2015). *Análisis químico instrumental ultravioleta-visible e infrarrojo aplicado al patrimonio cultural. Un enfoque práctico*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Boström, T., Wäckelgård, E., & Westin, G. (2003). Solution-chemical derived nickel–alumina coatings for thermal solar absorbers. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 74(6), 497-503. doi:10.1016/s0038-092x(03)00199-3
- Boxwell, M. (2010). *Solar electricity handbook: A simple, practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems*. Greenstream publishing.
- Bragg, W. L. (1931). The structure of  $\beta$  alumina. In *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials* (Vol. 77, pp. 255-274).
- Bragg, W. L. (1931). The structure of  $\beta$  alumina. In *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials* (Vol. 77, pp. 255-274).
- Bravo Vargas, S. (2016). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior de Cd Sahagún*, 3(5). doi:10.29057/ess.v3i5.1399

- Brinker, C. J. (2013). Dip Coating. In *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films* (pp. 233-261). Vienna: Springer Vienna. doi:10.1007/978-3-211-99311-8\_10
- Brostow, W., & Hagg Lobland, H. E. (2010). Brittleness of materials: implications for composites and a relation to impact strength. *Journal of materials science*, 45, 242-250. doi:10.1007/s10853-009-3926-5
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1-2(100007), 100007. doi:10.1016/j.ijft.2019.100007
- Bruice, P. Y. (2015). *Fundamentos de química orgánica*. Madrid: Pearson Education.
- Bruned, N. M. (2010). INTEGRACIÓN DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA CON UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN EXISTENTE.
- Buendia Martinez, F. (2022). Estimación del tiempo de vida útil de materiales para reflectores solares.
- Bueno, J. M., Sáez-Plaza, P., Ramos-Escudero, F., Jiménez, A. M., Fett, R., & Asuero, A. G. (2012). Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Part II: Chemical structure, color, and intake of anthocyanins. *Critical reviews in analytical chemistry*, 42(2), 126-151. doi:10.1080/10408347.2011.632314
- Bustamante Paredes, K. E. (2013). Estudio de los sistemas de Generación Distribuida (Bachelor's thesis).
- Bustamante Ruiz, J. J. (2020). FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE GENERACION ENERGETICA INDEPENDIENTE BASADOS EN RECURSOS RENOVABLES PARA EL CENTRO EDUCATIVO LICEO RAFAEL NUÑEZ DE BARRANCABERMEJA.
- Cai, J. W. (2020). Investigation on the cohesion and adhesion behavior of high-viscosity asphalt binders by bonding tensile testing apparatus. In *Construction and Building Materials* (Vol. 261, p. 120011). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120011>
- Callister, W. D. (2019). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Reverté.
- Callister, W. D. (2022). *Fundamentals of materials science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Calloway, N. O. (1935). The Friedel-crafts syntheses. *Chemical reviews*, 17(3), 327-392. doi:10.1021/cr60058a002
- Campbell Jr, F. C. (2011). *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Elsevier.
- Cardarelli, F. (2008). Ceramics, refractories, and glasses. In *Materials Handbook* (pp. 593-689). London: Springer London. doi:10.1007/978-1-84628-669-8\_10
- Castellano, R. N. (2010). *Solar panel processing*. . Archives contemporaines.
- Castro Huamán, J. R. (2017). Influencia de la concentración del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el tipo de recubrimiento del absorbedor en la eficiencia de un colector solar plano por termosifón.

- Castruita, G., Perera-Mercado, Y. A., & Saucedo-Salazar, E. M. (2013). Sol-gel aluminum hydroxides and their thermal transformation studies for the production of  $\alpha$ -alumina. *Journal of inorganic and organometallic polymers and materials*, 23(5), 1145-1152. doi:10.1007/s10904-013-9905-y
- Cervera González, I. (2011). Desarrollo y optimización de recubrimientos de superaleaciones con adición de cargas cerámicas y elementos reactivos obtenidos por proyección térmica para aplicaciones de resistencia a oxidación a alta temperatura y al desgaste. Universitat Jaume I.
- Chandradass, J., & Balasubramanian, M. (2006). Sol-gel processing of alumina fibres. *Journal of materials processing technology*, 173(3), 275-280. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.11.030
- Chen, J., & Lu, L. (2020). Development of radiative cooling and its integration with buildings: A comprehensive review. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 212, 125-151. doi:10.1016/j.solener.2020.10.013
- Chen, S. (2024). Advancements in surface treatments for aluminum alloys in sports equipment. *Reviews on advanced materials science*, 63(1). doi:10.1515/rams-2024-0065
- Chen, Y., Zhang, T.-A., Lv, G., Chao, X., & Yang, X. (2022). Extraction and utilization of valuable elements from bauxite and bauxite residue: A review. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 109(1), 228-237. doi:10.1007/s00128-022-03502-w
- Chopra, K. T. (2018). Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications. In *Applied energy* (Vol. 228, pp. 351-389).
- Choudhury, A. K. (2014). *Principles of colour and appearance measurement: Object appearance, colour perception and instrumental measurement*. Elsevier.
- Chow, T. T. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. In *Renewable Energy* (pp. 88-119). Routledge. doi:10.4324/9781315793245-122
- Choy, K. L. (2003). Chemical vapour deposition of coatings. In *Progress in materials science* (Vol. 48, pp. 57-170).
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Pandarus, V., Béland, F., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2013). The sol-gel route to advanced silica-based materials and recent applications. *Chemical reviews*, 113(8), 6592-6620. doi:10.1021/cr300399c
- Cometa, S. B.-B. (2019). Electrochemical strategies for titanium implant polymeric coatings: The why and how. 9(4), 268.
- Correa Arango, J. C. (2015). La alúmina en Colombia año 2014.
- Cruz Carmona, J. (2014). ACTUALIDAD DE MATERIALES PARA LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA.
- Cruz Carmona, J. (2014). Actualidad de materiales para la captación de energía solar térmica y fotovoltaica. .

- Curtis, L. R.-W. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. In *Environment international* (Vol. 32, pp. 815-830.).
- Dávila, J. L. (2011). Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales.
- Davis, J. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM international. Retrieved from Aluminium and aluminum alloys.
- Davis, K. (2010). Material Review: Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *School of Doctoral Studies European Union Journal*(2).
- Dawn, S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K., & Mishra, M. K. (2016). Recent developments of solar energy in India: Perspectives, strategies and future goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 215-235. doi:10.1016/j.rser.2016.04.040
- De Kuyper, J. C. (2018). *Principios y aplicaciones de la energía fotovoltaica y de las baterías*. Ediciones UC.
- de Macho, Y. (1988). *PARA LA METALMECANICA*. Retrieved from Edu.co:  
[https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5131/4474\\_aluminio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5131/4474_aluminio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Deja, M. Z. (2021). Applications of additively manufactured tools in abrasive machining—a literature review. *14*, 1318.
- Dericioglu, A. F., & Kagawa, Y. (2003). Effect of grain boundary microcracking on the light transmittance of sintered transparent MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Journal of the European Ceramic Society*, 23(6), 951-959. doi:10.1016/s0955-2219(02)00205-4
- Diebold, M. P. (2014). The Kubelka–Munk framework and measuring opacity. In *Application of Light Scattering to Coatings* (pp. 59-82). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-12015-7\_3
- Dincer, I. (1998). Energy and environmental impacts: Present and future perspectives. *Energy sources*, 20(4-5), 427-453. doi:10.1080/00908319808970070
- Dincer, I. (2000). Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 157-175. doi:10.1016/s1364-0321(99)00011-8
- Ditchburn, R. W. (2013). *Light*. Courier Corporation.
- Donner, C. &. (2005). Light diffusion in multi-layered translucent materials. In *ACM Transactions on Graphics (ToG)* (Vol. 24, pp. 1032-1039).
- Doremus, R. H. (2008). Alumina. In *Ceramic and Glass Materials* (pp. 1-26). Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-0-387-73362-3\_1
- Dovì, V. G. (2009). Cleaner energy for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 889-895.
- Duarte, C. M. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. CSIC.Consejo superior de investigaciones científicas.

- Džimbeg-Malčić, V. B.-M. (2012). Kubelka-Munk theory in describing optical properties of paper (II). In *Tehnički vjesnik* (Vol. 19, pp. 191-196).
- Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2010). Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(1), 112-129. doi:10.1016/j.rser.2009.07.015
- Ervin Jnr, G. (1952). Structural interpretation of the diaspore–corundum and boehmite– $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transitions. *Acta crystallographica*, *5*(1), 103-108. doi:10.1107/s0365110x52000216
- Espinoza Tapia, J. C. (2016). Introducción y desarrollo de las propiedades ópticas de los materiales.
- Evangelisti, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114*(109318), 109318. doi:10.1016/j.rser.2019.109318
- Farahmandjou, M. &. (2016). Synthesis and characterization of Alumina (Al. Int. J. Bio Inorg. Hybr. Nanomater. *5*, 73-77.
- Fattakhova-Rohlfing, D., Zaleska, A., & Bein, T. (2014). Three-dimensional titanium dioxide nanomaterials. *Chemical reviews*, *114*(19), 9487-9558. doi:10.1021/cr500201c
- Fecha, T. S. (n.d.). *Carrera Ing. Biomédica*. Retrieved 04 24, 25, from Edu.co: <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/fc2e41aa-ae9d-467e-b882-87ca970db5ef/content>
- Festas, A. J., Ramos, A., & Davim, J. P. (2020). Medical devices biomaterials – A review. *Institution of Mechanical*, *234*(1), 218-228. doi:10.1177/1464420719882458
- Figuroa, M. (2010). *Química*. Firms Press.
- Fontal, B. S. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Escuela de la Ingeniería*, *1*, 24.
- Fontal, B. S. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *1*, 24.
- Fontal, B. S. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *1*, 2.
- Fortuin, S. S.-H. (2022). Solar collectors, non-concentrating. In *In Solar Thermal Energy* (pp. 351-371). New York, NY: Springer US.
- Fumero-Pérez, A., Figuroa-Hernández, C., González, J. E., Tourón Alonso, G., & Fernández Abreú, M. E. (2021). Métodos empleados para evaluar la adherencia en sistemas recubrimiento-sustrato. *Ingeniería Mecánica*, *24*(3), 24-32. Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442021000300024&script=sci\\_arttext&lng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442021000300024&script=sci_arttext&lng=pt)
- Gaffney, J. S. (2009). The impacts of combustion emissions on air quality and climate—From coal to biofuels and beyond. In *Atmospheric Environment* (Vol. 43, pp. 23-36).
- Gálvez, J. B. (2001). Diseño de reactores para fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*.

- García Ferré, F., Bertarelli, E., Chiodoni, A., Carnelli, D., Gastaldi, D., Vena, P., . . . Di Fonzo, F. (2013). The mechanical properties of a nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating measured by nanoindentation and Brillouin spectroscopy. *Acta materialia*, 61(7), 2662-2670. doi:10.1016/j.actamat.2013.01.050
- García Mayorga, J. C. (2018). Síntesis de alfa alúmina por medio de técnicas electroquímicas a partir de chatarra de aluminio.
- García, P. M. (2021). *Métodos para la caracterización de la cerámica arqueológica* (Vol. 47). Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC.
- Gautam, A., & Saini, R. P. (2020). A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 207, 937-956. doi:10.1016/j.solener.2020.07.027
- Giraldo, J. (2015). Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. *Appl.*
- Gismero, A. H. (1998). Espectroscopia infrarroja.
- Gomaa, M. R.-D.-S. (2018). Sizing methodology of a multi-mirror solar concentrated hybrid PV/thermal system. In *Energies* (Vol. 11, p. 3276).
- Gómez, R. &. (2006). Espectroscopía infrarroja.
- González, E. G. (2007). Guía básica de conceptos de óptica geométrica. . Departamento de Física aplicada III.
- Gonzalez, M. A., Urbiola, E. A., 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. doi:10.1016/j.egy.2024.08.022
- Good, P., Cooper, T., Querci, M., Wiik, N., Ambrosetti, G., & Steinfeld, A. (2016). Spectral reflectance, transmittance, and angular scattering of materials for solar concentrators. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, 144, 509-522. doi:10.1016/j.solmat.2015.09.057
- Gowrisankaran, G., Reynolds, S. S., & Samano, M. (2016). Intermittency and the value of renewable energy. *The journal of political economy*, 124(4), 1187-1234. doi:10.1086/686733
- Gregor, E. 1., Químico, U., Palabras, e. P., El aluminio, Q. T., & del elemento., P. e. (n.d.). *¿Cómo se descubrió el TITANIO?* Retrieved from Edu.ar: [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149986/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149986/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Gutiérrez García, F. J. (2018). Modelo de ciudad autoabastecida energéticamente basado en una producción energética libre de emisiones: caso de estudio en España.

- Gutiérrez-Vázquez, J. A., & Oñoro, J. (2008). Aluminium foams. Manufacture, properties and applications. *Revista de metalurgia*, 44(5), 457-476. doi:10.3989/revmetalm.0751
- Hansen, J. C. (2007). Effect of surface nanoscale topography on elastic modulus of individual osteoblastic cells as determined by atomic force microscopy. In *Journal of Biomechanics* (Vol. 40, pp. 2865-2871).
- Hass, G., Schroeder, H. H., & Turner, A. F. (1956). Mirror coatings for low visible and high infrared reflectance. *JOSA*, 46(1), 31-35. doi:10.1364/JOSA.46.000031
- Hench, L. L., & West, J. K. (1990). The sol-gel process. *Chemical reviews*, 90(1), 33-72. doi:10.1021/cr00099a003
- Henriksen, E. K., Angell, C., Vistnes, A. I., & Bungum, B. (2018). What is light?: Students' reflections on the wave-particle duality of light and the nature of physics. *Science & education*, 27(1-2), 81-111. doi:10.1007/s11191-018-9963-1
- Herez, A. E. (2020). Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. In *Solar Energy* (Vol. 207, pp. 1321-1347).
- Herez, A., El Hage, H., Lemenand, T., Ramadan, M., & Khaled, M. (2020). Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 207, 1321-1347. doi:10.1016/j.solener.2020.07.062
- Hottel, H. C. (1942). The performance of flat-plate solar-heat collectors. In *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* (Vol. 64, pp. 91-103).
- Hottel, H. C., Sarofim, A. F., Dalzell, W. H., & Vasalos, I. A. (1971). Optical properties of coatings. Effect of pigment concentration. *AIAA journal*, 9(10), 1895-1898. doi:10.2514/3.49999
- Hsu, P. H. (2018). Aluminum Hydroxides and Oxyhydroxides. In *SSSA Book Series* (pp. 331-378). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. doi:10.2136/sssabookser1.2ed.c7
- Hu, E. Y. (2010). Solar thermal aided power generation. In *Applied Energy* (Vol. 87, pp. 2881-2885).
- Hunter, R. S. (1987). *The measurement of appearance*. . John Wiley & Sons.
- Ibarra-Cruz, L. E., Legorreta-García, F., Juárez-Tapia, J. C., Cobos-Murcia, J. Á., & Rosario-Olguin, Y. (2024). Bohemita de tamaño micrométrico obtenida a partir de desechos urbanos. *PÄDI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*, 11(22), 138-143. doi:10.29057/icbi.v11i22.11026
- Imenes, A. G., & Mills, D. R. (2004). Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, 84(1-4), 19-69. doi:10.1016/j.solmat.2004.01.038
- Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Ishimaru, A. (2017). *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering: from fundamentals to applications*. John Wiley & Sons.

- Jackson, M. J., & Toward, M. J. (2021). Grinding and abrasive machining of composite materials. In *Advances in Machining of Composite Materials* (pp. 459-483). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-71438-3\_17
- Jamar, A., Majid, Z. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. *International communications in heat and mass transfer*, 76, 178-187. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028
- Jellinek, M. H., & Fankuchen, I. (1945). X-ray diffraction examination of gamma alumina. *Industrial & Engineering Chemistry*, 37(2), 158-163. doi:10.1021/ie50422a012
- Johnson, R., Biswas, P., Ramavath, P., Kumar, R. S., & Padmanabham, G. (2012). Transparent polycrystalline ceramics: An overview. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 71(2), 73-85. doi:10.1080/0371750x.2012.716230
- Johnston, C. T., Wang, S.-L., & Hem, S. L. (2002). Measuring the surface area of aluminum hydroxide adjuvant. *Journal of pharmaceutical sciences*, 91(7), 1702-1706. doi:10.1002/jps.10166
- Jordà Linares, M. (2011). Aplicación de la teoría de Kubelka-Munk en la optimización de la estampación pigmentaria.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295. doi:10.1016/j.pecs.2004.02.001
- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier.
- Kalpajian, S. &. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson educación.
- Kammer, C. (2018). *Aluminum and aluminum alloys*. Springer International Publishing.
- Kaur, K. &. (2023). Refraction of Light. In *StatPearls [Internet]*.
- Kaur, K., & Gurnani, B. (2025). Refraction of light. In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK594230/>
- Kennedy, C. E. (2005). Optical durability of candidate solar reflectors. In *J. Sol. Energy Eng* (Vol. 127, pp. 262-269).
- Khan Academy*. (n.d.). Retrieved from Khanacademy.org: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry-beta/x2eef969c74e0d802:intermolecular-forces-and-properties/x2eef969c74e0d802:spectroscopy-and-the-electromagnetic-spectrum/e/spectroscopy-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Kim, J. U., Lee, S., Kang, S. J., & Kim, T.-I. (2018). Materials and design of nanostructured broadband light absorbers for advanced light-to-heat conversion. *Nanoscale*, 10(46), 21555-21574. doi:10.1039/c8nr06024j
- Kim, Y. S. (2016). Measurement of hardness and friction properties of pencil leads for quantification of pencil hardness test. In *Advances in Applied Ceramics* (Vol. 115, pp. 443-448).

- Kim, Y., Sung, A., Seo, Y., Hwang, S., & Kim, H. (2016). Measurement of hardness and friction properties of pencil leads for quantification of pencil hardness test. *Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics*, 115(8), 443-448. doi:10.1080/17436753.2016.1186364
- Kocjan, A., Dakskobler, A., & Kosmač, T. (2012). Evolution of aluminum hydroxides in diluted aqueous aluminum nitride powder suspensions. *Crystal growth & design*, 12(3), 1299-1307. doi:10.1021/cg201349s
- Koehn, P. K. (2012). A study on the effects of iron on microstructure and mechanical properties of Aluminium-Silicon alloys. Retrieved from <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/9679>
- Kohl, M. (2004). *Performance and durability assessment: Optical materials for solar thermal systems* (2004 ed.). Elsevier.
- Komlóssy, G., van Deursen, C., & Raahauge, B. E. (2022). Bauxite: Geology, mineralogy, resources, reserves and beneficiation. In *Smelter Grade Alumina from Bauxite* (Vol. 2, pp. 19-132). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-88586-1\_2
- Kortüm, G. (2012). *Reflectance spectroscopy: principles, methods, applications*. Springer Science & Business Media.
- Kouro, S., Leon, J. I., Vinnikov, D., & Franquelo, L. G. (2015). Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology. *IEEE industrial electronics magazine*, 9(1), 47-61. doi:10.1109/mie.2014.2376976
- Kovac, O., Lukacs, P., & Rovensky, T. (2018, May). Software evaluation of Cross-Cut adhesion testing. *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (pp. 1-5). IEEE. doi:10.1109/isse.2018.8443664
- Krames, M., Shchekin, O., Mueller-Mach, R., Mueller, G., Zhou, L., Harbers, G., & Craford, M. (2007). Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting. *Journal of Display Technology*, 3(2), 160-175. doi:10.1109/JDT.2007.895339
- Kruisselbrink, T., Dangol, R., & Rosemann, A. (2018). Photometric measurements of lighting quality: An overview. *Building and environment*, 138, 42-52. doi:10.1016/j.buildenv.2018.04.028
- Kumar Verma, S., Kumar, R., Barthwal, M., & Rakshit, D. (2022). A review on futuristic aspects of hybrid photo-voltaic thermal systems (PV/T) in solar energy utilization: Engineering and Technological approaches. *Sustainable energy technologies and assessments*, 53(102463), 102463. doi:10.1016/j.seta.2022.102463
- Kumar, A., Dixit, U., Singh, K., Prakash Gupta, S., & S. Jamal Beg, M. (2021). Structure and properties of dyes and pigments. In R. Papadakis (Ed.), *Dyes and Pigments - Novel Applications and Waste Treatment*. Londres, Inglaterra: IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.97104

- Lam, R. H., & Chen, W. (2019). *Biomedical devices: Materials, design, and manufacturing*. Cham, Suiza: Springer Nature. doi:10.1007/978-3-030-24237-4
- Lambert, J. B. (2019). *Nuclear magnetic resonance spectroscopy: an introduction to principles, applications, and experimental methods*. John Wiley & Sons.
- Lamouri, S. H. (2017). Control of the  $\gamma$ -alumina to  $\alpha$ -alumina phase transformation for an optimized alumina densification. *Boletín de la Sociedad Española de cerámica y vidrio*, 56(2), 47-54. doi:10.1016/j.bsecv.2016.10.001
- Lane, J. (2020). *Aluminium in building*. Londres, Inglaterra: Routledge. doi:10.4324/9780429463372
- Lee, J.-A. L.-R.-C.-W. (2020). Dramatically enhanced mechanical properties of diamond-like carbon films on polymer substrate for flexible display devices via argon plasma pretreatment. In *Chemical Physics* (Vol. 529, p. 110551).
- León, J. R. (2021). *ALUMINUM ALUMINIUM ALUMINIO: La transformación de alúmina en aluminio*. Aula Magna Proyecto clave McGraw Hill.
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 84(9), 1745-1759. doi:10.1016/j.solener.2010.04.017
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments—Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, 89(4), 319-349. doi:10.1016/j.solmat.2004.11.012
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, 89(4), 351-389. doi:10.1016/j.solmat.2004.11.013
- Levinson, R., Berdahl, P., & Akbari, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. *Solar energy materials and solar cells: an international journal devoted to photovoltaic, photothermal, and photochemical solar energy conversion*, 89(4), 351-389. doi:10.1016/j.solmat.2004.11.013
- Lewtas, J. (2007). Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. *Mutation research*, 636(1-3), 95-133. doi:10.1016/j.mrrev.2007.08.003
- Li, G., Xuan, Q., Akram, M. W., Golizadeh Akhlaghi, Y., Liu, H., & Shittu, S. (2020). Building integrated solar concentrating systems: A review. *Applied energy*, 260(114288), 114288. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114288

- Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy conversion and management*, 199(112027), 112027. doi:10.1016/j.enconman.2019.112027
- Liu, J. (2006). High-resolution scanning electron microscopy. In *Handbook of Microscopy for Nanotechnology* (Vol. 47, pp. 325-359). Boston: Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/1-4020-8006-9\_11
- Lojano Chacha, D. I. (2013). Análisis técnico-económico para la generación de energía solar fotovoltaica en el Ecuador y su conexión a la red pública, basada en el artículo 63 de la regulación No. *CONELEC-004/11*.
- Lüders, K., & Pohl, R. O. (2018). Diffraction. In *Pohl's Introduction to Physics* (Vol. 2, pp. 413-442). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-50269-4\_21
- Luisa, R. C. (2012). *Diseño y síntesis de materiales "a medida" mediante el método SOL-GEL*. UNED.
- Luttrell, W. E. (2015). Aluminum sulfate. *Journal of chemical health and safety*, 22(6), 33-35. doi:10.1016/j.jchas.2015.10.012
- Ma, Y., Preveniou, A., Kladis, A., & Pettersen, J. B. (2022). Circular economy and life cycle assessment of alumina production: Simulation-based comparison of Pedersen and Bayer processes. *Journal of cleaner production*, 366(132807), 132807. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132807
- MAGDALENA, G. F. (2016). APUNTES PARA ESPECTROMETRÍA DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA VISIBLE (UV/VIS) MATERIAL DE APOYO PARA ASIGNATURA "TEMAS SELECTOS DE QUÍMICA (ANALITICA)".
- Magdaleno-López, C. &.-B. (2020). Quantitative evaluation for the ASTM D4541-17/D7234 and ASTM D3359 adhesion norms with digital optical microscopy for surface modifications with flame and APPJ. In *International Journal of Adhesion and Adhesives* (Vol. 98, p. 102551).
- Magdaleno-López, C. &.-B. (2020). Quantitative evaluation for the ASTM D4541-17/D7234 and ASTM D3359 adhesion norms with digital optical microscopy for surface modifications with flame and APPJ. In *International Journal of Adhesion and Adhesives* (Vol. 98, p. 102551).
- Mahmoud, M. R. (2020). *A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications*. *Energy Conversion and Management* (Vol. 210).
- Maile, F. J., Pfaff, G., & Reynders, P. (2005). Effect pigments—past, present and future. *Progress in organic coatings*, 54(3), 150-163. doi:10.1016/j.porgcoat.2005.07.003
- Malacara Hernández, D. (2015). *Óptica básica*. Fondo de cultura económica.
- Malagón, E. D. (2005). *Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración* (Vol. 1). Unam.

- Malato Rodríguez, S., Blanco Gálvez, J., Maldonado Rubio, M. I., Fernández Ibáñez, P., Alarcón Padilla, D., Collares Pereira, M., . . . Correia de Oliveira, J. (2004). Engineering of solar photocatalytic collectors. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 77(5), 513-524. doi:10.1016/j.solener.2004.03.020
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in public health*, 8, 14. doi:10.3389/fpubh.2020.00014
- Manwell, J. F. (2004). Hybrid energy systems. *Encyclopedia of energy*.
- Mari, E. (1998). *Los materiales cerámicos*. TECNIBOOK EDICIONES.
- Marinescu, I. D. (2015). *Handbook of ceramics grinding and polishing*. . William Andrew Publishing.
- Márquez-Alvarez, C., Žilková, N., Pérez-Pariente, J., & Čejka, J. (2008). Synthesis, characterization and catalytic applications of organized mesoporous aluminas. *Catalysis reviews, science and engineering*, 50(2), 222-286. doi:10.1080/01614940701804042
- Martínez, P. R. (2009). *Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento* (Vol. 4). Marcombo.
- Mathur, S., Veith, M., Shen, H., Hüfner, S., & Jilavi, M. H. (2002). Structural and optical properties of NdAlO<sub>3</sub> nanocrystals embedded in an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix. *Chemistry of materials: a publication of the American Chemical Society*, 14(2), 568-582. doi:10.1021/cm0111433
- Matori, K. A. (2012). Phase transformations of  $\alpha$ -alumina made from waste aluminum via a precipitation technique. 13(12), 16812-16821. doi:https://www.mdpi.com/1422-0067/13/12/16812#
- Mazria, E. (1979). *Passive solar energy book*.
- Mc Ilvaine, J. E., Barkaszi, S. F., Beal, D. J., & Anello, M. T. (1993). *Online Publications List*. Retrieved from Upjs.sk: [https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/ESA/D7\\_Technical\\_data\\_Package/D5-WP3-algorithmic-structure-toolbox/Article%20Laboratory%20Testing%20of%20the%20Reflectance%20Roofing%20Materi.pdf](https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/ESA/D7_Technical_data_Package/D5-WP3-algorithmic-structure-toolbox/Article%20Laboratory%20Testing%20of%20the%20Reflectance%20Roofing%20Materi.pdf)
- Medina, Y. C. (2020). *Introducción a la termotransferencia*. Editorial Universitaria (Cuba).
- Medvedovski, E. (2001). Wear-resistant engineering ceramics. In *Wear* (Vol. 249, pp. 821-828).
- Meetham, G. y. (2000). *Materials for high temperature engineering applications*. Springer Science & Business Media.
- Meinel, A. B. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Reverte.
- Meinel, A. B. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Reverte.

- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *15*(4), 1777-1790. doi:10.1016/j.rser.2010.12.018
- Mellor, A., Alonso Alvarez, D., Guarracino, I., Ramos, A., Riverola Lacasta, A., Ferre Llin, L., . . . Ekins-Daukes, N. J. (2018). Roadmap for the next-generation of hybrid photovoltaic-thermal solar energy collectors. *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, *174*, 386-398. doi:10.1016/j.solener.2018.09.004
- Meola, C. B. (2016). *Infrared thermography in the evaluation of aerospace composite materials: infrared thermography to composites* (2016 ed.). Woodhead Publishing.
- Merkus, H. G. (2014). Pigments and Paint Dispersions. In *Particulate Products* (pp. 343-370). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-00714-4\_12
- Mezquita, S. U. (2001). Resistencia al choque térmico de materiales de Alúmina-Mullita.
- Mohammed, A. Y., Mohammed, F. I., & Ibrahim, M. Y. (2017). Grid connected Photovoltaic system. *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)* (pp. 1-5). IEEE. doi:10.1109/iccccee.2017.7867659
- Mohideen, M. M. (2023). Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *174*, 113153.
- Montes, J. R. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos* (2 ed.). Vision Libros.
- Morosanu, C. E. (2016). *Thin films by chemical vapour deposition* (Vol. 7). Elsevier.
- Mudd, G. M. (2021). Assessing the availability of global metals and minerals for the sustainable century: from aluminium to zirconium. In *Sustainability* (Vol. 13, p. 10855).
- Muñoz Portero, M. J. (2016). Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de hierro, acero, cobre y aluminio.
- Muñoz, A. V. (2013). *Principios de color y holopintura*. Editorial club universitario.
- Muradov, N. Z. (2008). Green" path from fossil-based to hydrogen economy: an overview of carbon-neutral technologies. In *International journal of hydrogen energy* (Vol. 33, pp. 6804-6839).
- Musselman, L. L. (1990). Production processes, properties, and applications for aluminum-containing hydroxides. In *Alumina chemicals: (pp. 75-92)*. Science and technology handbook.
- Nayar, P., Khanna, A., Kabiraj, D., Abhilash, S. R., Beake, B. D., Losset, Y., & Chen, B. (2014). Structural, optical and mechanical properties of amorphous and crystalline alumina thin films. *Thin solid films*, *568*, 19-24. doi:10.1016/j.tsf.2014.07.053
- Nayar, S. H. (1990). Nayar, S. H. R. E. E. K., Ikeuchi, K., & Kanade, T. . In *Nayar, S. H. R. E. E. K., Ikeuchi, K., & Kanade, T.* (pp. 185-212).

- Nayar, S. K. (1989). Surface reflection: physical and geometrical perspectives. In *Radiometry* (pp. 1-59). Carnegie Mellon University, the Robotics Institute.
- Nevas, S., Manoocheri, F., & Ikonen, E. (2004). Gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflectance. *Applied optics*, 43(35), 6391-6399. doi:10.1364/ao.43.006391
- Newell, J. (2010). *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*. (A. G. Editor, Ed.)
- Nicodemus, F. E., Richmond, J., Hsia, J., Ginsberg, I., Limperis, T., Harman, S., & Baruch, J. J. (1977). Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. 94-145. doi:10.6028/NBS.MONO.160
- Nieto, E. F. (1994). Películas delgadas: fabricación y aplicaciones.
- Noguera-Salas, O. P.-G.-P. (2018). *La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares*. (Vol. 15). Iteckne.
- Oa, D. E. (2002). *Centro Interamericano de Investigaciones Psicológicas y Ciencias Afines*. Retrieved from Redalyc.org: <https://www.redalyc.org/pdf/180/18019204.pdf>
- Ortiz, M. C. (2020). Tratamientos termoquímicos. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 7(14), 17-31.
- Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M. E., & Ding, Y. (2020). Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective. *Renewable energy*, 156, 1244-1265. doi:10.1016/j.renene.2019.10.127
- Palmero, P., Kern, F., Sommer, F., Lombardi, M., Gadow, R., & Montanaro, L. (2014). Issues in nanocomposite ceramic engineering: focus on processing and properties of alumina-based composites. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, 12(3), 113-128. doi:10.5301/jabfm.5000185
- Paniagua García, P. C. (2022). Diseño de investigación de la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de emergencia de energía eléctrica solar fotovoltaico en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum.
- Paquet, L. (2010). Caracterización por contacto de cerámicas nanocompuestas Alúmina/Mullita.
- Pascual, R. D. (2012). DISEÑO Y APLICACIÓN DE COLECTORES SOLARES TIPO PARABÓLICO.
- Paul, D. I. (2019). Application of compound parabolic concentrators to solar photovoltaic conversion: A comprehensive review. *International journal of energy research*, 43(9), 4003-4050. doi:10.1002/er.4428
- Perez de Los Reyes, M. C. (2008). *Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero*. Universidad de Córdoba, Servicio de Publicaciones.
- Pérez Estrella, M. (2021). Diseño del colector solar térmico de un sistema híbrido PVT por modelamiento y simulación. Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6627>
- PEREZ, D. (2024). *Energía solar térmica. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Marcombo.

- Pérez, E. M. (1980). La industria del Aluminio y sus refractarios. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 19(6), 395-400.
- Perez, N. (2024). Atomic structure. In *Materials Science: Theory and Engineering* (pp. 1-50). Cham: Springer Nature Switzerland. doi:10.1007/978-3-031-57152-7\_1
- Phambu, N. (2003). Characterization of aluminum hydroxide thin film on metallic aluminum powder. *Materials Letters*, 57(19), 2907-2913. doi:https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01395-2
- Pierre, A. C. (2020). *Introduction to sol-gel processing* (Vol. 11). Springer Nature.
- Plunkert, P. A. (1996). Bauxite and Alumina. In *Minerals Yearbook*, (Vol. 1, p. 97).
- Plunkert, P. A. (2000). Bauxite and alumina. In *US Geological Survey Minerals Yearbook*.
- Pode, R. &. (2011). Springer Science & Business Media. In *Solar lighting*.
- Popat, K. C. (2006). Library. *MRS bulletin*, 31(1), 58-60. doi:10.1557/mrs2006.17
- Ramakumar, R., & Bigger, J. E. (1993). Photovoltaic systems. *Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 81(3), 365-377. doi:10.1109/5.241491
- Ramanathan, V. &. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. In *Atmospheric environment* (Vol. 43, pp. 37-50).
- Ramírez, V. (2022). *Química 1*. Grupo Editorial Patria.
- Ramírez-García, S. C.-C.-S.-O.-R. (2012). Aplicación en medicina de la espectroscopia de infrarrojo cercano. *Medicina Interna de México*, 28(4), 366.
- Real Peña, E. (2012). Identificación de la composición de tejidos biológicos a partir de medidas de reflectancia difusa.
- Restrepo Hoyos, E. F. (2019). Estudio termomecánico de refractarios avanzados fabricados utilizando residuos industriales. doi:https://hdl.handle.net/10495/14681
- Reyes, J. A. (2012). *DISEÑO Y APLICACIÓN DE COLECTORES SOLARES TIPO PARABÓLICO*. Retrieved from Repositorioinstitucional.mx: https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/822
- Rezaee, M., Tsai, L.-C., Haider, M. I., Yazdi, A., Sanatizadeh, E., & Salowitz, N. P. (2019). Quantitative peel test for thin films/layers based on a coupled parametric and statistical study. *Scientific reports*, 9(1), 19805. doi:10.1038/s41598-019-55355-9
- Riedel, R., & Chen, I.-W. (2008). *Ceramics science and technology: Ceramics science and technology, volume 1 structures v. 1: Volume 1: Structures* (Vol. 1). Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag. doi:10.1002/9783527631926
- Rivas Mercury, J. M. (2009). Influencia del contenido de lodo rojo (residuo de bauxita) en las propiedades físico-mecánicas de materiales cerámicos conformados por extrusión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 29(3), 93-100.

- ROLDÁN VILORIA, J. O. (2008). *Fuentes de energía*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Román, C. &. (1992). Importancia de la difracción de rayos X en la Química. *Educación Química*, 4(4), 208-217.
- Rooy, E. L. (1990). Introduction to aluminum and aluminum alloys. In *In Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials* (pp. 3-14). ASM International.
- Ross, M. H. (2007). *Histología: texto y atlas color con biología celular y molecular*. Ed. Médica Panamericana.
- Ruzafa Otón, L. (2009). La energía solar en la edificación: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.
- Sadeghian, O. O.-I.-M. (2022). A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 54, 105241.
- Sadhishkumar, S., & Balusamy, T. (2014). Performance improvement in solar water heating systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 191-198. doi:10.1016/j.rser.2014.04.072
- Salerno, A. E. (1976). Aerospace photography. In *Ecological Studies* (pp. 11-83). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-66236-2\_2
- Salvi, S. S. (2018). Technological advances to maximize solar collector energy output: a review. In *Journal of Electronic Packaging* (Vol. 140, p. 040802).
- Sampaio, J. A. (2005). Bauxita.
- Sánchez Pacheco, C. (2010). Sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a viviendas residenciales en entorno urbano. Retrieved from <http://dspace.unia.es/handle/10334/503>
- Sarkar, D. K. (2020). *Packaging technology and engineering: pharmaceutical, medical and food applications*. John Wiley & Sons.
- Sarker, S., Mumu, H. T., Al-Amin, M., Zahangir Alam, M., & Gafur, M. A. (2022). Impacts of inclusion of additives on physical, microstructural, and mechanical properties of Alumina and Zirconia toughened alumina (ZTA) ceramic composite: A review. *Materials today: proceedings*, 62, 2892-2918. doi:10.1016/j.matpr.2022.02.481
- Schlesinger, M. E. (2006). *Aluminum Recycling*. Boca Ratón, FL, Estados Unidos de América: CRC press. doi:10.1201/9781420006247
- Schmitz, C. (2006). *Handbook of aluminium recycling*. Vulkan-Verlag GmbH.
- Schott, J. R. (2007). *Remote sensing: the image chain approach*. Oxford University Press.
- 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 *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1165-1248). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-72579-2\_112

- Schweitzer, P. A. (2005). *Paint and coatings: Applications and corrosion resistance*. Boca Ratón, FL, Estados Unidos de América: CRC Press. doi:10.1201/9781420027211
- Sen, Z. (2008). *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. Springer Science & Business Media.
- Sharaf, O. Z. (2015). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II— Implemented systems, performance assessment, and future directions.
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2015). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II – Implemented systems, performance assessment, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1566-1633. doi:10.1016/j.rser.2014.07.215
- Sharif, M. A.-A. (2015). Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 557-568).
- Sharp, F., Lindsey, D., Dols, J., & Coker, J. (2014). The use and environmental impact of daylighting. *Journal of cleaner production*, 85, 462-471. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.092
- Sheller, M. (2014). *Aluminum dreams: the making of light modernity*. MIT press.
- Shirai, T. W. (2009). Structural properties and surface characteristics on aluminum oxide powders. *Annual Report of the Ceramics Research Laboratory Nagoya Institute of Technology*, 9, 23-31.
- Shishkovsky, I. V. (2011). Chemical and physical vapor deposition methods for nanocoatings. In *In Nanocoatings and ultra-thin films* (pp. 57-77). Woodhead Publishing.
- Shiva, V. (2004). *Las guerras del agua: contaminación, privatización y negocio* (Vol. 200). Icaria Editorial.
- Shreir, L. L. (2013). *Corrosion: metal/environment reactions*. Newnes.
- Shull, C. A. (1929). A spectrophotometric study of reflection of light from leaf surfaces. In *Botanical Gazette* (Vol. 87, pp. 583-607).
- Simmons, M. (2000). The Pencil Hardness Test. In *Woodwork*. April.
- Sivaram, V. (2018). *Taming the sun: Innovations to harness solar energy and power the planet*. MIT Press.
- Skillingberg, M., & Green, J. A. (2007). Aluminum applications in the rail industry. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3184cfb6e018be4963611489d290bf6b8b83f94e>
- Slocum, J. T. (2017). Characterization and science of an aluminum fuel treatment process. Retrieved from <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/115674?show=full>

- Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinell, C. E. (2009). Anticorrosive coatings: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 6(2), 135-176. doi:10.1007/s11998-008-9144-2
- Soto, I. P. (2005). Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. 7.
- Spataru, C. &. (2016). Off-grid energy storage. *In Storing Energy*, 477-497.
- Spiller, E. (1976). Reflective multilayer coatings for the far uv region. *Applied optics*, 15(10), 2333-2338. doi:10.1364/AO.15.002333
- Stevens, R., & Binner, J. G. (1984). Structure, properties and production of  $\gamma$ -alumina. *Journal of materials science*, 19(3), 695-715. doi:10.1007/bf00540440
- Stuart, N. M. (2021). The microstructure of  $\gamma$ -alumina. *Energies*, 14(20), 6472.
- Stwertka, A. (2002). *A Guide to the Elements*. Oxford University Press.
- Suárez Menéndez, M. (2009). *Materiales cerámicos policristalinos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y YAG con funcionalidad óptica*.
- Sun, Q. H. (2010). Cardiovascular effects of ambient particulate air pollution exposure. *In Circulation* (Vol. 121, pp. 2755-2765.).
- Sverdlin, A. (2003). Introduction to aluminum. Handbook of aluminum.
- Tabereaux, A. T. (2014). Aluminum production. . *In In Treatise on Process Metallurgy* (pp. 839-917). Elsevier.
- Tabereaux, A. T. (2024). Aluminum production. *In In Treatise on Process Metallurgy* (pp. 625-676). Elsevier.
- Tabereaux, A. T. (2024). Aluminum production. *In Treatise on process metallurgy*, 625-676. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85373-6.00004-1
- Tecnologías Solares Termoeléctricas*. (n.d.). Retrieved from Ehu.es: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>
- Tian, X., Guo, Y., Zhang, J., Ivasishin, O. M., & Yan, J. (2023). Performance enhancement strategies of fibrous solar cells for wearable hybrid energy systems. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability*, 11(7), 3210-3244. doi:10.1039/d2ta09175e
- Tilley, G. S. (1927). *Acid Processes for the Extraction of Alumina* (Vol. 266). US Government Printing Office.
- Tilley, R. J. (2020). Colour and the optical properties of materials. *In J. W. Sons..*
- Tipler, P. A. (2021). *Física para la ciencia y la tecnología* (Vol. 1). Reverté.
- Tong, C. (2019). Materials-based solutions to solar energy system. *In Introduction to Materials for Advanced Energy Systems* (pp. 231-319). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-98002-7\_4

- Torrance, K. E., & Sparrow, E. M. (1967). Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *JOSA*, 57(9), 1105-1114. doi:10.1364/JOSA.57.001105
- Torrent, J., & Barrón, V. (2015). Diffuse Reflectance Spectroscopy. In *Methods of Soil Analysis Part 5-Mineralogical Methods* (Vol. 5, pp. 367-385). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. doi:10.2136/sssabookser5.5.c13
- Traver, M. B. (n.d.). Fabricación de paneles solares fotovoltaicos.
- TRUCTURADOS, N. (2009). ANÁLISIS DE MÉTODOS Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.
- Trueba, M., & Trasatti, S. P. (2005).  $\Gamma$ -alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects. *European journal of inorganic chemistry*, 2005(17), 3393-3403. doi:10.1002/ejic.200500348
- Trueba, M., & Trasatti, S. P. (2005).  $\Gamma$ -alumina as a support for catalysts: A review of fundamental aspects. *European journal of inorganic chemistry*, 2005(17), 3393-3403. doi:10.1002/ejic.200500348
- Twidell, J. (2021). *Renewable energy resources*. London: Routledge. doi:10.4324/9780429452161
- Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., & Gil, P. (2019). Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 33(1), 271-284. doi:10.2514/1.t5420
- Vaamonde, A. J. (2000). *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos* (Vol. 31). CSIC-CSIC Press.
- Vallejo Gallardo, F. E. (2013). Diseño de una planta piloto para la obtención de aluminato de sodio mediante el método de precipitación controlada .
- van Helden, W. G. (2004). PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat. *Progress in photovoltaics: research and applications*.
- Vargas, W. E., & Niklasson, G. A. (1997). Applicability conditions of the Kubelka-Munk theory. *Applied optics*, 36(22), 5580-5586. doi:10.1364/ao.36.005580
- Vazquez, M. V. (2014). *La corrosión: El peor de los villanos cuando dominan los metales*. Universidad Nacional de Mar del Plata. Retrieved from <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/117969>
- Vega, A., & Leonardo, F. (2017). Sintetizar y caracterizar de la resistencia a la corrosión de recubrimientos cerámicos de (SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>- ZrO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) producidos mediante la técnica sol-gel y depositados sobre las aleaciones de acero inoxidable AISI 316L y de titanio Ti6Al4V. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60279>
- Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. . Reverte.
- Ventajas de los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red. (2018, 02 04). *Syscomblog.com*. Retrieved from Googleusercontent.com: <https://www.syscomblog.com/2018/04/ventajas-de-los-sistemas-fotovoltaicos.html>

- Villalobos, J. J. (1995). *Energía Solar*.
- Villavicencio Cevallos, J. G. (2016). Obtención de alúmina activada y su aplicación como soporte de catalizador.
- von Hehl, A. &. (2013). Aluminum and aluminum alloys. In *Structural materials and processes in transportation* (pp. 49-112).
- Wade, L. G. (2017). *Química orgánica* (Vol. 1). Pearson.
- Wai, S. W. (2013). Rapid assessment of paint coatings by micro and nano indentation methods.
- Walker, W. W. (1985). *Knoop Microhardness Testing of Paint Films*. ASTM International.
- Wallace, G. (2011). Production of secondary aluminium. In *In Fundamentals of aluminium metallurgy* (pp. 70-82). Woodhead Publishing.
- 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. doi:10.1002/adfm.201807275
- Weinstein, L. A., Loomis, J., Bhatia, B., Bierman, D. M., Wang, E. N., & Chen, G. (2015). Concentrating solar power. *Chemical reviews*, 115(23), 12797-12838. doi:10.1021/acs.chemrev.5b00397
- Wells, A. F. (2012). *Structural inorganic chemistry*. . Oxford Classic Texts in the Ph.
- Wen, H. L. (2000). Growth characteristics of boehmite-derived ultrafine theta and alpha-alumina particles during phase transformation. *Journal of Crystal Growth*, 208(1-4), 696-708.
- Wen, H.-L., Chen, Y.-Y., Yen, F.-S., & Huang, C.-Y. (1999). Size characterization of  $\theta$ - and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystallites during phase transformation. *Nanostructured Materials*, 11(1), 89-101. doi:10.1016/s0965-9773(99)00022-7
- Westlund, H. B., & Meyer, G. W. (2001). Applying appearance standards to light reflection models. *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/383259.383318
- Whiting, K. E. (2015). Aplicación de la energía solar fotovoltaica interconectada a la red eléctrica. *Revista Ontare*, 2(2), 145-170.
- Willhite, C. C., Karyakina, N. A., Yokel, R. A., Yenugadhati, N., Wisniewski, T. M., Arnold, I. M., . . . Krewski, D. (2014). Systematic review of potential health risks posed by pharmaceutical, occupational and consumer exposures to metallic and nanoscale aluminum, aluminum oxides, aluminum hydroxide and its soluble salts. *Critical reviews in toxicology*, 44 Suppl 4(sup4), 1-80. doi:10.3109/10408444.2014.934439
- Wolff, L. B. (1994). Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 11(11), 2956-2968. doi:10.1364/JOSAA.11.002956

- Wolff, L. B. (1994). Relative brightness of specular and diffuse reflection. In *Optical Engineering* (Vol. 33, pp. 285-293).
- Wolff, L. B. (1994). Relative brightness of specular and diffuse reflection. *Optical engineering* (Redondo Beach, Calif.), 285. doi:10.1117/12.149144
- Yang, L., & Kruse, B. (2004). Revised Kubelka-Munk theory. I. Theory and application. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 21(10), 1933-1941. doi:10.1364/josaa.21.001933
- Yin, L., Kim, K. N., Trifonov, A., Podhajny, T., & Wang, J. (2022). Designing wearable microgrids: towards autonomous sustainable on-body energy management. *Energy & environmental science*, 15(1), 82-101. doi:10.1039/d1ee03113a
- Zheludkevich, M. L., Miranda Salvado, I., & Ferreira, M. G. (2005). Sol-gel coatings for corrosion protection of metals. *Journal of materials chemistry*, 15(48), 5099-5111. doi:10.1039/B419153F