

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): ANDRES FELIPE APELLIDOS: GONZALEZ PEÑARANDA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JORGE HERNANDO APELLIDOS: BAUTISTA RUIZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES

RESUMEN

Se presenta la síntesis de recubrimientos mediante el método sol-gel con diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, con el objetivo de generar películas con propiedades de autolimpieza y antirreflejo para sustratos de vidrios de módulos solares. Se realizó la caracterización de la morfología, topografía, mojabilidad de las gotas sobre las superficies, las propiedades ópticas y mecánicas de cada uno de los recubrimientos, esto con el fin de determinar la composición más óptima y con mejor rendimiento.

PALABRAS CLAVES:

Composición TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, sol-gel, autolimpieza, hidrofilia, antirreflejo.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 105 TABLAS: 14 FIGURAS: 25 CD ROOM: 1

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON  
TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES

ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ PEÑARANDA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON  
TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA

ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ PEÑARANDA

DIRECTOR

Ph.D. JORGE HERNANDO BAUTISTA RUIZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** CÚCUTA, 1 DE NOVIEMBRE 2022  
**HORA:** 3:00 p.m.  
**LUGAR:** AUDITORIO DISEÑO MECÁNICO (DM205) UFPS  
**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA MECÁNICA

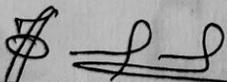
**TÍTULO:** "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON  $TiO_2/SiO_2$  PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES."

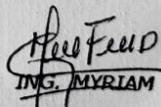
**Jurados:** ING. ISMAEL HUMBERTO GARCÍA PÁEZ  
 ING. MYRIAM FORERO DURÁN

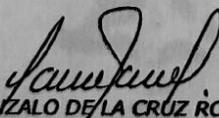
**Director:** Ph.D. JORGE HERNANDO BAUTISTA RUIZ

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
ANDRÉS FELIPE GONZÁLEZ PEÑARANDA	1121539	Cuatro, Ocho	4.8

## MERITORIA

  
 ING. ISMAEL HUMBERTO GARCÍA PÁEZ

  
 ING. MYRIAM FORERO DURÁN

  
 Vo.Bo GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA  
 Coordinador Comité Curricular  
 Ingeniería Mecánica

## **Dedicatoria**

Primeramente gracias a Dios por siempre darme salud y guiarme en este largo camino del conocimiento, dedico este trabajo a mi mamá Ludy Cecilia Peñaranda por su amor incondicional, por tenerme siempre en sus oraciones y estar en los momentos más difíciles, a mi papá Luis Antonio González por ser el mejor ejemplo de trabajo, sacrificio y amor por la familia, a mis hermanos Diego Alejandro, Luis Fernando y Gina Mayerlin gracias porque siempre conté con su apoyo moral y lealtad, por último, a mis amigos que fueron fundamental para el trabajo en equipo y largas noches de estudio, fueron muchos los momentos difíciles pero también momentos de diversión y aprendizaje.

## **Agradecimientos**

Agradezco al PhD. Jorge Hernando Bautista Ruiz por aceptar ser mi director de proyecto, por guiarme, instruirme y brindarme de su conocimiento en el hermoso tema de la nanotecnología, agradezco el tiempo y el apoyo brindado a lo largo del proyecto, al igual que al PhD William Aperador y PhD Giovany Orozco. Agradecimiento también a mis compañeros de la planta Gaseosas Lux Cúcuta quienes me brindaron su apoyo y disponibilidad de tiempo para la terminación del proyecto.

## Tabla de contenido

Introducción	14
1. Problema	19
1.1. Título	19
1.2. Planteamiento del problema	19
1.3. Formulación del problema.	20
1.4. Objetivos	20
1.4.1. Objetivo General	20
1.4.2. Objetivos Específicos	21
1.5. Justificación	21
1.6. Alcance	23
1.7. Limitaciones y delimitaciones	24
1.7.1. Limitaciones	24
1.7.2. Delimitaciones	24
2. Marco referencial	25
2.1. Antecedentes	25
2.2. Marco teórico	27
2.2.1. Eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos.	27
2.2.2. Cubierta de vidrio del panel solar	28
2.2.3. Características del polvo	28
2.2.4. Factores que afectan la deposición de polvo	29
2.2.5. Velocidad y dirección del viento	29

2.2.6.	Temperatura y humedad	29
2.2.7.	Humedad	30
2.2.8.	Lluvia	30
2.2.9.	Excrementos de aves	30
2.2.10.	Lugar de instalación y tiempo de exposición	31
2.2.11.	Limpieza en paneles solares	31
2.2.12.	Métodos de limpieza de los paneles fotovoltaicos	31
2.2.13.	Síntesis de nanomateriales	37
2.2.14.	Método sol – gel	37
2.2.15.	Humectabilidad	38
2.2.16.	Nanomateriales a base de metal	38
2.2.17.	Caracterización de nanomateriales	39
2.2.18.	Recubrimientos multifuncionales	39
2.2.19.	Recubrimiento antirreflectante	40
2.2.20.	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	41
2.2.21.	Deposición por Dip-coating	42
2.2.22.	Fotocatálisis TiO <sub>2</sub>	42
2.2.23.	Fotocatálisis Solar en TiO <sub>2</sub>	43
2.2.24.	Banda prohibida de energía (Band gap)	43
2.2.25.	Superhidrofilia Fotoinducida	44
2.3.	Marco conceptual.	44
2.4.	Marco contextual	47
2.5.	Marco legal	48

3.	Diseño metodológico	49
3.1.	Tipo de investigación	49
3.2.	Universo	51
3.3.	Técnica de recolección de datos	52
3.3.1.	Fuentes de información primaria	52
3.3.2.	Fuentes de información secundaria	52
4.	Desarrollo de la propuesta	53
4.1.	Recolección de información.	53
4.2.	Síntesis de los soles por separado.	53
4.3.	Deposición de las películas sobre el sustrato de vidrio.	53
4.4.	Caracterización estructural del recubrimiento.	53
4.5.	Evaluación de los resultados.	54
5.	Procedimiento experimental	54
5.1.	Reactivos	54
5.2.	Conformación de los soles	55
5.2.1.	Cálculos básicos	56
5.2.2.	Esquema	58
5.3.	Viscosidad	59
5.4.	Conformación de los recubrimientos	61
5.4.1.	Preparación de los sustratos	62
5.4.2.	Obtención de las películas	63
5.5.	Tratamiento térmico de los recubrimientos	64
6.	Caracterización	66

	10
6.1. Difracción de Rayos X (DRX)	66
6.2. AFM	67
6.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	69
6.4. Transmitancia	70
6.5. Ángulo de Contacto	71
6.6. Propiedades mecánicas de adherencia.	72
6.7. Rendimiento de autolimpieza.	73
7. Resultados	76
7.1. DRX	76
7.2. Resultados AFM (Rugosidad)	77
7.3. Microscopía electrónica de barrido (Morfología).	81
7.4. Propiedades ópticas (%T)	82
7.5. Medición de ángulo de contacto.	84
7.6. Propiedades mecánicas (coeficiente de fricción).	91
7.7. Rendimiento de autolimpieza	93
7.8. Análisis general de los sistemas	98
8. Conclusiones	99
9. Recomendaciones	102
Bibliografía	103

## Lista de figuras

Figura 1 Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por fuente, 2018-2020. (IEA (2020), s.f.)	15
Figura 2 Preparación sol de TiO <sub>2</sub> y sol de SiO <sub>2</sub>	57
Figura 3 Mezcla de soluciones para cada sistema TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	58
Figura 4 Proceso de conformación del sol TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	58
Figura 5 Viscosímetro capilar tipo Ostwald.	59
Figura 6 Gráfica de viscosidad vs tiempo para los sistemas ST1, ST2 y ST3.	60
Figura 7 Gráfica de viscosidad vs tiempo para los sistemas ST4, ST5 y ST6.	61
Figura 8 Equipo de limpieza por ultrasonido Branson 2800.	62
Figura 9 Equipo de inmersión para la conformación de los recubrimientos.	63
Figura 10 Horno mufla VULCAN 3-1750	65
Figura 11 Tratamiento térmico	66
Figura 12 Difractómetro Malvern Panalytical Empyrean	67
Figura 13 Equipo NaioAFM para análisis de Rugosidad.	69
Figura 14. Equipo nanovea tribometers T100 para análisis de COF.	73
Figura 15 Panel solar de 3,5V y 200mA	74
Figura 16 Soportes de paneles fotovoltaicos	75
Figura 17 Difractogramas para cada una de las muestras.	77
Figura 18 Topografía de cada uno de los sistemas: a) ST1 b) ST2 c) ST3 d) ST4 e) ST5 f) ST6.	79
Figura 19 Micrografías de los sistemas a) ST2 b) ST3 c) ST5.	82
Figura 20 Gráfica de Longitud de onda vs % Transmitancia para cada uno de los sistemas.	84

Figura 21 Gráfica de Coeficiente de fricción para cada uno de los sistemas.	92
Figura 22 Prueba de eficiencia para los sistemas ST1, ST2 y ST3	93
Figura 23 Eficiencia de los recubrimientos ST1, ST2, ST3 y el vidrio sin recubrimiento con respecto al panel fotovoltaico.	94
Figura 24 Prueba de eficiencia para los sistemas ST4, ST5 y ST6.	95
Figura 25 Eficiencia de los recubrimientos ST4, ST5, ST6 y el vidrio sin recubrimiento con respecto al panel fotovoltaico.	96

## Lista de tablas

Tabla 1 Características de los reactivos utilizados	55
Tabla 2 Ajuste de pH para cada sistema con ácido nítrico.	57
Tabla 3 Cantidad de reactivos empleada para cada variación de la concentración molar del sistema $TiO_2/SiO_2$	57
Tabla 4 Valores del ángulo de contacto con el agua y su respectivo comportamiento de humectabilidad.	72
Tabla 5 Promedio de la rugosidad para cada sistema.	80
Tabla 6 Ángulos de contacto sistema ST1.	85
Tabla 7 Ángulos de contacto sistema ST2.	86
Tabla 8 Ángulos de contacto sistema ST3.	87
Tabla 9 Ángulos de contacto sistema ST4.	88
Tabla 10 Ángulos de contacto sistema ST5.	89
Tabla 11 Ángulos de contacto sistema ST6.	90
Tabla 12 Promedio de COF para cada sistema.	92
Tabla 13 Ejemplo de autolimpieza en los sustratos de vidrios recubiertos.	97
Tabla 14 Calificación de los sistemas para cada análisis realizado.	98

## Introducción

El mundo está en una lucha constante por mitigar todos aquellos factores que deterioran el planeta, como recursos convencionales basados en la producción de energía mediante la quema de combustibles fósiles (Samet Sarkin, Ekren, & Saglam, 2020), que generan gran contaminación, aceleran el crecimiento del calentamiento global y las lluvias ácidas. Conforme a esto, las tecnologías de energía renovable y verde han llamado mucho la atención en los últimos años, siendo una de las fuentes más respetuosas con el medio ambiente (Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019).

La información más reciente con respecto a la energía fotovoltaica a nivel mundial, afirma que la capacidad total medida a finales de 2019 es de 580.156 MW (mega watts), haciendo énfasis en Sur América se tiene una capacidad total de 6.464 MW (mega watts), mientras que en Colombia solo llega a los 90 MW (mega watts) (Camera, s.f.). La energía solar fotovoltaica aumentará más rápidamente de todas las fuentes de energía renovable en 2020 (figura 1). Sin embargo, sigue existiendo incertidumbre en el crecimiento de la capacidad en 2020, especialmente para las aplicaciones de energía solar fotovoltaica distribuida. (IEA (2020), s.f.).

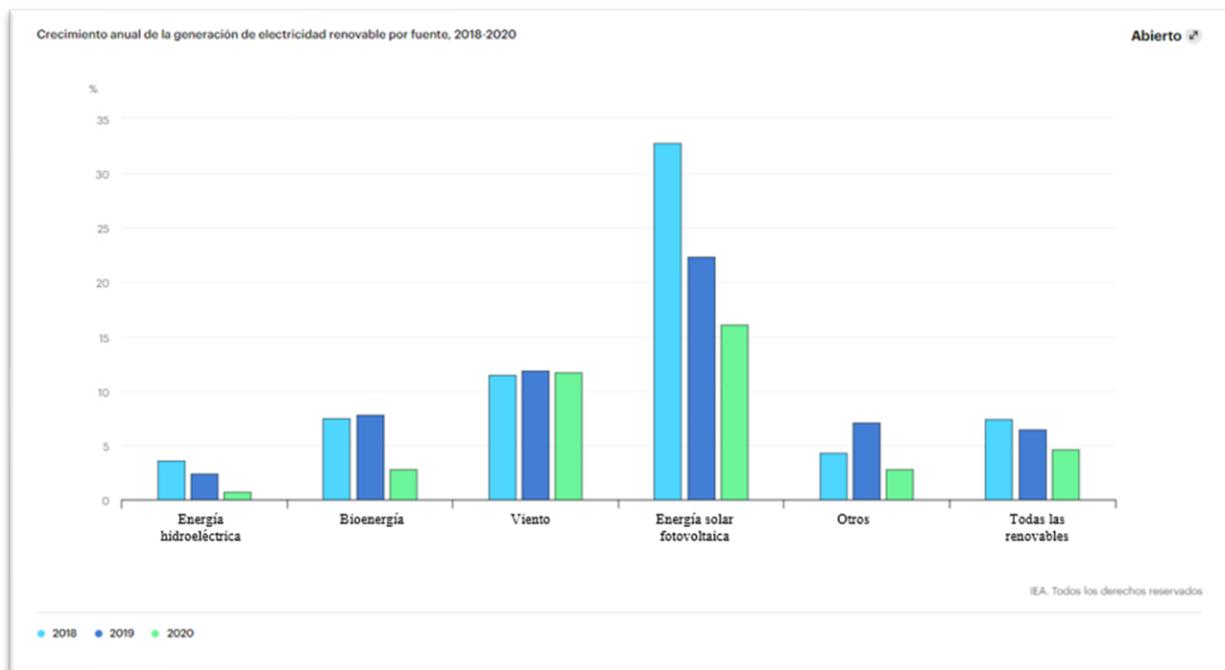


Figura 1 Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por fuente, 2018-2020. (IEA (2020), s.f.)

Los paneles fotovoltaicos han llamado la atención de los investigadores, ya que estos aprovechan el sol como fuente de energía durante todo el año y además abre como tema de investigación la mejora de su eficiencia, debido a la pérdida de las salidas de energía por la reflexión en la interfaz aire / vidrio, así como la acumulación de polvo en los módulos solares (Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019). Estos polvos incluyen pequeñas partículas inorgánicas formadas por el movimiento de la arena, el suelo y el viento, además incluyen polvo orgánico que se forma de la biomasa de animales y plantas. Las investigaciones sobre el efecto de la contaminación por polvo en los paneles fotovoltaicos se han estudiado durante muchos años en todo el mundo, debido a la calidad del aire en diferentes áreas, pronunciándose mayor el efecto de la incrustación de polvo en los paneles fotovoltaicos en las zonas secas y con poca lluvia. (Zhong, Hu, Wang, & Yang, 2017).

El vidrio se utiliza ampliamente en módulos solares para proteger los dispositivos activos de las duras condiciones ambientales, por ejemplo, tormentas de polvo, humedad, lluvias intensas, viento, etc... (Quan & Zhang, 2017). Todo esto se comporta como una barrera contra los rayos entrantes, incluso si la superficie del panel fotovoltaico está limpia (vidrio sin recubrimiento), se genera un pequeño efecto reflectante, considerando que la disminución de la luz solar incidente en los módulos solares también provoca una disminución en la producción de energía eléctrica. (Samet Sarkin, Ekren, & Saglam, 2020). Sin embargo, los métodos de limpieza habituales presentan muchos problemas, como el elevado coste de mantenimiento, el uso de detergentes químicos (Quan & Zhang, 2017), y el consumo abundante de agua, por lo tanto, se ha realizado un esfuerzo significativo para superar este problema. Se han propuesto y evaluado varios métodos y estrategias para limpiar la superficie controlando el ensuciamiento de los paneles solares como el método electrostático, el Bot de limpieza, el robot portátil y el dron SolarBrush (Appasamy, Kurnia, & Assadi, 2020). Sin embargo, existe interés en desarrollar un método que se pueda aplicar una vez y que no requiera una gran cantidad de mano de obra y energía. Uno de los métodos más prometedores es el revestimiento autolimpiante inspirado en la naturaleza. El revestimiento autolimpiante se considera uno de los métodos más fáciles y prometedores para limpiar varias superficies de vidrio, incluida la superficie de los paneles solares (Appasamy, Kurnia, & Assadi, 2020). Los materiales de energía solar se eligen predominantemente de tal manera que los recubrimientos desarrollados poseen varias características clave, tales como eficiencia de absorción, conductividad eléctrica, transparencia, mecánicamente duradero contra el desgaste, el cizallamiento, antiempañante, la

adhesión de hielo y humectabilidad. Los recubrimientos de paneles solares para aumentar su propiedad de autolimpieza implican dos tipos de películas, tales como películas superhidrófilas y superhidrofóbicas. (Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019). Estos efectos de superficie superhidrófobos o superhidrófilos se pueden lograr cambiando la estructura de la superficie o la composición química (Ren, y otros, 2020). Para tener recubrimientos multifuncionales con propiedades deseables, los recubrimientos de los semiconductores deben ser de nanoestructura y tener un espesor de nanoescala. Además, la distribución uniforme de los poros en la microestructura de estos recubrimientos también es importante (Rad, Afshar, & Azadeh, 2020). Los recubrimientos pueden prepararse mediante varios métodos, como la pulverización catódica con magnetrón, la deposición de la capa atómica, la evaporación del haz de electrones, la deposición química de vapor (CVD) y la deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD). Todos estos métodos se emplean para producir películas de espesor uniforme y con buenas propiedades ópticas, pero estos métodos mencionados no son adecuados para las técnicas de producción en masa continua en celdas solares de bajo costo, debido a las condiciones estrictas, procesos de pasos complejos y materiales costosos. Sin embargo, el método sol-gel es atractivo debido a su bajo costo, ofrece un proceso simple y producción a gran escala con alta calidad (Sun, y otros, 2020), más eficaz en el tiempo y más respetuoso con el medio ambiente. Puede llevarse a cabo a baja temperatura de sinterización con respecto a otras técnicas de obtención de recubrimientos, que no requiere ningún equipo especial o costoso (Appasamy, Kurnia, & Assadi, 2020).

(Mosquera Espinel, 2016) afirma que “el dióxido de titanio nanoparticulado es de gran interés tecnológico porque puede utilizarse en diversas aplicaciones industriales. Una de las aplicaciones que ha cobrado gran importancia es la obtención de materiales autolimpiables, es conocido por

ser un catalizador utilizado en tratamientos de aire y agua, así como también en la producción de gases. Al ser un compuesto fotocatalítico potente, descompone casi cualquier compuesto orgánico al estar expuesto bajo luz solar”, como también superhidrofilicidad fotoinducida, que facilita el lavado de los contaminantes de la superficie por el agua de lluvia (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2018). El dopaje de óxidos metálicos se persigue comúnmente para lograr un mejor desempeño electrónico, óptico y catalítico. Tales cambios conducen a un estrechamiento o expansión de la banda prohibida, por tanto, para mejorar la eficacia fotocatalítica se sugieren varios enfoques, como el aumento del área catalítica activa y el dopado con iones de metales. Debido a la superposición de los orbitales de la banda de conducción de  $\text{TiO}_2$  y el metal, la banda prohibida de  $\text{TiO}_2$  disminuye, aumentando así las aplicaciones de absorción de luz visible de este material que están estrechamente relacionadas con sus propiedades estructurales y ópticas (Barkhade & Banerjee, 2019). Tales recubrimientos no solo deberían ser buenos para mantener limpios los módulos fotovoltaicos, sino que al mismo tiempo deberían mantener la transparencia de las cubiertas de vidrio solar para permitir que la luz máxima ingrese a la superficie de los paneles solares encapsulados. (Adak, Bhattacharyya, Saha, & Maiti, 2020).  $\text{TiO}_2$  reduce la transmitancia del vidrio y pierde rápidamente la hidrofilia, restableciendo el ángulo de contacto con el agua en ambientes oscuros. Las películas compuestas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  pueden superar todas estas limitaciones. Las películas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  presentan alta transmitancia, actividad fotocatalítica mejorada y superhidrofilicidad persistente en ambientes oscuros (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2018), debido a esto este proyecto busca obtener un recubrimiento con estos nanocompuestos y realizar un estudio preliminar para que cumpla con estas propiedades mencionadas anteriormente.

## 1. Problema

### 1.1. Título

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES.

### 1.2. Planteamiento del problema

En Colombia se observa un alto consumo de energía a base de combustibles fósiles los cuales generan un deterioro en el medio ambiente y la capa de ozono. Debido al cambio climático se ha optado por energías alternativas o no convencionales poco implementadas en el país comparado a escala mundial. Una de estas alternativas es la energía fotovoltaica que requiere de una fuente de energía ecológica e inagotable como la del sol, de la cual se requiere de células solares para convertirla a energía eléctrica. Con el paso del tiempo se disminuye la transmisión de energía en los paneles solares por la reflectividad que se genera en los sustratos de vidrio, provocado por la acumulación de agentes contaminantes orgánicos e inorgánicos que causan pérdida de rendimiento en las salidas de energía, esto conlleva a la implementación de sistemas electrónicos, dispositivos mecánicos y procedimientos manuales de mantenimiento que generan altos costos, uso de abundante agua, detergentes químicos, tiempo y en algunos casos se generan riesgos debido a las alturas en edificaciones.

Los principales requisitos de un material inteligente autolimpiante superhidrófilo es que debe tener una alta actividad fotocatalítica para degradar los contaminantes orgánicos y superhidrofilicidad inducida por la luz para formar una lámina de agua para limpiar la superficie mediante el lavado de los contaminantes degradados, buena transparencia óptica, fotoestabilidad

y durabilidad (Padmanabhana & John, 2020). Los revestimientos AR (antirreflectantes) de sílice catalizada por base poseen alta transmitancia pero poca resistencia a la abrasión, mientras que los revestimientos AR de sílice catalizada por ácido poseen alta resistencia a la abrasión pero poca transmitancia (Lin, Zheng, Yan, & Zhang, 2017). Sin embargo, las aplicaciones al aire libre de  $\text{TiO}_2$  están limitadas debido a su amplio margen de banda (3,2 eV para anatasa y 3 eV para rutilo) y, por lo tanto, la autolimpieza superhidrófila está restringida únicamente a la luz ultravioleta. El  $\text{TiO}_2$  que tiene un índice de refracción alto ( $n = 2.52$  para anatasa y 2.76 para rutilo) cuando se aplica sobre vidrios transparentes causa una alta reflexión. El uso de una concentración muy baja de  $\text{TiO}_2$  en el recubrimiento minimiza el reflejo de la superficie, pero al mismo tiempo reduce la actividad fotocatalítica (Padmanabhana & John, 2020).

### **1.3. Formulación del problema.**

¿Es posible obtener por el método sol-gel películas nanoestructuradas con propiedades de autolimpieza y antirreflejo a base de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  al aplicarlos sobre sustratos de vidrio de módulos solares?

### **1.4. Objetivos**

#### ***1.4.1. Objetivo General***

Producir un recubrimiento nanoestructurado con  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  mediante el método sol-gel y la relación entre las propiedades microestructurales y el comportamiento de la transmitancia a través del material.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Sintetizar soles estables de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  teniendo en cuenta el efecto de la concentración de los precursores, la naturaleza de los mismos y la concentración molar.
- Conformar recubrimientos de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  sobre sustratos de vidrio de prueba mediante la técnica de inmersión.
- Caracterizar estructuralmente las películas obtenidas para evaluar las propiedades de resistencia mecánica, ópticas y de autolimpieza y así encontrar correlaciones entre los resultados conforme a la variación de los parámetros de fabricación del recubrimiento y la variación de los parámetros de conformación del Sol.

### **1.5. Justificación**

La alta transmitancia en la eficiencia de los módulos solares es uno de los factores de más importancia, debido a que; a mayor transmisión de energía solar, mayor es la obtención de energía eléctrica, por ende, se hace hincapié en los factores contaminantes que disminuyen la eficiencia. Para dar solución a este problema se busca desarrollar películas sobre sustratos de vidrio en módulos solares, estos recubrimientos deben tener un espesor a nano escala, ya que se podría tener la posibilidad de generar propiedades deseadas como autolimpieza y antirreflectancia. La obtención de los recubrimientos por el método sol-gel ofrece un entorno de fabricación sencillo, alta uniformidad en las películas delgadas y bajo costo.

La implementación de este proyecto podría conllevar a disminuir la reflexión en la superficie de los paneles fotovoltaicos y ahorrar costos de mantenimiento. Para la

obtención de dichas propiedades de antirreflectancia y autolimpieza, es necesario determinar la composición de los materiales. En busca de generar propiedades antirreflectantes es posible optar por el dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), gracias al bajo índice de refracción en sus superficies porosas que facilitan la transmisión de luz. Además, podrían poseer excelentes propiedades superhidrófilas y autolimpiantes debido a la presencia de una gran cantidad de Grupos Hidroxilos (-OH) en la superficie (Yuan, Yan, Xiao, & Hu, 2020). Los recubrimientos antirreflectantes de sílice catalizada por base poseen casi el 100% de transmitancia (Lin, Zheng, Yan, & Zhang, 2017), pero estos al tener una baja resistencia mecánica y a la humedad, requiere de otro compuesto que resuelva dichos problemas y además sea autolimpiante. El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se podría considerar prometedor como material humectante "fotosensible" después del descubrimiento de su comportamiento superhidrófilo fotoinducido (Padmanabhana & John, 2020). La propiedad de autolimpieza del  $\text{TiO}_2$  es proporcionada por dos fenómenos fotoinducidos. La primera es la fotocatalisis, en la que los contaminantes orgánicos adsorbidos en la superficie de la película se descomponen bajo luz ultravioleta. Esta propiedad permite aplicar  $\text{TiO}_2$  en sistemas de superficies autolimpiables. El segundo es la superhidrofilicidad fotoinducida, en la que los contaminantes y la suciedad son eliminados de la superficie por la película de agua sobre ella (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015), esto se debe mediante la iluminación UV del  $\text{TiO}_2$  que facilita la propagación y el flujo de las gotas de agua en la superficie, lo que también promueve el proceso de autolimpieza (Yuan, Yan, Xiao, & Hu, 2020). Los recubrimientos compuestos de  $\text{TiO}_2$  /  $\text{SiO}_2$  podrían superar estas limitaciones, ralentizando el aumento del ángulo de contacto del agua en ambientes oscuros y

presentando una mayor transmitancia con respecto al  $\text{TiO}_2$ , que es fundamental para la aplicación como superficie autolimpiante en el área de la energía solar (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015).

El aprovechamiento de la energía solar en muchos países ha generado buen impacto ambiental y social. En un informe de la Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM) afirma que, con la incorporación de energías renovables no convencionales, en Colombia se aumentará 50 veces su capacidad instalada para la generación de energía solar y eólica, al pasar de menos de 50 MW (mega watts) en 2018 a más de 2.500 MW (mega watts) en 2022 (ACIEM, 2020). El promedio de radiación solar de Colombia es de  $4,5 \text{ kWh } m^{-2} \text{ día}^{-1}$ , y el promedio mundial de  $3,9 \text{ kWh } m^{-2} \text{ día}^{-1}$  ( Sepúlveda Mora, Galban Pineda, & Contreras Sepúlveda, 2018). Por esto, se hace necesario buscar soluciones en el campo de ingeniería que permitan en este caso optimizar sistemas fotovoltaicos, generar competitividad a nivel nacional e internacional e incentivar a la investigación sobre las energías fotovoltaicas en Colombia.

## **1.6. Alcance**

En este proyecto se desarrolló la síntesis de los nanocompuestos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  para desarrollar un recubrimiento autolimpiante, con estabilidad en la transmitancia y a escala de laboratorio, con el fin de evaluar las propiedades de resistencia mecánica, ópticas, autolimpieza y de fotocátalisis. Contextualizando en el campo de energía renovables para una proyección industrial de recubrimientos que maximicen la eficiencia de la transmisión de energía a largo plazo de los sistemas de paneles solares fotovoltaicos.

## **1.7. Limitaciones y delimitaciones**

### ***1.7.1. Limitaciones***

El evaluar las propiedades autolimpiantes del recubrimiento obtenido, trae consigo la necesidad de realizar la síntesis y caracterización de los nanocompuestos en un laboratorio que tenga los equipamientos necesarios. La Universidad Francisco de Paula Santander cuenta algunos de los equipos y reactivos necesarios y además se cuenta con el apoyo de la red de investigación que permitirá solventar este inconveniente.

Otra limitante es evaluar las propiedades directamente sobre los sustratos de vidrio de los paneles solares, ya que se necesitaría de gran cantidad de reactivos, de otro tipo de deposición del recubrimiento en superficies de gran tamaño y además se requiere de un largo plazo para evaluar su eficiencia, por ende, el proyecto se torna en hacer un estudio preliminar a escala de laboratorio sobre sustratos de vidrio de prueba y de allí estimar las propiedades autolimpiantes, fotocatalíticas, ópticas y de resistencia mecánica.

### ***1.7.2. Delimitaciones***

- **Delimitación espacial**

Este proyecto se llevará a cabo en el laboratorio de Materiales Cerámicos Avanzados adscrito al Centro de Investigación de Materiales Cerámicos -CIMAC de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede central, de la ciudad de Cúcuta, departamento de Norte de Santander.

- **Delimitación temporal**

El desarrollo del proyecto se programó para 7 meses después de la aprobación por parte del comité curricular de ingeniería mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander.

- **Delimitación conceptual**

- Nanotecnología.
- Energías renovables.

## **2. Marco referencial**

En este segmento, se definen aquellos conceptos que se deben tener en cuenta para el desarrollo del trabajo de grado y dejar claro todos aquellos conceptos mencionados en los capítulos.

### **2.1. Antecedentes**

Al desarrollar este proyecto de investigación titulado “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS CON  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  PARA SUSTRATOS DE VIDRIO EN APLICACIONES DE MÓDULOS SOLARES”, es importante tener estudios previos al obtener recubrimientos multifuncionales con materiales específicos y resultados óptimos, que se han realizado con anterioridad de manera experimental, en el artículo de (Chaoyou & Lin, 2020) titulado “Fabrication of multifunctional closed-surface  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  antireflective thin films” donde hablan acerca de los procesos necesarios para la obtención de películas multifuncionales.

Los investigadores (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015) en su artículo llamado “Superhydrophilic self-cleaning surfaces based on  $\text{TiO}_2$  and  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  composite films for

photovoltaic module cover glass” desarrollaron un recubrimiento con alta transmitancia, autolimpieza, buena resistencia a la abrasión y a la adherencia, al sintetizar compuestos de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  que contienen diferentes contenidos de titanio compararlo con películas de  $\text{TiO}_2$  puro en relación a la adherencia, transparencia e hidrofiliidad mediante la técnica de recubrimiento por inmersión sol-gel.

Se puede observar en la investigación de Chaoyou Tao, Xinshu Zou, Kai Du, Guorui Zhou, Hongwei Yan, Xiaodong Yuan, Lin Zhang en su artículo “Fabrication of robust, self-cleaning, broadband  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  doublelayer antireflective coatings with closed-pore structure through a surface sol-gel process” de la fabricación de revestimientos híbridos de  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  multifuncionales mediante un método de calcinación y de sol-gel simple y eficaz provocando un índice de refracción bajo mediante la incorporación controlada de  $\text{TiO}_2$  en los nanoporos de  $\text{SiO}_2$ . Al optimizar el índice de refracción del recubrimiento, los sustratos de vidrio con recubrimientos híbridos presentaron una transmitancia alta, también exhibieron hidrofilia, actividad fotocatalítica, robustez mecánica y la durabilidad funcional. (Tao, y otros, 2018)

En el artículo “The effect of  $\text{SiO}_2$  on  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  composite film for self-cleaning application” los investigadores Manying Zhang, Lei E, Ruirui Zhang, Zhifeng Liu discutieron enfáticamente los efectos del rendimiento de  $\text{SiO}_2$  en las películas compuestas de  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$ . Informando así sobre la preparación de películas compuestas de  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  superhidrófilas ópticas transparentes sobre sustratos de vidrio mediante el método sol-gel para aplicaciones de autolimpieza (Zhang , E, Zhang , & Liu, 2018).

Por último, se evidencia en el estudio de Mustapha Boutamart, Samir Briche, Khalid Nouneh, Salah Rafqah, and Yahya Agzenai por medio de su artículo “Transparent and Self-Cleaning Surfaces Based on Nanocomposite Sol-Gel Coatings”. En este estudio, se

prepararon revestimientos transparentes anti-empañantes y autolimpiantes de nanocompuestos basados en nanopartículas de  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  similares a una esponja sobre un sustrato de vidrio mediante el proceso sol-gel, utilizando técnicas de revestimiento por centrifugado y pistola de pulverización para revestir superficies de vidrio pequeñas y grandes. ( Boutamart, Briche, Nouneh, Rafqah, & Agzenai, 2020).

## **2.2. Marco teórico**

### ***2.2.1. Eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos.***

La utilización de energía solar para generar electricidad en plantas de energía fotovoltaica a gran escala, se convirtió en una tendencia como una nueva opción adoptada por muchos países. La instalación óptima de plantas de energía fotovoltaica depende de la ubicación geográfica, que especifica la irradiación, latitud, longitud, ángulo de inclinación, orientación, etc. Sin embargo, el panel fotovoltaico se ve afectado por muchos parámetros ambientales, lo que tiene un impacto significativo en la productividad de la energía, conversión eficiencia y costo de la energía. Entre estos factores de las condiciones climáticas que afectan negativamente el rendimiento de las células fotovoltaicas se encuentra la acumulación de polvo y contaminantes en la superficie de la célula, que actúa como una barrera para los rayos ultravioleta incidentes (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019). El promedio de los paneles solares en el mercado hoy en día funciona con una eficiencia de alrededor del 15-20% y las pérdidas adicionales debidas a la suciedad se han convertido en problemas más comunes en áreas sustancialmente contaminadas debido a la cobertura de polvo en los paneles solares. La limpieza regular de los módulos solares se hace indispensable, pero esto puede conllevar a una limpieza abrasiva del vidrio, lo que puede dar lugar a un mayor desarrollo de los arañazos en los paneles de vidrio (Alam, y otros, 2019).

### ***2.2.2. Cubierta de vidrio del panel solar***

El vidrio se usa ampliamente en módulos solares para proteger los dispositivos activos de condiciones ambientales adversas, por ejemplo, tormentas de polvo, humedad, fuertes lluvias, viento, etc. La alta transmitancia de las superficies de vidrio permite que la luz solar llegue al interior de los módulos solares al máximo. Luego, la luz solar absorbida por las células solares se puede convertir en energía eléctrica de manera efectiva. Sin embargo, las condiciones ambientales externas suelen ser duras, ya que el polvo en el medio ambiente plantea un problema grave. La deposición de partículas de polvo en las superficies de los módulos solares reducirá la transmitancia de las cubiertas protectoras, lo que da lugar a disminuir la eficiencia de la conversión fotoeléctrica debido a la reflexión y absorción de la luz por las partículas de polvo acumuladas. Además, los plásticos tienen una degradación más rápida de la transmitancia con respecto al vidrio, por eso se prefiere usar vidrio en los sistemas solares (Quan & Zhang, 2017)

### ***2.2.3. Características del polvo***

Polvo es un término que se refiere a materiales suspendidos y esparcidos por el aire, como partículas de suelo (que forman la mayor parte del polvo suspendido en el aire), humo de las plantas de energía eléctrica, cocinas, automóviles, niebla y material particulado de quema de combustibles fósiles, energía eléctrica o vehículos y mecanismos de motor. Las sustancias suspendidas en el aire también se forman a partir de materia orgánica como bacterias y polen, inorgánica provenientes de las tormentas de arena, humo de fábricas, incendios forestales y vapores de volcanes. Algunos de estos componentes del polvo consisten partículas sólidas muy pequeñas que pueden permanecer suspendidas en el aire durante largos períodos de tiempo. La intensidad del polvo varía a medida que aumenta la velocidad del viento y se calienta la superficie por el sol. El polvo sigue la densidad del tipo de tierra que lo atraviesa o se eleva, y

sus efectos no son con la misma frecuencia, existen otras influencias secundarias como la humedad o la desviación del viento o las depresiones o altitudes del aire (Quan & Zhang, 2017)

#### ***2.2.4. Factores que afectan la deposición de polvo***

La tasa de deposición de polvo y las propiedades del polvo varían de un sitio a otro en todo el mundo. La deposición de polvo es función de numerosos factores, pero principalmente la influencia de factores ecológicos como la velocidad del viento, la dirección del viento, la temperatura, las propiedades del polvo, la humedad, la lluvia y los factores de instalación como el ángulo de inclinación, la orientación, la altura y el frente, la superficie del módulo fotovoltaico y la ubicación del lugar de instalación (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

#### ***2.2.5. Velocidad y dirección del viento***

El viento juega un papel importante en la deposición y eliminación de polvo de la superficie del módulo solar fotovoltaico. El viento se comporta como un agente transportador de polvo. El viento lento puede provocar la deposición de polvo, mientras que el viento de alta velocidad puede limpiar la superficie del módulo solar. La tasa de deposición de polvo depende de la atención del polvo transportado por el aire y su velocidad. La tasa de deposición de polvo será mayor con la alta concentración de polvo en el aire y viceversa (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

#### ***2.2.6. Temperatura y humedad***

La variación de temperatura influye en el proceso de acumulación de polvo de dos formas: variación de la temperatura ambiente y variación de la temperatura de la superficie frontal del módulo fotovoltaico. A alta temperatura ambiente, la humedad del área circundante del lugar de instalación se está reduciendo, el clima local se vuelve seco. El área cerca del mar, donde la

temperatura es baja, puede tener un alto nivel de vapor que se condensará en gotas de agua en la superficie del módulo fotovoltaico, lo que hará que la superficie del módulo fotovoltaico se vuelva más adhesiva y pegajosa, atraiga más partículas de polvo del aire (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

### ***2.2.7. Humedad***

La humedad influye de manera extrema en la fuerza de adhesión entre los elementos de polvo y la superficie del módulo fotovoltaico. Los países cercanos al océano tienen alta humedad, como consecuencia aumenta la pegajosidad de los elementos de polvo en la superficie superior del módulo fotovoltaico. También se observa que un aumento de la humedad relativa del 40% al 80% conduce a un aumento de la adhesión de aproximadamente el 80%. Aparte de esto, la alta humedad relativa crea el desarrollo de capas de polvo de refuerzo y adhesivo en la superficie del módulo fotovoltaico (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

### ***2.2.8. Lluvia***

La lluvia afecta significativamente el proceso de deposición de polvo. Una lluvia ligera de menor duración puede incrementar la deposición de polvo. En caso de lluvia de poca intensidad, las gotas de agua pueden acumularse con partículas en el aire, lo que hace que la superficie del módulo se vuelva polvoriento. La lluvia intensa puede ensuciar la superficie superior del módulo fotovoltaico (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

### ***2.2.9. Excrementos de aves***

Los fenómenos de excrementos de pájaros aumentan la acumulación de polvo en la superficie del módulo fotovoltaico. En los desiertos, la deposición de polvo se considera el factor principal, los excrementos de aves aceleran el proceso de deposición de polvo. Este material orgánico no

solo impide que la luz solar llegue a la celda, sino que también proporciona la adherencia para las partículas de polvo (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

#### ***2.2.10. Lugar de instalación y tiempo de exposición***

La deposición de polvo depende principalmente del lugar de instalación. El sitio de instalación pertenece a la zona desértica; la tasa de deposición de polvo es muy alta. Si el módulo fotovoltaico se instala en el área urbana y rural, la tasa de deposición de polvo en el área urbana y rural es diferente, porque la temperatura del aire de la ciudad es más alta que la temperatura circundante del campo y la velocidad del viento en las zonas de la ciudad es típicamente más baja que en la región rural (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

#### ***2.2.11. Limpieza en paneles solares***

La limpieza de estos contaminantes orgánicos de la superficie requiere una gran cantidad de mano de obra, un gran uso de productos químicos y un uso abundante de agua. Aparte de estos desafíos, la limpieza normal podría deteriorar la superficie de los paneles solares si no se realiza con cuidado. La limpieza inadecuada suele provocar arañazos y cicatrices en los paneles fotovoltaicos (Gupta, Sharma, Pachauri, & Dinesh Babu, 2019).

#### ***2.2.12. Métodos de limpieza de los paneles fotovoltaicos***

Hay muchos métodos de limpieza fotovoltaica, incluidos el uso manual, mecánico, químico, electrostático e incluso humano y algunos de estos métodos pueden ser efectivos en algunas áreas, pero pueden no serlo en otras regiones, algunos de estos métodos son:

- Limpieza natural con lluvia y viento

(Kazem, Chaichan, Al-Waeli, & Sopian, 2020) afirma que “en la limpieza natural, el agua de lluvia que cae sobre la superficie del panel solar inclinada se utiliza ya que los paneles generalmente se fijan en un ángulo de inclinación para permitirles capturar la irradiación óptima. Una de las desventajas de este método es que no limpia completamente el panel solar ya que este proceso de limpieza deja atrás el polvo adherido a la superficie del panel solar resultante de su interacción con la humedad de la atmósfera. Estas moléculas de adhesión generalmente requieren una fuerte lluvia para eliminarlas”. Hay dos formas en que el viento puede afectar la acumulación de polvo: en primer lugar, soplando polvo en las platinas y, en segundo lugar, soplando polvo o soplando lluvia para lavar el polvo. Una posible explicación para las observaciones es que el viento mismo sopla más polvo en los portaobjetos que fuera de él (por lo que hay polvo que impacta la transmisión en los portaobjetos inclinados a  $90^\circ$ ). Esto podría significar que, en ausencia de lluvia, las platinas que enfrentan el viento tendrían la mayor cantidad de polvo. Sin embargo, la lluvia quita el polvo, aunque nunca por completo. Dado que las gotas de lluvia son más pesadas que el polvo, un viento más débil puede no ser capaz de soplar las gotas de lluvia de manera efectiva, mientras que aún puede soplar polvo. En otras palabras, el efecto de la lluvia arrastrada por el viento sobre la eliminación del polvo es mayor que el efecto de la acumulación de polvo arrastrado por el viento (Yun Hee, Verma Kumar, James Danner, Yang, & Singh Bhatia, 2012).

- Limpieza de agua

En este método se canaliza una manguera del agua que fluye a la superficie del panel solar para extraer las partículas de polvo acumuladas. Este método requiere grandes cantidades de agua y el uso de bombas para lograr la alta presión que se requiere. En los

métodos modernos, el agua comprimida a veces se mezcla con un agente de limpieza especial que ayuda a eliminar el polvo de manera más eficaz. El agua también es útil en la refrigeración fotovoltaica y es muy similar a limpiar la fotovoltaica con agua de lluvia. La desventaja de este método es la dificultad de utilizar agua en zonas escasas. También provoca una gran pérdida de agua, además de la posibilidad de provocar deposición química en los bordes fotovoltaicos. El uso de bombas de agua con alta presión significa consumir parte de la energía fotovoltaica generada, lo que significa reducir la eficiencia; También existe el riesgo de que se bloqueen las tuberías de agua o se rompan, además de la posibilidad de un choque térmico al caer el agua, que seguramente estará más fría que la superficie de la placa. La limpieza fotovoltaica generalmente se realiza al mediodía después de la puesta del sol, y como estos fotovoltaicos se dejan mojados para secar, existe el riesgo de atraer más partículas de polvo para acumularse (Yun Hee, Verma Kumar, James Danner, Yang, & Singh Bhatia, 2012).

- Limpieza manual

En este enfoque, los paneles solares se limpian del polvo y la suciedad acumulados utilizando una técnica como limpiar las ventanas de los edificios mediante el uso de cepillos con cerdas suaves que pueden evitar rayar la superficie limpia. En estos cepillos existe la posibilidad de suministro directo y continuo de agua de lavado. Esto puede considerarse mejor que limpiar la fotovoltaica con agua de lluvia o agua comprimida. Sin embargo, existe la posibilidad de que el contacto directo con la superficie del panel solar pueda causar lodo, ya que no se puede garantizar que el movimiento de los cepillos y su presión sobre la superficie de la pintura tengan la misma presión a lo largo del área del panel solar. Este método es caro en comparación con los métodos anteriores porque

requiere mano de obra especializada (Yun Hee, Verma Kumar, James Danner, Yang, & Singh Bhatia, 2012).

- Limpieza mecánica

De los métodos anteriores, en ocasiones es necesario el uso de dispositivos mecánicos como motores o robots para operar cepillos o escáneres, además del uso de filtros de agua de alta presión con un tanque de almacenamiento de agua la limpieza fotovoltaica requiere una limpieza periódica una vez a la semana durante los días secos, y esta limpieza se incrementa a una limpieza diaria en las condiciones de acumulación de polvo a tasas elevadas. En la limpieza mecánica, el sistema se controla mediante un controlador preciso con la ayuda de sensores. Este método puede considerarse muy útil en el caso de que la limpieza con agua no sea posible. Aunque es posible utilizar agua, el contacto directo de los cepillos con el peso de los dispositivos mecánicos puede provocar raspaduras de las superficies de los paneles limpios. En este método, el consumo de energía es mayor que cualquiera de los otros métodos de limpieza mencionados anteriormente, y las piezas mecánicas utilizadas necesitan mantenimiento (Yun Hee, Verma Kumar, James Danner, Yang, & Singh Bhatia, 2012).

- Pantallas eléctricas (EDS)

La pantalla electrodinámica (EDS) en un panel solar puede garantizar la eliminación automática y continua del polvo seco acumulado sin el uso de agua o partes mecánicas móviles (Mazumder et al., 2006). Este método de eliminación depende de la conversión del polvo en polvo activo y utiliza un campo eléctrico de suministro de alto voltaje para generar electricidad en una pantalla que carga las partículas de polvo y facilita su

eliminación moviéndolas sobre el borde de la superficie de la placa. Los investigadores encontraron que mediante el uso de este método se puede eliminar el 90% del polvo acumulado dentro de los dos minutos de funcionamiento del sistema. Este método se caracteriza por su rapidez para eliminar el polvo en comparación con otros métodos; su consumo de energía es limitado y no requiere un sistema de control complejo, ya que el sistema se controla mediante un pequeño controlador conectado a sensores. Una posible desventaja de este sistema es la posibilidad de degradación de la pantalla debido a la irradiación ultravioleta. El sistema también necesita suministro de alto voltaje para generar el campo eléctrico, lo que reduce la eficiencia de generación en un 15%.

- **Ultrasónico autolimpiante**

En esta técnica de limpieza, se utiliza ultrasonido estándar de alta frecuencia (por encima de la audición humana, hasta 20 kHz) para eliminar algunos de los contaminantes que se sumergen en medios de agua, como la suciedad, aceite, grasa, compuestos de pulido y agentes de desmoldeo. Los materiales que se pueden limpiar en este método incluyen metales, vidrio, cerámica, etc. El proceso se lleva a cabo a través de la formación de la llamada cavidad, ya que se forman burbujas en tamaño de micra y crecen debido a ondas de presión positiva y negativa alternativamente (Kazem, Chaichan, Al-Waeli, & Sopian, 2020).

- **Revestimientos superhidrofóbica**

(Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019) informa que un revestimiento superhidrofóbico “se conoce por tener un alto ángulo de contacto con el agua  $> 150^\circ$  donde las gotas de agua se deslizan fácilmente de la superficie con un ángulo de deslizamiento inferior a  $10^\circ$  para eliminar los contaminantes de la superficie.

Este fenómeno se conoce como el "efecto Lotus", y ocurre en las hojas de las plantas. La aspereza en los sólidos intrínsecamente hidrófobos reduce el área efectiva de contacto trifásica (vapor-líquido-sólido) y, por lo tanto, aumenta el ángulo de contacto con el agua y la movilidad de las gotas de agua. Las superficies artificiales superhidrofóbicas están inspiradas en la hoja de loto y se preparan con una combinación de estructura rugosa a micro y / o nanoescala utilizando materiales hidrofóbicos de baja energía superficial. Esto se puede lograr empleando dos estrategias: ya sea creando estructuras jerárquicas (micro y / o nanoestructuras) sobre sustratos hidrófobos, o modificando químicamente la superficie estructurada jerárquica con material (s) de baja energía superficial. Para aplicaciones prácticas en paneles solares, es importante que el recubrimiento superhidrofóbico sea mecánicamente duradero contra el desgaste, el cizallamiento y la adhesión de hielo".

- Revestimientos superhidrófilos

Los recubrimientos superhidrófilos exhiben una de las mejores propiedades de autolimpieza con un ángulo de contacto con el agua de tan solo  $\sim 5^\circ$ . Facilitan la humectación / difusión completa de las gotas de agua sobre ellos, que a su vez transportan suciedad en el seguimiento. Los recubrimientos de esta naturaleza son más adecuados para aplicaciones de paneles solares ya que son más lisos a diferencia de las superficies superhidrofóbicas más rugosas. Los recubrimientos más lisos brillan más que los más ásperos y, por lo tanto, no contribuyen mucho a la pérdida de reflejo y eventualmente aumentan la transmisión de luz y la eficiencia de conversión de energía. Se ha comprobado que los recubrimientos superhidrófilos son beneficiosos para los módulos solares de dos maneras; en primer lugar, asegurando la autolimpieza y, en

segundo lugar, protegiendo los módulos fotovoltaicos de la pérdida de reflexión (Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019).

### **2.2.13. *Síntesis de nanomateriales***

La síntesis de nanopartículas se puede realizar mediante tres enfoques diferentes. Son los siguientes.

- Métodos biológicos
- Métodos físicos
- Métodos químicos

El método biológico es simple y fácil, generalmente de un solo paso, ecológico. En este contexto, se puede utilizar los microorganismos y también las diferentes partes de la planta para la preparación de los nanomateriales (Kolahalam, y otros, 2019)

### **2.2.14. *Método sol – gel***

El proceso sol-gel es un método de solución versátil para fabricar recubrimientos inorgánicos que implica la transición de un "sol" líquido, que se encuentra principalmente en forma coloidal a una fase sólida de "gel". Los soles y geles tienen superficies extremadamente altas. Los precursores utilizados en la preparación del "sol" suelen ser compuestos organometálicos como alcóxido metálico / sales metálicas inorgánicas. El "gel" resultante se puede verter directamente sobre los sustratos y calentar para obtener recubrimientos de película fina. Las composiciones químicas de la superficie, el tamaño y la morfología de las películas se pueden ajustar ajustando la composición de la solución precursora, usando el tipo correcto de tensioactivo en la concentración adecuada y controlando el alcance de los procesos de hidrólisis y policondensación. El proceso de sol-gel de superficie es uno de los varios métodos modificados

extraídos del proceso de sol-gel convencional, que ha demostrado ser favorable para la fabricación de superficies con superhumectabilidad (Padmanabhana & John, 2020).

### ***2.2.15. Humectabilidad***

La humectabilidad juega un papel importante en la decisión de la propiedad de autolimpieza de una superficie sólida, que se rige por la composición química y la morfología de la superficie. Se han utilizado varios métodos químicos y físicos para mejorar el ángulo de contacto con el agua, que incluyen la modificación química de la superficie para reducir su energía superficial y controlar la rugosidad de la superficie (Ganbavle, Bangi, Latthe, Mahadik, & Venkateswara Rao, 2011).

### ***2.2.16. Nanomateriales a base de metal***

Los materiales de partida de los nanomateriales metálicos son iones metálicos divalentes y trivalentes. Existen diferentes métodos para la preparación de nanopartículas metálicas como métodos químicos o fotoquímicos. Mediante el uso de agentes reductores, los iones metálicos se reducen a nanopartículas metálicas. Estos tienen una gran superficie y tienen la buena capacidad de adsorción de moléculas pequeñas. Son ampliamente utilizados en diferentes áreas de investigación, estudios ambientales y de bioimagen. No solo se puede lograr una única nanopartícula, sino también la mezcla de dos o más nanopartículas con el control de tamaño. Dopando diferentes metales, incluso los metales de las tierras raras pueden cambiar las características principales de los elementos. Al dopar diferentes elementos en diferentes constituciones, sus propiedades también varían (Ganbavle, Bangi, Latthe, Mahadik, & Venkateswara Rao, 2011).

### **2.2.17. Caracterización de nanomateriales**

Las nanopartículas exhiben diferentes propiedades fisicoquímicas. Al variar su tamaño e incluso una pequeña dimensión en nanoescala, exhibirán propiedades diferentes. Para examinar sus propiedades, la caracterización de las nanopartículas se quiere hacer con diferentes instrumentos. Son espectrofotómetro UV, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de barrido (SEM), magnetómetro de muestras vibratorias (VSM), dispositivo de interferencia cuántica superconductora (SQUID), espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS), espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS), microscopia de fuerza magnética (MFM), espectroscopia Mossbauer (MS), resonancia paramagnética electrónica (EPR) y termo Análisis gravimétrico (TGA) (Kolahalam, y otros, 2019)

### **2.2.18. Recubrimientos multifuncionales**

Cubrir recubrimientos antirreflectantes es un tipo de forma efectiva, que puede reducir el reflejo de la luz incidente. Se investigan los materiales comunes de recubrimientos antirreflectantes, incluidos el óxido de grafeno, ZnO, MgF<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, polielectrolito, SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>-polielectrolito, SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>-MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc. Los ARC pueden prepararse mediante varios métodos, como la pulverización catódica con magnetrón, la deposición de la capa atómica, la evaporación del haz de electrones, el sol-gel, la deposición química de vapor y la deposición química de vapor mejorada con plasma. Todos estos métodos se fabrican para producir películas de espesor uniforme y buenas propiedades ópticas. Pero, los métodos más mencionados no son adecuados para las técnicas de producción en masa continua

en celdas solares de bajo costo debido a las condiciones estrictas, procesos de pasos complejos y materiales costosos. Sin embargo, sol-gel es atractivo debido a su bajo costo y producción a gran escala; La técnica sol-gel ofrece un proceso simple y de bajo costo para preparar películas delgadas de alta calidad con índice de refracción y estructura porosa. Las plantas de energía solar fotovoltaica a gran escala generalmente están expuestas a ambientes hostiles como altas temperaturas, alta humedad y polvo, lo que resulta en la transmisión perjudicial de los recubrimientos antirreflectantes. Por lo tanto, con el fin de optimizar el rendimiento para resistir en todo tipo de clima durante mucho tiempo, existe la necesidad de aumentar las resistencias a la intemperie y a la corrosión con una propiedad antirreflectante óptica mediante un proceso de sol-gel modificado. De la literatura, las películas antirreflectantes con proceso sol-gel se pueden usar para obtener otras propiedades funcionales, incluyendo resistencia a ácidos y álcalis, resistencia al daño por láser, súper hidrofóbico, súper hidrofílico, autolimpieza, UV-Estabilidad, resistencia a la abrasión, etc... (Sun, y otros, 2020)

### ***2.2.19. Recubrimiento antirreflectante***

Para reducir los reflejos interfaciales no deseados de una superficie, los recubrimientos antirreflectantes se han utilizado con frecuencia en dispositivos optoelectrónicos y relacionados con la energía, como células solares, pantallas de visualización o láseres. En los últimos veinte años, el mercado de estos recubrimientos con una variedad de especificaciones ha aumentado significativamente. Por ejemplo, además de las propiedades antirreflectantes, estos recubrimientos también deben exhibir funciones como antiempañamiento, fácil de limpiar y antirrayas. Una sola capa de un material de revestimiento transparente antirreflectante con un espesor de un cuarto de longitud de onda sobre un sustrato de vidrio puede aumentar la transmitancia de la luz solar en una amplia banda de longitudes de onda. El índice de refracción

se puede variar controlando la cantidad de porosidad en la capa. Una de las formas más fáciles y rentables de alcanzar el índice de refracción deseado es utilizar SiO<sub>2</sub> poroso. Las propiedades fotocatalíticas del TiO<sub>2</sub> lo convierten en un material prometedor para vidrios autolimpiantes, pero su índice de refracción más alto aumenta la reflexión ( Jilavi, Mousavi, Müller, & de Ol, 2017).

### **2.2.20. TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>**

Desde el punto de vista práctico, un buen recubrimiento autolimpiante basado en TiO<sub>2</sub> debe poseer una alta transmitancia, una alta actividad fotocatalítica, una excelente humectabilidad por el agua, una fuerte adhesión a la superficie del sustrato y una buena resistencia al desgaste. El TiO<sub>2</sub> tiene un índice de refracción elevado ( $n \approx 2,52$  para anatasa) y, por tanto, puede reflejar una gran parte de la luz incidente. Se ha encontrado que la introducción de SiO<sub>2</sub> puede incrementar la transmisión de luz visible debido al bajo índice de refracción, prevenir cualquier posible ataque químico y mejorar las propiedades mecánicas del recubrimiento, haciendo que la película sea más adherente y robusta (Ren, y otros, 2020). Las películas delgadas de TiO<sub>2</sub> tienen una excelente transmisión óptica en las regiones visible e infrarroja cercana. Secuencialmente, las películas delgadas de SiO<sub>2</sub> se utilizan a menudo como una capa con un índice de refracción bajo y una transmitancia óptica muy buena. Los recubrimientos de múltiples capas son más efectivos en todo el espectro visible. Recientemente, estudios de recubrimientos de dos y múltiples capas de TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> principalmente concentrada en la propiedad antirreflectante. La estructura multicapa exhibe el desempeño diseñado al combinar capas de índice de refracción alto y bajo de manera apropiada (Kim, Yadav, & Kim, 2016).

La aplicación de titanía (TiO<sub>2</sub>) en películas delgadas de SiO<sub>2</sub> se considera una forma prometedora de mejorar la durabilidad y la robustez de las películas delgadas antirreflectantes

debido a su rendimiento altamente interesante, que incluye superhidrofilicidad fotoinducida, actividad fotocatalítica, alta dureza, función antibacteriana, etc. (Yao, He, Genga, & Ren, 2015)

### ***2.2.21. Deposición por Dip-coating***

En el recubrimiento por inmersión, el sustrato normalmente se retira verticalmente del baño de recubrimiento a una velocidad constante. El sustrato en movimiento arrastra el líquido en una capa límite mecánica fluida que se divide en dos por encima de la superficie del baño de líquido, devolviendo la capa exterior al baño. Dado que el solvente se está evaporando y drenando, la película fluida adquiere una forma aproximada de cuña que termina en una línea de secado bien definida. Cuando la velocidad de la línea de secado en retroceso es igual a la velocidad de extracción, el proceso está en estado estable con respecto a la superficie del baño de líquido. Para los fluidos ricos en alcohol comunes al recubrimiento por inmersión de sol-gel, las condiciones de estado estacionario se alcanzan en varios segundos (Brinker, Hurd, Schunk, Frye, & Ashley, Review of sol-gel thin film formation, 1992).

### ***2.2.22. Fotocatálisis $TiO_2$***

La fotocatalisis es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador, el proceso foto catalítico producido por un haz de luz en el  $TiO_2$  es necesario que cuente con la energía suficiente para igualar o superar la banda prohibida del semiconductor, según (Lopez, 2011) “se produce mediante la excitación de electrones en la banda de valencia hacia la banda de conducción”, creándose un electrón- hueco, para producirlo se debe aportar energía suficiente para promover el electrón de la banda de valencia a la de conducción, lo que deja este hueco en la banda de valencia; Permitiéndole migrar al catalizador donde quedara atrapado en la superficie para reaccionar con las especies absorbidas

### ***2.2.23. Fotocatálisis Solar en TiO<sub>2</sub>***

El semiconductor de TiO<sub>2</sub> posee la característica de tener una distribución de la radiación incidente de la luz solar según (Lopez, 2011) de la siguiente forma: 7,8% UV, 47,3% RGB y 44,9% NIR; Debido a un aprovechamiento reducido del espectro solar se puede concluir que recibe la radiación de forma directa y difusa.

### ***2.2.24. Banda prohibida de energía (Band gap)***

Los semiconductores son materiales que se caracterizan por tener una conductividad que es directamente proporcional a la temperatura, al contrario de los metales (Travizano, Romano, & Kamienkowski, 2002). La banda prohibida en los semiconductores es un límite de energía necesario para lograr la excitación de electrones desde su estado ligado a un estado libre donde le sea permitido participar en la conducción, La estructura de bandas en semiconductores se da en el eje Y determinada por la energía de los electrones, contando con un nivel de baja energía o banda de valencia y el nivel de energía donde el electrón pueda considerarse en estado libre llamado banda de conducción, esto quiere decir que la banda de energía prohibida es la diferencia entre bandas de energía, lo que indica la energía necesaria mínima para que el electrón se excite y pueda participar en la conducción. En el caso del TiO<sub>2</sub> es equivalente a 3,2 eV en fase anatasa y 2 eV en fase rutilo (Nevarez, Espinoza, Quiroz, & Ohtani, 2017). Se pueden utilizar modelos matemáticos de aproximación para calcular la energía mínima del material con esquemas de la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT), Aproximación de gradiente generalizado (GGA), funcional Perdew-Ernzerhof (PBE), Aproximación Smearing Methfessel-Paxto, método del Tetraedro, entre otros para determinar las bandas prohibidas de los materiales (Campos & Matos, 2014)

### **2.2.25. Superhidrofilia Fotoinducida**

La hidrofiliidad es una propiedad física de una molécula que tiende a interactuar o disolverse con una masa de agua, capaces de formar puentes de hidrógenos normalmente con cargas polarizadas, en materiales o superficies como baldosas esmaltadas y no esmaltadas sometidas a tratamientos térmicos y a irradiación disminuyeron a valores aproximados menores de 5° generando superficies hidrófilas (Raimondo, y otros, 2012).

### **2.3. Marco conceptual.**

- Semiconductor

Los nanomateriales semiconductores tienen propiedades metálicas y no metálicas. Estos son ampliamente utilizados en fotocátalisis, dispositivos electrónicos. (Kolahalam, y otros, 2019)

- Fotocatálisis

Se ha convertido en un método popular para resolver problemas asociados con el agotamiento de la energía y la contaminación ambiental. Un material semiconductor con una banda prohibida intrínseca. Puede absorber energía luminosa y generar cargas, y su rango de respuesta a la luz, propiedades de transferencia de carga y potencial redox están influenciados por la estructura de banda intrínseca. El rango de respuesta a la luz de un semiconductor típico es un parámetro importante que debe entenderse cuando se usa luz solar.  $\lambda_g$  (longitud de onda umbral de la banda de absorción óptica del semiconductor) y su banda prohibida. La fotocátalisis ha recibido una atención significativa como una tecnología que puede resolver problemas energéticos y ambientales globales que son esenciales para el desarrollo sostenible de la sociedad

(Liu, Ma, Wu, & He, 2020).

- Célula solar

Una de las formas más eficientes y prácticas de aprovechar la luz solar como fuente de energía es convertirla en electricidad mediante células solares (Nayak, Mahesh, Snaith, & Cahen, 2019). A diferencia de numerosos dispositivos optoelectrónicos, las células solares funcionan en un área amplia de longitudes de onda, lo que implica que requieren un recubrimiento antirreflejo de banda ancha (Velu Kaliyannan, y otros, 2020).

- Sol

De acuerdo a (González Hernández , Pérez Robles , Ruiz , & Martínez, 2020), “es una dispersión de partículas coloidales en fase líquida que son suficientemente pequeñas para permanecer suspendidas por movimiento Browniano.

- Gel

(González Hernández , Pérez Robles , Ruiz , & Martínez, 2020) informa que “es un sólido consistente de al menos dos fases: una fase sólida que forma una red que atrapa e inmoviliza a una fase líquida”.

- Compuestos

De acuerdo a (Askeland, 1998) es un “grupo de materiales formados a partir de mezclas de metales, cerámicos o polímeros, de manera que se obtengan combinaciones de propiedades poco comunes”.

- Estructura cristalina

“Son arreglos de átomos en un material con un patrón regular repetible” (Askeland, 1998).

- Fase

Ocurre en un material que tiene en todas las partes la misma composición, estructura y propiedades en condiciones de equilibrio (Askeland, 1998).

- Transmitancia

(González, 2010) informa que “se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo”.

“Es la cantidad de luz incidente que se transmite a través de una placa de vidrio, donde se tiene en cuenta la cantidad de luz reflejada en las superficies tanto superior como inferior, así como por la cantidad que se absorbe dentro de la placa” (Smith & Hashemi, 2006).

- Reflexión

Según (Serway & Beichner, 2002) “es el proceso en el cuál un rayo de luz que viaja en un medio encuentra una frontera que conduce a un segundo medio, parte de la luz incidente se refleja, los rayos reflejados son paralelos entre sí. La dirección de un rayo reflejado está en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene el rayo incidente”.

- Refracción

(Serway & Beichner, 2002) informa que “es el proceso en donde un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente encuentra una frontera que lleva a otro medio transparente, parte del rayo se refleja y parte entra al segundo medio. La parte que entra al segundo medio se dobla en la frontera y se dice que se refracta. El rayo incidente, el rayo reflejado y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano”.

- Porosidad

“La porosidad aparente mide los poros interconectados y determina la permeabilidad, es decir, la facilidad con la cual pasan gases y otros fluidos a través del material” (Askeland, 1998).

- Hidrolisis

Según (Flores, Caballero, & Moreira, 2008) “es rompimiento de un enlace por la incorporación de uno de los iones del agua o bien de los dos en los productos de la hidrólisis o en otras palabras es la tendencia de las sales cuando se hallan disueltas en agua a reaccionar con el disolvente e invertir así el proceso de neutralización, se denomina hidrólisis”.

- Condensación

“Es el proceso en el cual se libera una molécula pequeña, como agua o alcohol, y se forman puentes de oxígeno o puentes OH, dando lugar a polímeros lineales más o menos entrecruzados y a moléculas cada vez mayores, en función del tipo de alcóxido” de partida (Rojas Cervantes, 2015).

## **2.4. Marco contextual**

El proyecto de investigación titulado “Síntesis y caracterización de películas nanoestructuradas con  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  para sustratos de vidrio en aplicaciones de módulos solares” se realizará en el laboratorio de Materiales Cerámicos Avanzados adscrito al Centro de Investigación de Materiales Cerámicos -CIMAC de la universidad Francisco de Paula Santander, sede central, de la ciudad de Cúcuta, departamento de Norte de Santander.

## 2.5. Marco legal

### NORMATIVIDAD SOBRE MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL LABORATORIO

En el laboratorio de Química se generan residuos químicos, algunos de ellos considerados peligrosos, cuyo manejo y disposición está sujeto al cumplimiento de normas específicas, ya que representan un riesgo para la salud de la comunidad educativa, el personal de recolección de residuos y de la comunidad en general, además del riesgo ambiental que de ellos se genera. Las normas vigentes sobre este particular y que dan luces de cómo hacer gestión adecuada de residuos son: El Decreto 1076 de 2015 (Título 6 de la Parte 2 del Libro 2) y el Decreto 351 de 2014.

De acuerdo con el Decreto 351 de 2014, “Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades”, estipula que un residuo peligroso es aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se consideran residuos peligrosos los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos (Nacional, 2015).

### NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 6018

#### 0.2 PRINCIPIOS DEL SELLO AMBIENTAL COLOMBIANO PARA PINTURAS Y MATERIALES DE RECUBRIMIENTO

Los criterios ambientales establecidos en esta norma se han definido considerando los siguientes principios del ecoetiquetado:

- El producto o servicio debe hacer un uso sostenible de los recursos naturales que emplea como materia prima o insumo.
- El producto o servicio debe minimizar el uso de materias primas nocivas para el ambiente.
- Los procesos de producción o de prestación de los servicios deben utilizar menos cantidades de energía o hacer uso de fuentes de energía renovables o ambos.
- El producto debe ser fabricado o el servicio se debe prestar haciendo uso de tecnologías limpias o generando un menor impacto relativo sobre el ambiente (MinAmbiente, 2013).

### 3. Diseño metodológico

#### 3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utiliza en este proyecto es INVESTIGACION EXPERIMENTAL con enfoque cuantitativo, la cual se define por “utilizar métodos y técnicas cuantitativas, por ende, tiene que ver con la medición, el uso de magnitudes, la observación y medición de las unidades de análisis, el muestreo y el tratamiento estadístico ( Ñaupas Paitán, Mejía Mejía, Novoa Ramírez, & Villagómez Paucar, 2014).

Esta investigación es de carácter experimental donde; “El término experimento puede tener al menos dos acepciones, una general y otra particular. La general se refiere a tomar una acción y después observar las consecuencias de una acción. La acepción particular que va más de acuerdo con un sentido científico del término, se refiere a un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos

efectos), dentro de una situación de control para el investigador” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 1991).

Este concepto se ajusta mucho a lo que se quiere hacer en nuestra investigación, ya que se pretende realizar un diseño experimental de un recubrimiento nanoestructurado y evaluar las características que se pretenden conseguir.

A continuación, se presentarán las actividades que se realizarán para el cumplimiento de los objetivos específicos planteados.

**Objetivo N°1:** Sintetizar soles estables de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  teniendo en cuenta el efecto de la concentración de los precursores, la naturaleza de los mismos y la concentración molar.

**Actividad 1:** Sintetizar los soles del sistema  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$ , a partir de butóxido de titanio (TBT) ortosilicato de tetraetilo (TEOS) como fuente de sílice.

**Metodología:** Se desarrolla la exhaustiva revisión bibliografía sobre la temática, luego se producirá la síntesis de los soles del sistema  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  por separado, teniendo en cuenta la concentración de los precursores, el pH, la relación de hidrólisis, la viscosidad y el tiempo de envejecimiento.

**Objetivo N°2:** Conformar recubrimientos de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  sobre sustratos de vidrio de prueba mediante la técnica de inmersión.

**Actividad 2:** Realizar el recubrimiento por el método de inmersión, el sustrato se extrae verticalmente de los soles a una velocidad constante.

**Metodología:** Primero se deben limpiar los portaobjetos de vidrio, para posteriormente realizar la deposición en los soles por el método de inmersión, luego se calcinan las muestras en un rango de temperaturas donde se pueda obtener la fase más óptima del  $\text{TiO}_2$ .

**Objetivo N°3:** Caracterizar estructuralmente las películas obtenidas para evaluar las propiedades de resistencia mecánica, ópticas y de autolimpieza y así encontrar correlaciones entre los resultados conforme a la variación de los parámetros de fabricación del recubrimiento y la variación de los parámetros de conformación del Sol.

**Actividad 3:** Caracterizar el recubrimiento depositado sobre el sustrato de vidrio para evaluar la morfología de la superficie, sus propiedades ópticas y autolimpiantes.

**Metodología:** Para la evaluación del recubrimiento se realizará la caracterización de la morfología de la superficie de las películas compuestas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM), por medio del análisis de difracción de rayos X (XRD) se observa la fase del óxido en la que se encuentra, para la transmitancia óptica de las muestras preparadas se utiliza el espectrofotómetro de doble haz UV-Vis, el ángulo de contacto del agua en la superficie de las películas compuestas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  se mide mediante un comprobador del ángulo de contacto (serie DSA) bajo la irradiación de una lámpara de xenón o utilizando un goniómetro conectado a una cámara de video a temperatura ambiente, el espesor y la microestructura de la película se evalúan mediante imágenes de superficie y mediciones de rugosidad RMS utilizando un microscopio de fuerza atómica (AFM).

### 3.2. Universo

En el desarrollo de este proyecto de investigación se va a trabajar en el laboratorio de Materiales Cerámicos Avanzados adscrito al Centro de Investigación de Materiales

Cerámicos -CIMAC, en la Universidad contamos con algunos materiales y equipos y además se cuenta con el apoyo de la red de investigación que permitirá solventar este inconveniente, optando por comprar los reactivos faltantes y la implementación de los equipos con los que no contamos en otras Universidades.

### **3.3. Técnica de recolección de datos**

#### ***3.3.1. Fuentes de información primaria***

Las fuentes primarias que se utilizarán para el desarrollo del proyecto de investigación serán de libros que fundamentan la teoría a cerca de los temas relacionados y de artículos de revista científica donde empleen el método sol-gel, para desarrollen la síntesis y deposición de recubrimientos sobre sustratos de vidrios en paneles solares, esta información se pueden encontrar en la base de datos de la Biblioteca Eduardo Cote Lemus de la Universidad Francisco de Paula Santander, así como también textos de uso personal, tesis, artículos de investigación e información pertinente de diferentes tecnologías de información y comunicación como en los artículos (Zhang , E, Zhang , & Liu, 2018) y (Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015).

#### ***3.3.2. Fuentes de información secundaria***

Esta información que ayudó con el desarrollo del proyecto de investigación referente a temas generales de los recubrimientos, energías renovables y otros estudios que se están desarrollando en el campo de la nanotecnología como en el artículo de revisión de (Brinker, Hurd, Schunk, Frye, & Ashley, Review of sol-gel thin film formation, 1992), también se tomó información de libros que ayudaron a la estructura de la redacción del proyecto de investigación como en los libros (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 1991) y ( Ñaupás Paitán, Mejía Mejía, Novoa Ramírez, & Villagómez Paucar, 2014).

## **4. Desarrollo de la propuesta**

### **4.1. Recolección de información.**

Se determinaron los parámetros en los que se desarrolló el proyecto, de acuerdo a la base de datos en procedimientos experimentales de otros proyectos y de acuerdo a la norma de seguridad y manejo de sustancias en laboratorios.

### **4.2. Síntesis de los soles por separado.**

De acuerdo a la información obtenida de la naturaleza de los compuestos y la finalidad de las propiedades a adquirir, se realizó por separado la síntesis de los soles en busca de su estabilidad química.

### **4.3. Deposición de las películas sobre el sustrato de vidrio.**

Se realizó el proceso de limpieza de los sustratos de vidrio antes de depositar la película, posteriormente se aplicó el método de recubrimiento por inmersión a velocidad de extracción constante, con el fin de determinar la correlación entre propiedades ópticas y de autolimpieza aportadas, finalmente se realizó la calcinación de las muestras para eliminar los grupos residuales orgánicos.

### **4.4. Caracterización estructural del recubrimiento.**

Se caracterizó el recubrimiento para obtener sus propiedades morfológicas, de estructura cristalina, adherencia, ángulos de contacto y la transmitancia obtenida por los vidrios después de su tratamiento.

#### **4.5. Evaluación de los resultados.**

Se recopiló la información suministrada de los equipos de caracterización de los vidrios en su estado inicial y después de su proceso de recubrimiento, donde se evaluaron los datos de acuerdo a las propiedades mecánicas, de transmitancia y de autolimpieza.

### **5. Procedimiento experimental**

En este capítulo se presenta el paso a paso para obtener las películas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  sobre los sustratos de vidrio, las características de las materias primas utilizadas como precursores sol-gel, los cálculos básicos y variables a tener en cuenta para la creación del sol, la deposición por inmersión (dip coating) y por último se presentan las técnicas de caracterización de los recubrimientos obtenidos.

#### **5.1. Reactivos**

Para la conformación de los soles se hace necesario seleccionar los precursores y el acomplejante para el sol de  $\text{TiO}_2$ , las características y especificaciones de cada uno de ellos como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Características de los reactivos utilizados

REACTIVOS	PESO ESPECÍFICO (g/mol)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	PUREZA/ CONCENTRACIÓN (%)
n-Butóxido de Tinanio (IV) Ti(OBu) <sub>4</sub>	340,36	1	97
Ortosilicato de tetraetilo Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>	208,33	0,934	98
Acetilacetionato (ACAC)	100,12	0,975	98

## 5.2. Conformación de los soles

Para desarrollar la conformación de los soles, se prepararon dos soluciones separadas que fueron mezcladas utilizando agitación magnética a 300 r.p.m, con el fin de tener una buena homogenización de las soluciones, la primera de ellas contenía la mitad del volumen del solvente (EtOH), el volumen total del acomplejante ACAC (acetilacetionato), el total del volumen de precursor de titanio (Ti(OBu)<sub>4</sub>); éstas se mezclaron en el orden en que se indicaron anteriormente considerando que el alcohol es el solvente de los precursores y el acomplejante es la sustancia que va a disminuir la velocidad de hidrólisis y condensación del Ti(OBu)<sub>4</sub>. La segunda solución contenía la mitad del volumen de etanol, el volumen total del precursor de silicio (Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>) y la mitad del volumen de agua; éstas se mezclaron en el orden en que se mencionaron anteriormente tal que el alcohol cumple el papel de solvente y el agua de inicio al proceso de prehidrólisis del Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>, en la (Figura 2) se evidencian la preparación de las dos soluciones como se indicó anteriormente.

Posteriormente las soluciones se mezclaron y se agregó el volumen restante de agua, esto para favorecer la hidrólisis del sistema; la agitación magnética se mantuvo, se ajustó el pH de cada uno de los sistemas como se muestra en la (Tabla 2) con ácido nítrico y se cubrió el contenedor (beaker de 250 ml) con papel aluminio. En la (Figura 4) indica el proceso de conformación del sol para los sistemas, con sus respectivas etapas y tiempos empleados en cada una de ellas.

En la Tabla 3 se indica la cantidad de los precursores empleada para la elaboración de soles de  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ , variando en la concentración de  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ,  $\text{Ti}(\text{OBu})_4$  en el sistema y utilizando como acomplejante acetilacetato. Esta variación se realizó para observar el efecto que tiene la concentración del precursor de titanio al caracterizar las propiedades ópticas e hidrófilas sobre el sustrato de vidrio.

### 5.2.1. Cálculos básicos

En el proceso de conformación de los soles se mantienen fijas las siguientes relaciones:

- $n(\text{Zr} + \text{Ti}) / n[\text{Acomplejante}] = 1$ , donde n es el número de moles
- $n\text{H}_2\text{O} / n[\text{Zr} + \text{Si} + \text{Ti}] = 1,5$  donde n es el número de moles
- Volumen total de la solución de 150 ml.
- Concentración de la solución: 50gr/l.

Pesos moleculares

$$\text{SiO}_2 = 60,086 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{TiO}_2 = 79,9 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

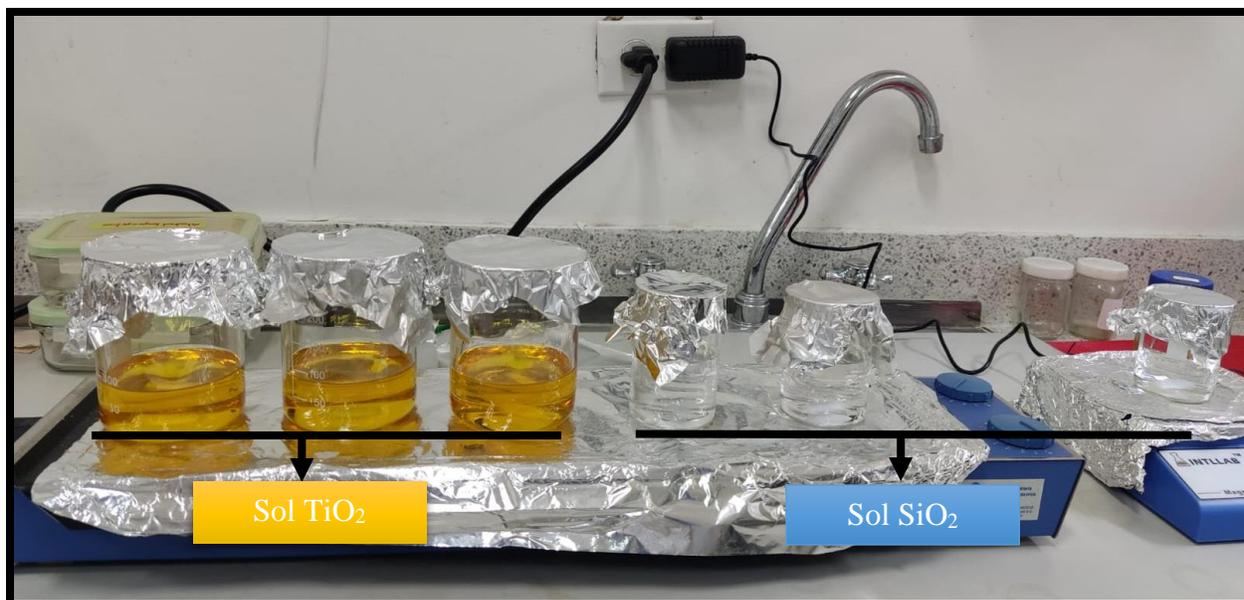


Figura 2 Preparación sol de  $\text{TiO}_2$  y sol de  $\text{SiO}_2$

Tabla 2 Ajuste de pH para cada sistema con ácido nítrico.

SISTEMA	N (%)		pH
	Si	Ti	
ST1	0,40	0,60	4,04
ST2	0,50	0,50	3,81
ST3	0,60	0,40	3,91
ST4	0,25	0,75	4,12
ST5	0,20	0,80	4,16
ST6	0,10	0,90	4,04

Tabla 3 Cantidad de reactivos empleada para cada variación de la concentración molar del sistema  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

N (%)		TEOS	TBT	ACAC	H2O		ALCOHOL	
SI	TI				100%	50%	100%	50%
0,40	0,60	9,487	21,938	6,260	2,814	1,407	109,502	54,751
0,50	0,50	12,194	18,799	5,364	2,893	1,447	110,749	55,375
0,60	0,40	15,059	15,478	4,416	2,977	1,489	112,069	56,035
0,25	0,75	5,694	26,335	7,514	2,702	1,350	107,754	53,877
0,20	0,80	4,495	27,724	7,911	2,666	1,333	107,202	53,601
0,10	0,90	2,191	30,397	8,673	2,598	1,299	106,140	53,070

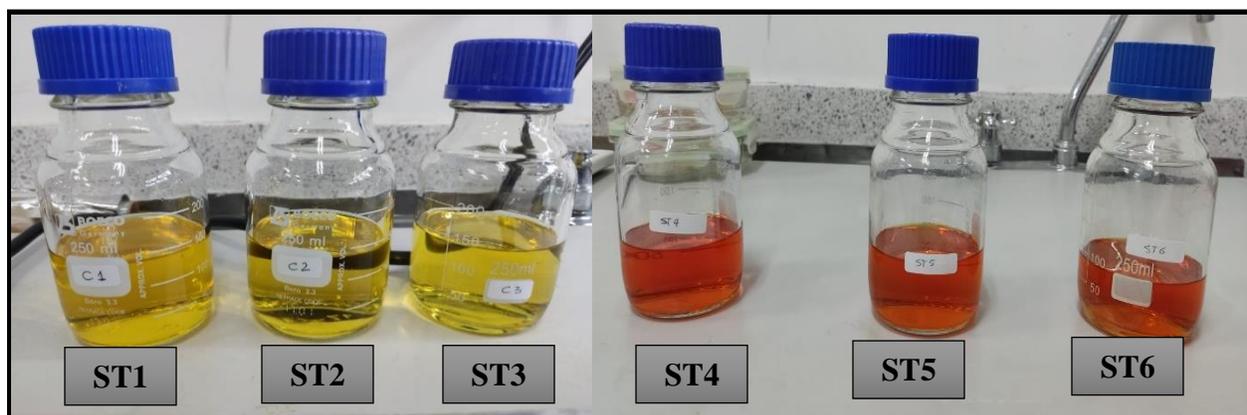


Figura 3 Mezcla de soluciones para cada sistema  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

### 5.2.2. Esquema

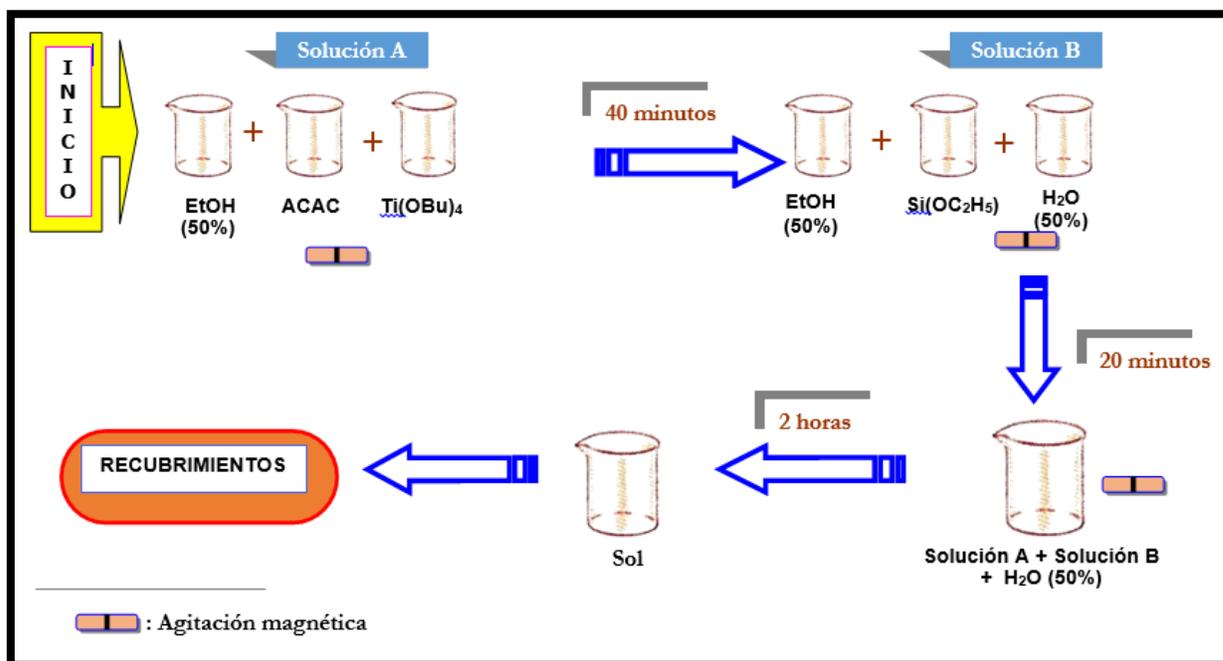


Figura 4 Proceso de conformación del sol  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

### 5.3. Viscosidad

Para efectuar la medida de la viscosidad se utilizó un viscosímetro capilar tipo Ostwald como el mostrado en la (Figura 5).

(XU, POPE, & MACKENZIE, 1998) informa que “los geles de óxido amorfo obtenidos del proceso sol-gel son importantes intermediarios en la formación de vidrios y cerámicas. La estructura de los geles formados por reacciones durante la gelificación controla la viscosidad de la solución. Por lo tanto, las medidas de viscosidad son informativas sobre la estructura final del gel”.

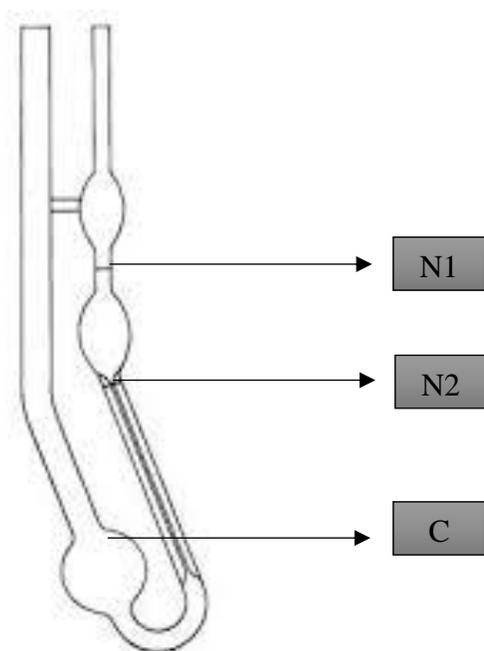


Figura 5 Viscosímetro capilar tipo Ostwald.

El líquido en este viscosímetro fluye a través de su capilar, como consecuencia de la fuerza de gravedad, y el procedimiento a seguir para medir la viscosidad es el siguiente:

- Se introduce la solución, cuya viscosidad se va a determinar, por el tubo C.
- Posteriormente se eleva el fluido por encima del nivel N1.

- Luego se libera y se mide el tiempo que transcurre entre el paso del líquido por las marcas N1 y N2.

Teniendo en cuenta que la viscosidad tiene importancia en la determinación del proceso de condensación de los sistemas conformados, se podrá estimar un rango de tiempo en que la viscosidad se hace estable para realizar los recubrimientos por inmersión de cada uno de los sistemas.

La viscosidad se registró cada día en una hora promedio de las 3:00pm para las composiciones de los sistemas ST1, ST2 y ST3 como se muestra en la figura 6. La viscosidad se hizo estable en los días 8 y 10 para el sistema ST1, entre los días 6 y 8 para ST2 y entre los días 2 y 4 para el sistema ST3. Los días posteriores a los mencionados anteriormente para cada uno de los sistemas, presentan un ligero crecimiento de la viscosidad debido al proceso de condensación que experimentan cada una de las composiciones y al mayor contenido de SiO<sub>2</sub>.

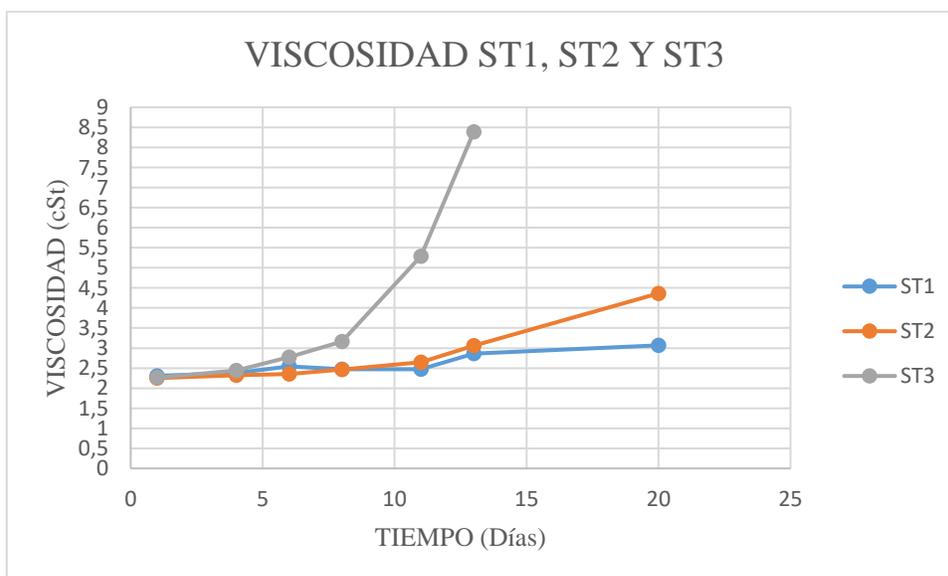


Figura 6 Gráfica de viscosidad vs tiempo para los sistemas ST1, ST2 y ST3.

En la figura 7 se registran los valores de viscosidad para las composiciones de los sistemas ST4, ST5 y ST6 en el mismo horario promedio de los sistemas de la figura 6. El comportamiento de las gráficas muestra un ascenso y descenso de los valores de viscosidad lo cual se debe al margen de error del viscosímetro capilar y de la gelificación de las composiciones dentro del viscosímetro que disminuyen el diámetro interno. La viscosidad se hizo estable en los días 9 y 11 para el sistema ST4, entre los días 11 y 14 para ST5 y entre los días 12 y 15 para el sistema ST6.

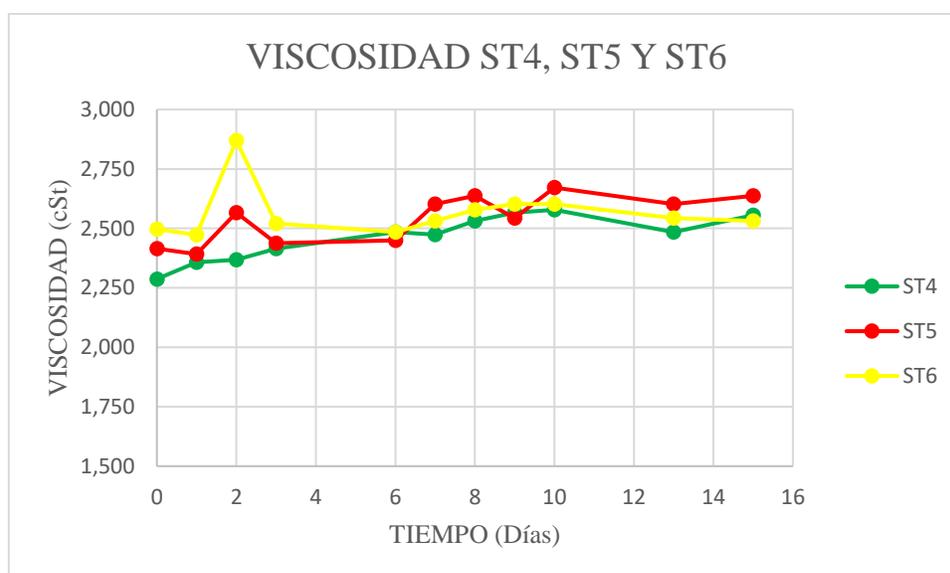


Figura 7 Gráfica de viscosidad vs tiempo para los sistemas ST4, ST5 y ST6.

#### 5.4. Conformación de los recubrimientos

La conformación de recubrimientos sobre piezas son empleadas para generar diferentes propiedades que las optimicen, para esto, es importante conocer el tipo de material al que se va a recubrir, la limpieza adecuada de los sustratos y la técnica de revestimiento que favorezca al proceso de sinterizado.

#### 5.4.1. Preparación de los sustratos

Los sustratos utilizados fueron de vidrio flotado bajo en hierro (vidrio extra claro) de 6 líneas, este tipo vidrio fue seleccionado debido a que es muy utilizado como capa sobre las células solares y tiene propiedades de alta transmitancia de la luz solar. El vidrio fue cortado en medidas de (2,5 x 1,5) cm y de (8 x 6) cm, primero son lavadas con agua y jabón líquido (pH neutro), enjuagadas con agua corriente e inmediatamente con agua desionizada, luego se procedió a limpiar los sustratos de vidrio de la grasa en su superficie. Para ello los sustratos se sumergieron en acetona y llevadas a ultrasonido durante 10 minutos en el equipo de limpieza Branson 2800-CPXH como se muestra en la (Figura 8), posterior a esto se sumergieron los sustratos sobre etanol durante 10 minutos en ultrasonido. Por último, se secaron con aire caliente para eliminar los residuos de etanol y luego fueron almacenados para su uso.

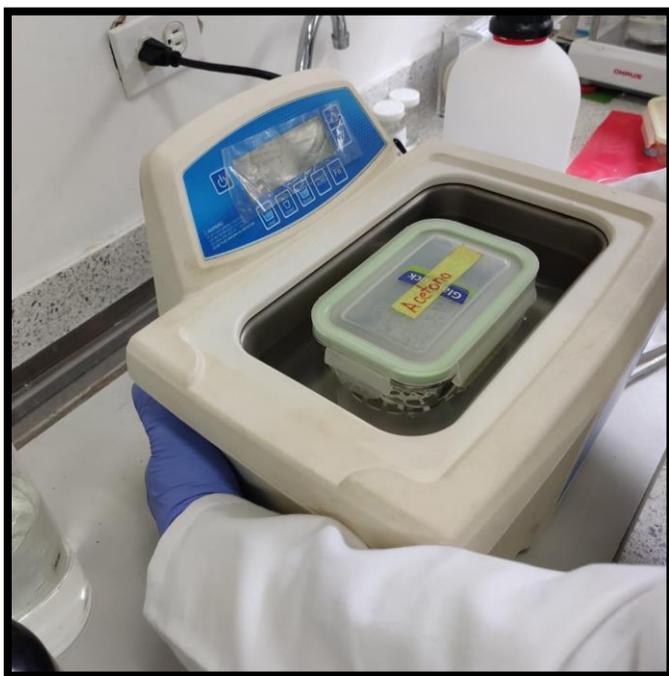


Figura 8 Equipo de limpieza por ultrasonido Branson 2800.

### 5.4.2. *Obtención de las películas*

Para la obtención de los recubrimientos autolimpiantes hidrófilos y antirreflectantes, se utilizó el mecanismo de un ascensor como el mostrado en la (Figura 9), este equipo facilita la realización del recubrimiento por inmersión (Dip coating). (Brinker, Hurd, Schunk, Frye, & Ashley, Review of sol-gel thin film formation, 1992) informa que “en el recubrimiento por inmersión, el sustrato normalmente se retira verticalmente del baño de recubrimiento a una velocidad constante. El sustrato en movimiento arrastra el líquido en una capa límite mecánica fluida que se divide en dos sobre la superficie del baño líquido, devolviendo la capa exterior al baño. Dado que el solvente se evapora y drena, la película de fluido adquiere una forma similar a una cuña que termina en una línea de secado bien definida”.

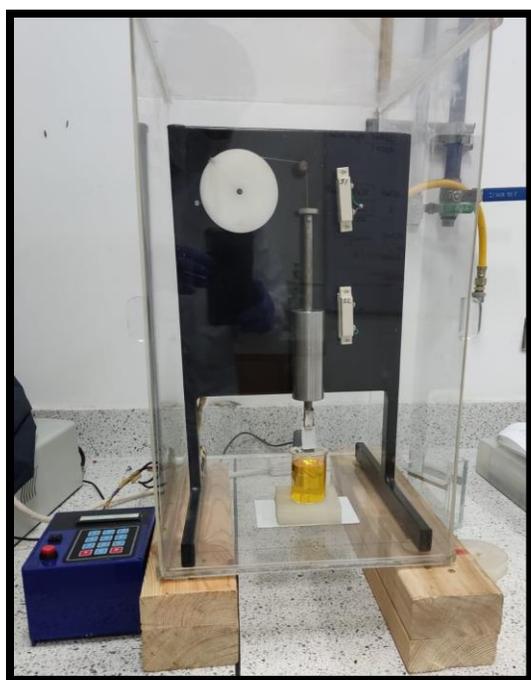


Figura 9 Equipo de inmersión para la conformación de los recubrimientos.

Como se puede evidenciar en la (Figura 9), antes de realizar el recubrimiento por inmersión (Dip coating), es necesario que la película del nanocompuesto cubra una sola cara de los sustratos, para lograrlo, se recubre el otro lado con cinta de vinilo. Luego se ajusta la velocidad de la polea en el panel de control a 15cm/min, en seguida se procede a sumergir el sustrato de vidrio hasta completar casi la totalidad de la cara frontal y por último se retira el sustrato verticalmente a la velocidad constante ajustada anteriormente. Se deja reposar 1 min antes de retirarla de la cabina para favorecer la deshidratación brusca con el medio ambiente y no permitir el ingreso de corrientes de aire al interior que generen distorsión en la película. Por último, se dejó secar el sustrato de vidrio ya recubierto con cada composición de Si/Ti durante 30 minutos a temperatura de 22,4°C y humedad relativa de 51%.

### **5.5. Tratamiento térmico de los recubrimientos**

La calcinación es un tratamiento térmico que busca descomponer elementos orgánicos o cambiar la constitución física o química de un material, utilizado en procesos de recubrimientos y sinterización de compuestos, por lo tanto es importante analizar el efecto de la calcinación (Villanueva Jaramillo, 2011), para lograr una cristalización y acides adecuada (Osorio Hernández, Ramos Galván, García Alamilla, Morales Cepeda, & Rivera Armenta, 2017), ajustándose a temperaturas y tiempos (Ingaruca Alvarez, y otros, 2022) que permitan obtener características específicas de acuerdo al método implementado.

Según (Zhang , E, Zhang , & Liu, 2018) “la fase anatasa suele exhibir el mejor comportamiento fotocatalítico. A menor cantidad de fase rutilo de  $\text{TiO}_2$ , mayor cantidad de fase

anatasa de  $\text{TiO}_2$  y mejor actividad fotocatalítica. La transformación de la fase cristalina conduce a la disminución de la propiedad óptica y de autolimpieza de las películas compuestas de  $\text{TiO}_2$  -  $\text{SiO}_2$ ". (Lin, Zheng, Yan, & Zhang, 2017) informaron en la caracterización del revestimiento que "los patrones XRD exhibieron fuertes picos de difracción a  $25,3^\circ$ ,  $37,9^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $55^\circ$  y  $62,7^\circ$ , lo que indica que el  $\text{TiO}_2$  recocido a  $500^\circ\text{C}$  está en la fase anatasa".

Los recubrimientos para cada sistema se calcinaron en un horno mufla VULCAN 3-1750 como se muestra en la Figura 10 a una rata de calentamiento de  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  para evitar grietas sobre la película y facilitar la eliminación de los grupos orgánicos residuales, en el proceso del tratamiento térmico se programan reposos a los  $100^\circ\text{C}$  y  $210^\circ\text{C}$  durante 1 hora cada uno para permitir una mejor homogenización de la superficie y por último se lleva a los  $500^\circ\text{C}$  durante 3 horas para lograr obtener fase cristalina del  $\text{TiO}_2$ , este proceso se ilustra como en la figura 11.



Figura 10 Horno mufla VULCAN 3-1750



Figura 11 Tratamiento térmico

## 6. Caracterización

### 6.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Técnica de medición y calidad para la evaluación de las características morfológicas, enlaces de carbono y determinación de la estructura cristalina mediante la interacción de rayos X con la materia, puede ser mediante procesos como; un haz de luz incidente es desviado sin pérdida de energía (radiación dispersa), o los fotones pueden sufrir una serie de choques inelásticos al incidir sobre un punto y aumenta su energía (fluorescencia), por medio del uso de difractómetros para determinar la fase estructural del material que predice la ley de Bragg (Villanueva Jaramillo, 2011).

Un difractograma de RX recoge los datos de intensidad en función del ángulo de difracción ( $2\theta$ ) obteniéndose una serie de picos. Los datos más importantes obtenidos a partir de un difractograma son los siguientes: posición de los picos expresada en valores de  $\theta$ ,  $2\theta$ ,  $d$  ó  $q=1/d^2$

y la intensidad de pico. Las intensidades se pueden tomar como alturas de las crestas o para trabajos de más precisión de las áreas (Pérez Pérez, 2007).

Para la obtención de los análisis de difracción de rayos X (DRX) se utilizó el equipo Malvern Panalytical Empyrean de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá como se muestra en la figura 12. Los ensayos en configuración de Bragg Brentano tradicional fueron desarrollados con un radio de haz incidente de 240 mm, la línea del tubo de cobre presenta un  $K\alpha_1$  de 1.54060 Å y un  $K\alpha_2$  de 1.54443 Å. La diferencia de potencial implementado fue de 40 kV con una intensidad de 30 mA, el rango de barrido fue de 20° a 90°. El tamaño de paso designado para este ensayo fue de 0.0100° con un tiempo de conteo de 0,6 segundos para un total de 2125 puntos.



Figura 12 Difractómetro Malvern Panalytical Empyrean

## 6.2. AFM

El microscopio de fuerza atómica es un microscopio que "barre" la superficie de la muestra utilizando un micro-sensor (tip). Las principales características de esta técnica son: Observación fácil y con gran ampliación, al aire; observación directa de muestras no-conductivas- y medición

acurada en la dirección Z (altura). Imágenes topográficas de la superficie de muestras pueden ser logradas con ampliaciones a partir de miles de veces, hasta millones de veces, siendo muestras típicas de esta técnica, metales, cerámicas, materiales orgánicos y muestras biológicas, sin la necesidad de tratamientos de preparación, tales como la metalización (Bautista Ruiz, 2012).

La microscopia de fuerza es un principio basado en la interacción local entre punta y superficie de la muestra utilizado para la caracterización de materiales de acuerdo a sus propiedades físicas (Giraldo & Robledo, 2015); El microscopio de fuerza atómica es un dispositivo que trabaja en diferentes modos de operación (Tapping, Contacto e imagen de fase) para determinar la topografía de la muestra y otras propiedades físicas (viscoelasticidad, fuerza elástica y fuerza magnética) (Gonzalez & Castellón, 2005).

En la figura 13 se muestra el equipo NaioAFM de la Universidad Militar Nueva Granda de la ciudad de Bogotá, equipo utilizado para la obtención de la topografía y rugosidad de cada uno de los sistemas. NaioAFM tiene un controlador integrado, mesa XY, blindaje de flujo de aire y aislamiento de vibraciones, cámara de vista superior de alta resolución y observación de muestras de vista lateral integradas, y no se requiere ajuste de láser o detector (Nanosurf, 2022). La medición se realizó en un área de  $46,2 \mu\text{m} \times 46,2 \mu\text{m}$  empleando el modo contacto con puntas de silicio recubiertas con aluminio. Los resultados fueron analizados con el software WSxM 5.0 Develop 10.2.



Figura 13 Equipo NaioAFM para análisis de Rugosidad.

### 6.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

“Es una técnica de análisis topográfico estructural y composicional, el cual se ha usado en el estudio de tópicos de semiconductores, nanopartículas, modificación de productos comerciales, catálisis heterogénea, dispositivos de juntura, películas delgadas, nano composiciones, fotoelectroquímica” (Clavijo , 2013). Un dispositivo que trabaja con la técnica SEM tiene la capacidad de captar en las muestras digitales la reacción que tiene el material con el choque de electrones de alta energía a fin de determinar propiedades y características, (Giraldo & Robledo,2015) definen a un dispositivo SEM como un instrumento de análisis topográfico de alta definición comparado con un microscopio óptico.

Los análisis de la morfología superficial de los recubrimientos se realizaron por medio del equipo ZEISS serie EVO MA10 de la universidad UPTC de Tunja. Los datos de las películas se detectaron de los electrones secundarios a una magnificación de 500X en escalas de 20  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$ , a distancia de trabajo de 8,5mm y una potencia en la fuente de 20kV.

#### 6.4. Transmitancia

La transmitancia es la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en un determinado tiempo, (Flores Larsen, Hernandez , & Lesino, 203) tomaron medidas de la radiación incidente y la radiación transmitida en un grupo de muestras por medio de un espectroradiómetro que trabaja con ondas de 300 nm hasta 1100 nm, para obtener las curvas de transmitancia, con el uso de un monocromador compuesto por una red de difracción holográfica y una rueda de filtros eliminaron los datos armónicos.

(Chavez Mendiola, Carrillo Castillo, Godoy Rosas, & Castillo, 2018) informa que “la espectroscopia ultravioleta visible permite cuantificar las transiciones electrónicas, debido a que las moléculas absorben dicha radiación dependiendo del tipo de material que se utiliza. La espectroscopia ultravioleta-visible involucra la absorción de radiación ultravioleta-visible por una molécula, causando la transición de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose el exceso de energía en forma de radiación. La longitud de onda comprende entre 200 y 800 nm. Los modos de operación del equipo son el de absorción, transmitancia y reflectancia; que nos da la posibilidad de obtener datos de los diferentes experimentos que requieren la caracterización de UV Vis”.

Para obtener los cálculos de la transmitancia de cada una de las muestras, se utilizó el equipo espectrofotómetro UV/vis Labgenius 2801 de la universidad UPTC de Tunja. El espectrofotómetro incorpora una pantalla LCD de matriz de puntos de 320×240 para resultados fotométricos, fácil operación y rango de longitud de onda de 190nm a 1100 nm. Este instrumento es ideal para mediciones en la región de longitud de onda visible y ultravioleta del espectro electromagnético.

## 6.5. Ángulo de Contacto

La medición del ángulo de contacto es un proceso de análisis y recolección de datos mediante imágenes digitales tomadas por una cámara en las interacciones de la gota del agua con la superficie del material para determinar sus propiedades hidrofílicas o de limpieza (Raimondo, y otros, 2012), (Decco, Engelke, Zuchuat, & Cura, 2019) tomaron muestras antes y después de la deposición del agua por medio de micropipetas, analizando los datos obtenidos para determinar los ángulos de avance y retroceso para obtener el ángulo de equilibrio por la ecuación de Young-Dupre y la ecuación de Tadmor, obteniendo resultados de hidrofilia ( $<90^\circ$ ) con una irradiación de 3 horas y superhidrofilia (ángulos de equilibrio  $0^\circ$ ) con una irradiación de 12 horas.

Para el análisis del ángulo de contacto se diseñó una caja totalmente oscura con dos orificios, uno para introducir la cámara del microscopio electrónico con luz graduable y el otro para una bombilla con luz ultravioleta, mediante el programa HiView se tomaron fotografías de la gota sobre la película de cada uno de los sistemas y se realizó el respectivo análisis del ángulo de contacto.

(Chaoyou & Lin, 2020) en los análisis del ángulo de contacto de la gota de agua, indica que “el ángulo de contacto aumentó a  $5,0^\circ$  cuando la muestra se almacenó en la oscuridad durante 20 días, lo que indica que la superhidrofilia sobresaliente inicial se exacerbó un poco con el almacenamiento en la oscuridad. La excelente superhidrofilia inicial de la superficie de la muestra se restauró con un ángulo de contacto de  $2,5^\circ$  tras la irradiación UV durante 1 h. Cuando el recubrimiento se colocó nuevamente en la oscuridad durante 3 días, el ángulo de contacto aumentó a  $4^\circ$ ”. De acuerdo a esta información los vidrios recubiertos con cada uno de los sistemas fueron almacenados en un espacio oscuro para que se adaptaran a este medio, se tomaron las fotografías con la luz blanca para posteriormente medir el ángulo de contacto

formado por la línea tangencial de la gota con la superficie y compararlo con la humectabilidad de la tabla 4 donde se hacen referencia los rangos de ángulos de contacto que generan cada tipo de mojabilidad, por último, se iluminaron los recubrimientos con la luz UV por un minuto en contacto, proceso que se emplea antes de colocar la gota con el fin de analizar la interacción que genera la luz en las películas y por consecuencia en el ángulo de contacto.

Tabla 4 Valores del ángulo de contacto con el agua y su respectivo comportamiento de humectabilidad.

Ángulo de contacto (°)	Mojabilidad
$\theta > 90^\circ$	Hidrofóbico
$\theta > 150^\circ$	Superhidrofóbico
$0 < \theta < 90^\circ$	Hidrófilo
$\theta < 10^\circ$	Superhidrofilico

### 6.6. Propiedades mecánicas de adherencia.

Para que los revestimientos funcionen satisfactoriamente, deben adherirse a los sustratos sobre los que se aplican. Para determinar la adherencia de un revestimiento al sustrato pueden utilizarse diversos métodos reconocidos.

La prueba de raspado se realiza normalmente en un laboratorio y se limita a pruebas en superficies de paneles lisos y planos. La adhesión se determina empujando los paneles revestidos bajo un palpador o bucle redondeado que se carga en cantidades crecientes hasta que el revestimiento se desprende de la superficie del sustrato. Se utiliza un dispositivo llamado probador de adherencia por raspado de haz equilibrado. Un método standard para la aplicación y

realización de esta prueba está disponible en ASTM D2197-Standard Método de prueba para la adhesión de recubrimientos orgánicos por adherencia por raspado (corporation, 2022).

Para obtener los datos de Coeficiente de fricción se utilizó el equipo nanovea tribometers T100 de la Universidad Militar Nueva Granda de Bogotá como se muestra en la figura 14. Para el desarrollo del análisis se implementó un par de teflón y se ejerció un peso  $W = 5 \text{ N}$  sobre cada uno de los sistemas mientras estos oscilaban horizontalmente.

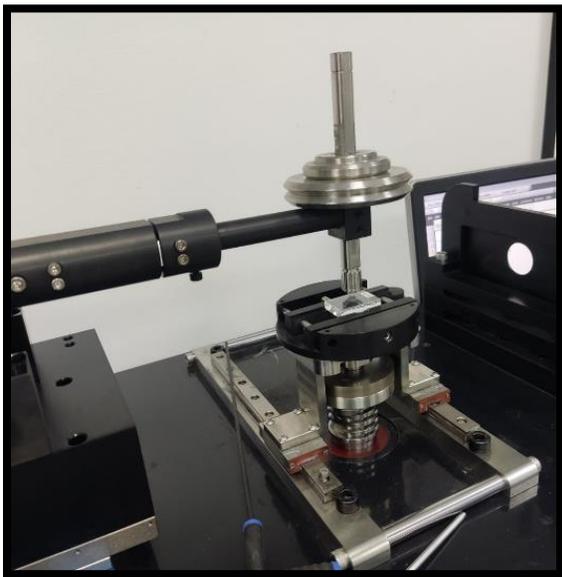


Figura 14. Equipo nanovea tribometers T100 para análisis de COF.

### **6.7. Rendimiento de autolimpieza.**

Para evaluar el rendimiento de autolimpieza a través del tiempo, se emplearon los siguientes materiales:

- Paneles fotovoltaicos de 3,5 voltios (V) y 200mA
- Vidrios recubiertos para cada sistema en medidas de (8x6) cm
- Vidrio sin recubrimiento de (8x6) cm
- Multímetro

Se elaboró una superficie con 4 espacios asegurables para disponer en cada uno de ellos 4 paneles de 3,5 V figura 15, que se distribuyeron como se muestra en la figura 16; en el primer espacio se ensambló sobre el panel el vidrio sin recubrimiento, en el segundo el vidrio con la película del sistema ST1, en el tercer espacio el vidrio con la película del sistema ST2 y en el último espacio el vidrio con la película del sistema ST3.

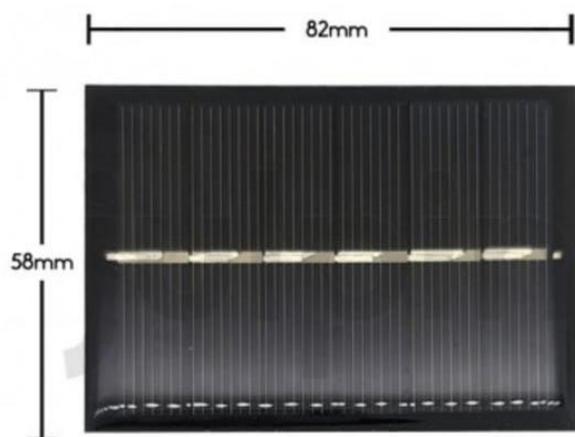


Figura 15 Panel solar de 3,5V y 200mA

Fuente: [www.julpin.com.co](http://www.julpin.com.co)

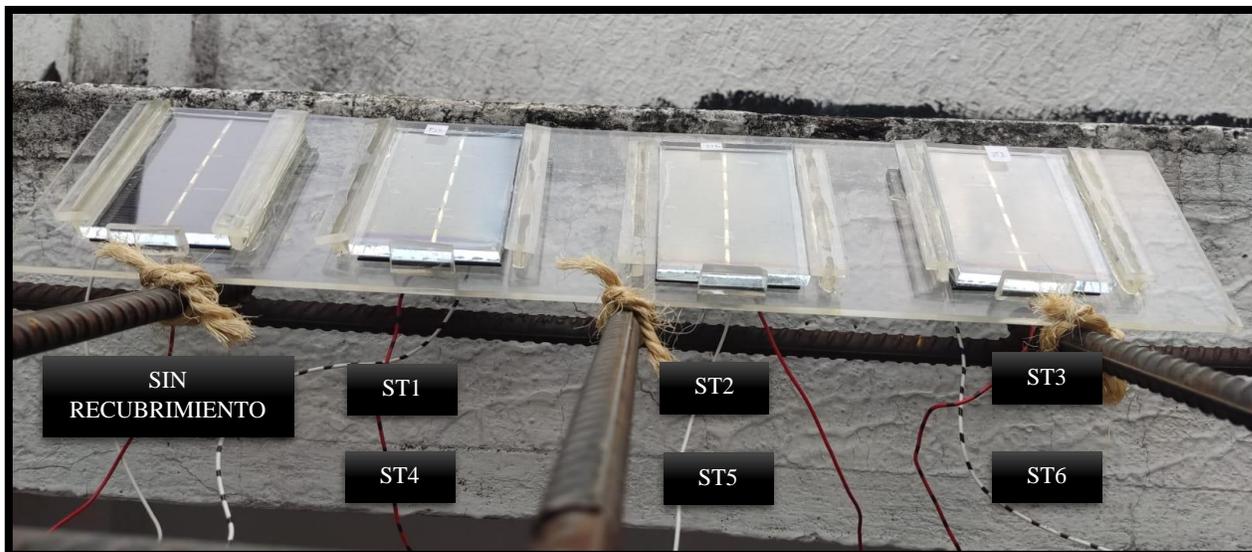


Figura 16 Soportes de paneles fotovoltaicos

Durante 49 días se midió el potencial eléctrico como se muestran en la figura 21 por medio de un multímetro en una hora promedio de 3:00 pm, se tomó como referencia el potencial eléctrico medido en un panel solar sin ser expuesto al medio ambiente y sin la capa de vidrio, con el fin de tener un dato con el 100% de eficiencia y se comparó con el panel que tiene el vidrio sin recubrimiento y los sistemas ST1, ST2 y ST3. Posterior a estos días se realizó el mismo proceso con los recubrimientos de los sistemas ST4, ST5 y ST6 durante 39 días como se evidencia en la figura 22.

## 7. Resultados

### 7.1. DRX

(Zhang , E, Zhang , & Liu, 2018) en su artículo obtuvieron películas con un ciclo de recubrimiento de 0.3 mol/L SiO<sub>2</sub> calcinado a 500 °C. Después de 2 h de recocido a 500 °C, el diagrama XRD indicó la adquisición de una película de TiO<sub>2</sub> puro con todos los picos correspondientes a la fase anatasa, sin evidencia de presencia de rutilo. La reflexión de Bragg a aproximadamente 25°, 38° y 48° corresponde a (101), (004) y (200) planos cristalinos tetragonales de anatasa.

Como es posible evidenciar en figura 17, los 6 sistemas mostraron películas amorfas sin ningún pico característico de alguna de las fases cristalinas del TiO<sub>2</sub>, esto se debe a que las películas no alcanzaron las temperaturas necesarias de sinterizado para su cristalización, también es posible considerar que se deba al análisis empleado en el equipo, ya que se realizó un análisis tipo Bragg Bretano que haya tomado registros del sustrato de vidrio y no de la película delgada.

Los sólidos amorfos tienen estructuras caracterizadas por una ausencia de periodicidad y sólo se mantiene el orden de corto alcance. El resultado es una curva de dispersión de RX mostrando uno o dos máximos con una anchura que puede llegar a los 10° (Pérez Pérez, 2007).

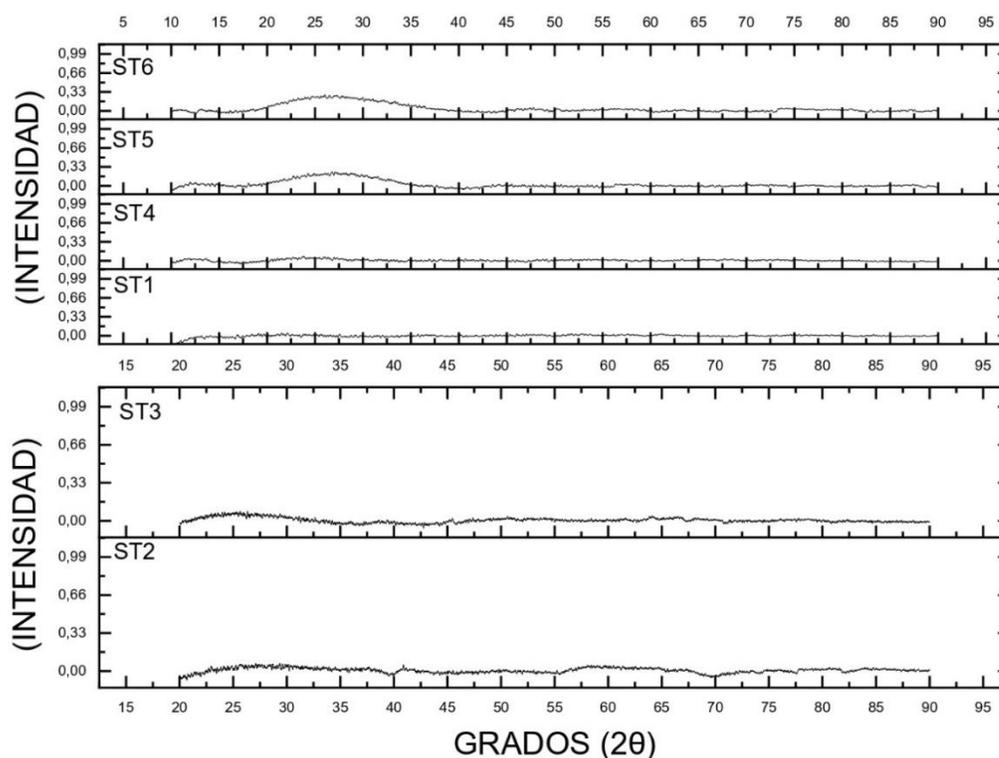


Figura 17 Difractogramas para cada una de las muestras.

## 7.2. Resultados AFM (Rugosidad)

Al caracterizar la topografía superficial de los sustratos de vidrio con cada uno de los sistemas, se observa la obtención de películas delgadas compuestas de aglomeraciones de partículas bien distribuidas sobre la superficie del sustrato como se muestra en la figura 18. Las aglomeraciones presentes en el sustrato tienen una orientación de crecimiento, esta particularidad se aprecia con mayor claridad en la figura 18 f), esto se puede explicar gracias al método de recubrimiento dip-coating; debido a que es un proceso de inmersión y los excesos de titanio son escurridos por gravedad a medida que se seca la muestra; por lo tanto, las partículas crecerían con este patrón y en esta dirección (Ramirez Riaño, 2017).

Las películas muestran superficies con rugosidad muy fina en cada uno de los sistemas, sin embargo, tiene mayor presencia en los recubrimientos de ST5 y ST6 como se muestra en la figura 18 e) y figura 18 f), esto se explica como dice (Ramirez Riaño, 2017) en su investigación: “la presencia de este tipo de clusters en la superficie del vidrio, se deba a la fase de cristalización del dióxido de titanio”.

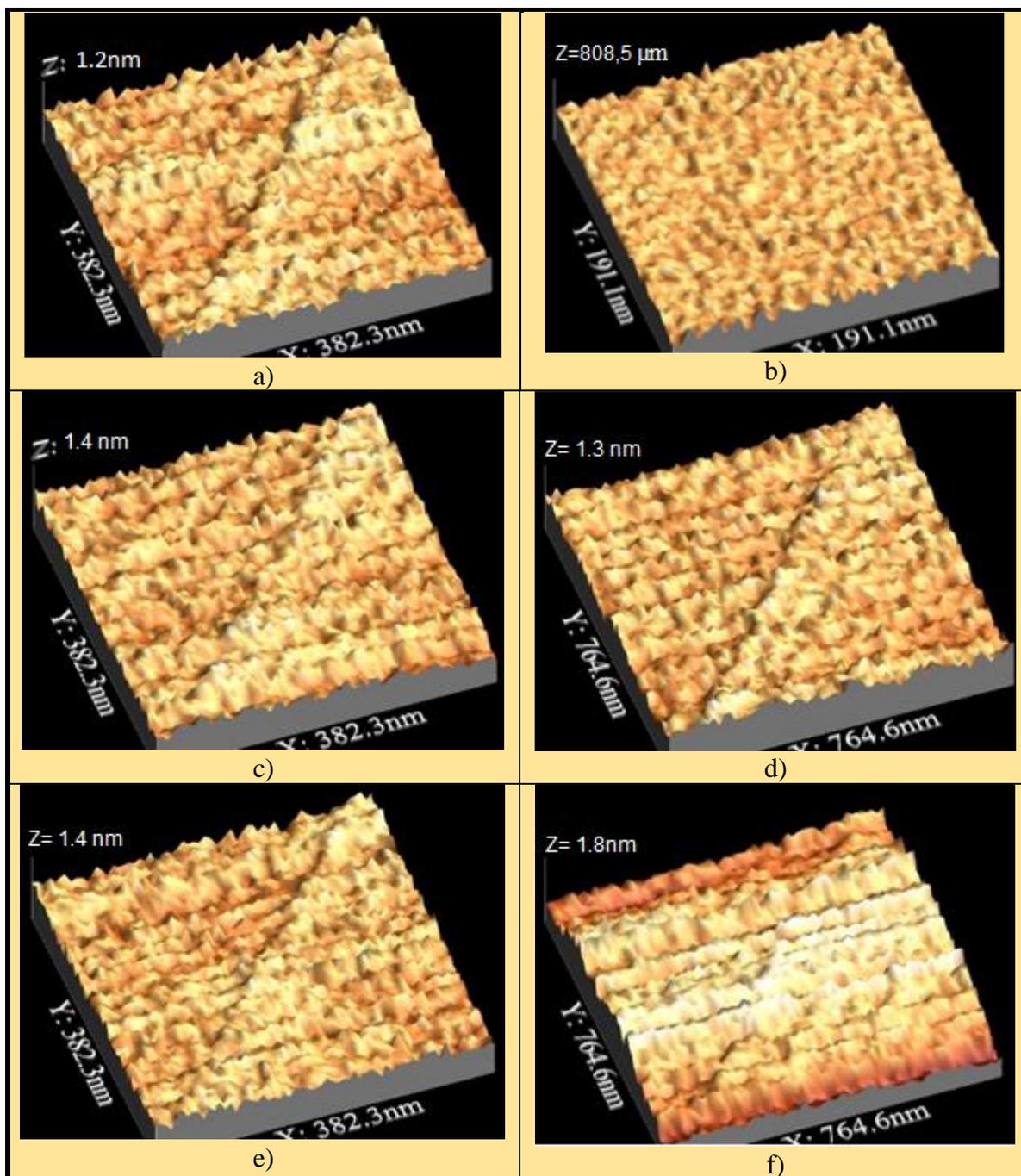


Figura 18 Topografía de cada uno de los sistemas: a) ST1 b) ST2 c) ST3 d) ST4 e) ST5 f) ST6.

(Chaoyou & Lin, 2020) informa que “uno de los factores que tienen efecto sobre la humectabilidad de una superficie con agua es la rugosidad de la superficie. Estudios previos

sugirieron que la baja rugosidad facilita el establecimiento de una condición ideal para un comportamiento superhidrofílico extremo”.

En la tabla 5 se reportan los valores promedios de rugosidad de cada uno de los sistemas, en su comparación las 6 películas presentan rugosidad promedio muy pequeña, permitiendo que sean superficies lisas que ayuden a la generación de la hidrófila. El sistema ST2= 50Si50Ti presenta el RMS que se traduce del inglés (valor cuadrático medio) de rugosidad con un valor de 0,2938 nm y el sistema ST6=10Si90Ti con RMS de 0,3435 nm, de acuerdo a esto se puede concluir que a mayor contenido del TiO<sub>2</sub>, mayor es la rugosidad.

(Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015) en su investigación obtuvieron del compuesto de Si<sub>40</sub>Ti<sub>60</sub> calcinadas a 400°C un valor promedio de la rugosidad de RMS= 2,7 nm, esta película es un poco más rugosa que el sistema ST1 con la misma composición Si<sub>40</sub>Ti<sub>60</sub> pero calcinadas a 500°C RMS= 0,2971 nm.

Tabla 5 Promedio de la rugosidad para cada sistema.

PROMEDIO DE RUGOSIDAD	
SISTEMA	RMS (nm)
ST1	0,2971
ST2	0,2938
ST3	0,3191
ST4	0,3031
ST5	0,3298
ST6	0,3435

### 7.3. Microscopía electrónica de barrido (Morfología).

La morfología de la superficie de las películas compuestas de  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  fueron estudiadas a partir de 3 sistemas; ST2= 50Si50Ti, ST3= 60Si40Ti y ST5= 20Si80Ti como se muestra en las imágenes de la figura 19. Como podemos ver en la figura 19 a) presenta una película lisa con algunas imperfecciones e impurezas distribuidas aleatoriamente, sin embargo, la superficie de la figura 19 b) muestra una película lisa con algunas grietas que fueron formadas para diferenciarla de la superficie del sustrato de vidrio y por último la figura 19 c) nos muestra una película con poros distribuidos aleatoriamente y algunas elevaciones del relieve que se formaron por el exceso de  $\text{TiO}_2$  en la técnica de deposición empleada.

La morfología obtenida de las imágenes de la figura 19 se comparan con la información de (Zhang , E, Zhang , & Liu, 2018), el cual obtuvieron una morfología compuesta de diminutos granos e impurezas de la superficie de las películas de  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  calcinadas a  $500^\circ\text{C}$  y una superficie no muy lisa con apenas una pequeña observación de las nanopartículas en los recubrimientos calcinados a  $450^\circ\text{C}$ .

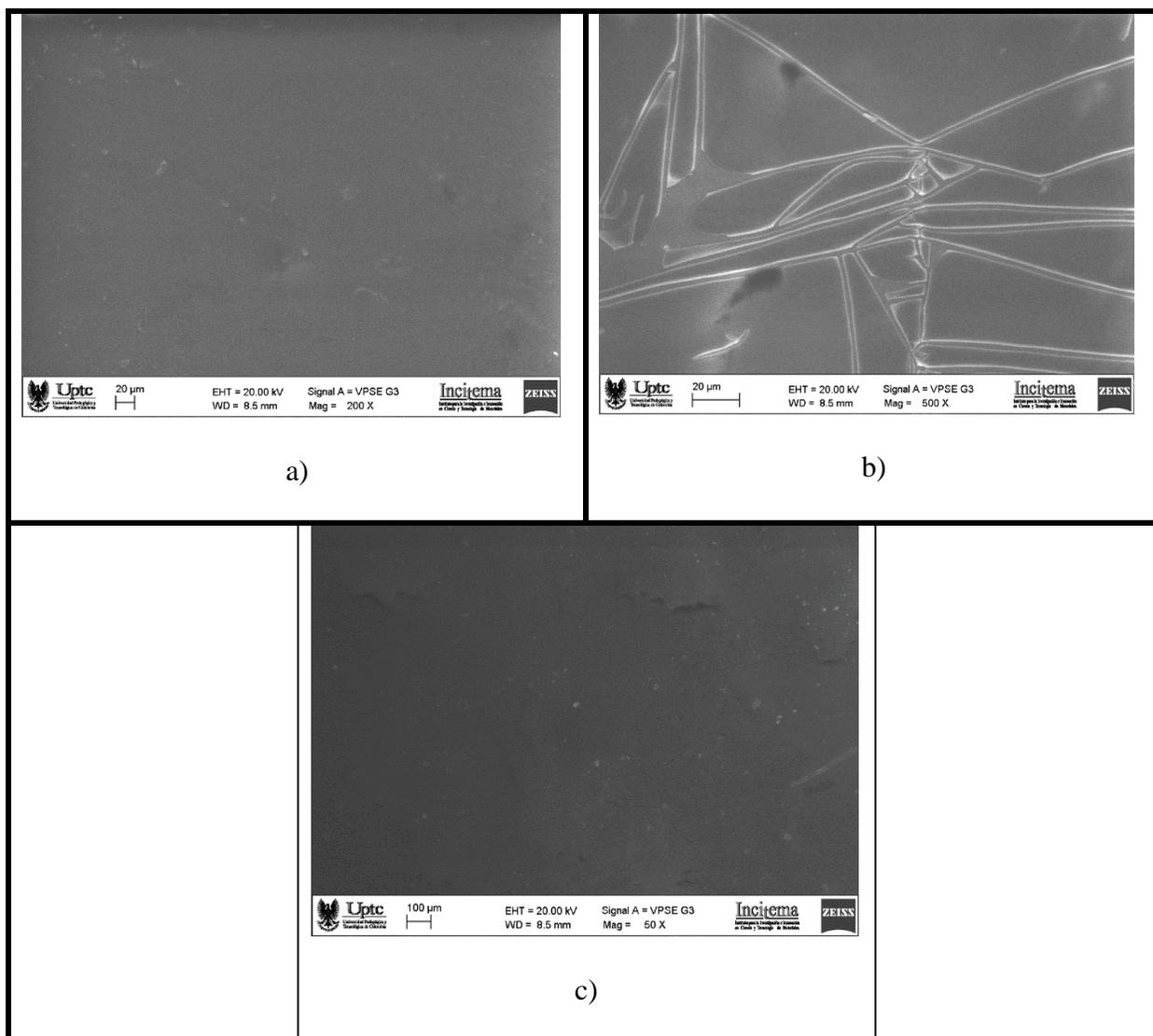


Figura 19 Micrografías de los sistemas a) ST2 b) ST3 c) ST5.

#### 7.4. Propiedades ópticas (%T)

En el análisis desarrollado por el espectrofotómetro UV/vis Figura 20, se corrobora que los recubrimientos son todos transparentes con una transmitancia superior a 79% dentro de la región visible e infrarroja cercana, siendo los más transparentes los sistemas con mayor contenido de dióxido de silicio, esto se debe a que poseen un bajo índice de refracción de  $n=1,53-1,54$  en sus

superficies porosas que facilitan la transmisión de luz, en cambio el  $\text{TiO}_2$  presenta un índice de refracción en la fase cristalina anatasa  $n=2,52$  (Kolahalam, y otros, 2019).

El recubrimiento que mejor transmitancia genera es  $\text{ST3}=\text{Si}_{60}\text{Ti}_{40}$  con un promedio de 86%, esto es gracias a la mayor concentración de  $\text{SiO}_2$ , contrario a esto, el sistema  $\text{ST6}=\text{Si}_{10}\text{Ti}_{90}$  presenta la más baja transmitancia con un promedio de 80%. El sustrato de vidrio sin recubrimiento mantuvo una transmitancia promedio del 90% y los diferenciales para cada uno de los sistemas son 7,77% para  $\text{ST1}$ , 5,55% para  $\text{ST2}$ , 4,44% para  $\text{ST3}$ , 8,88% para  $\text{ST4}$ , 6,66% para  $\text{ST5}$  y 11,11% para  $\text{ST6}$ .

(Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015) obtuvieron de las películas compuestas de  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  un alto % T ( $> 85\%$ ) en el rango visible-NIR, que es fundamental para la aplicación de energía solar. La película compuesta  $\text{Si}_{86}\text{Ti}_{14}$  tratada a  $400^\circ\text{C}$  y  $500^\circ\text{C}$  presentó el mejor resultado de %T con un valor 1% menor en comparación con el vidrio sin recubrimiento. Comparando esta información con el resultado obtenido del sistema  $\text{ST3}=\text{Si}_{60}\text{Ti}_{40}$  calcinada a  $500^\circ\text{C}$  se obtuvo un resultado de %T de 4,44% menor en comparación con el vidrio sin recubrimiento, de acuerdo a esto podemos interpretar que una mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  nos permite una menor disminución del %T.

Se puede observar de la gráfica de la figura 20 que en la longitud de onda de los 400 nm todos los sistemas presentan los mayores valores de transmitancia, sin embargo, desde este punto hasta los 700 nm la transmitancia tiene un decrecimiento muy pequeño de hasta un 3 y 5%. (Chaoyou & Lin, 2020) en sus resultados de las propiedades ópticas informa que “la transmitancia aumentó ligeramente en el rango de 400 a 800 nm y disminuyó ligeramente en el rango de 800 a 1200 nm,

lo que fue causado por cambios en el espesor de la película y la estructura de la superficie”, de acuerdo a esto, se puede interpretar que las curvaturas en los análisis de transmitancia tienen relación con el espesor de la película.

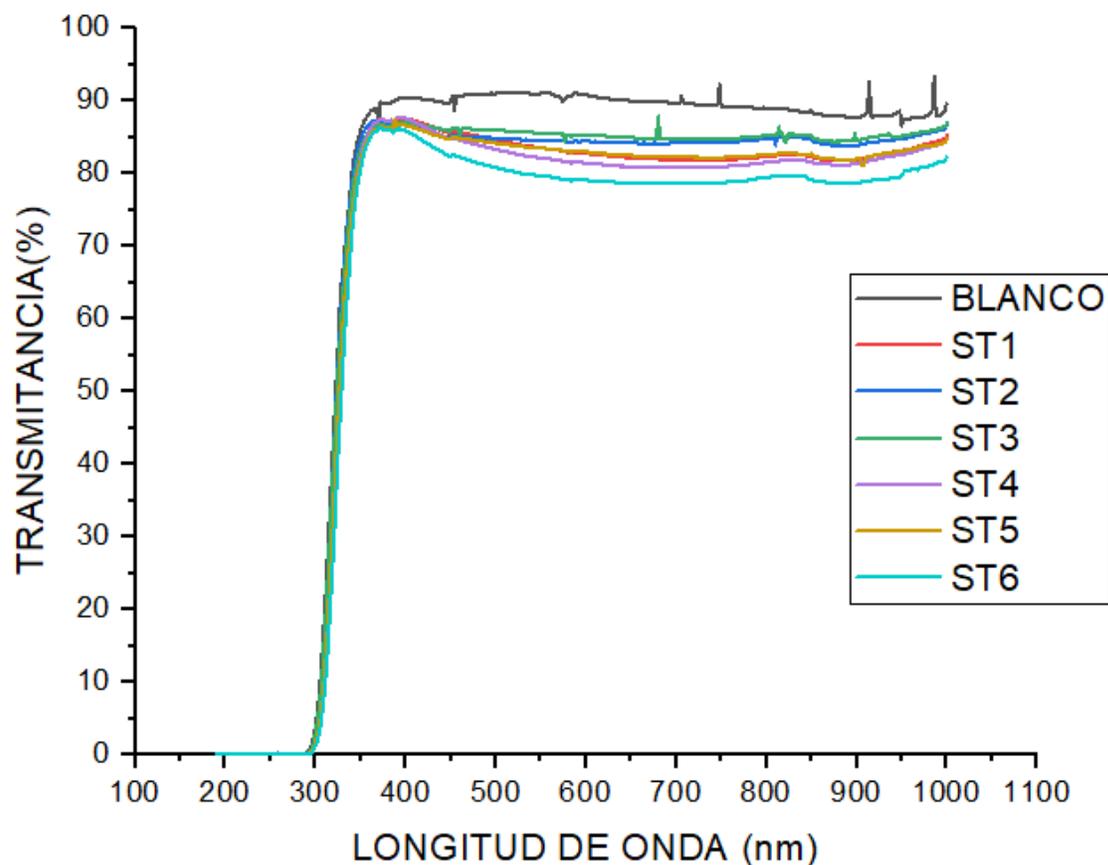


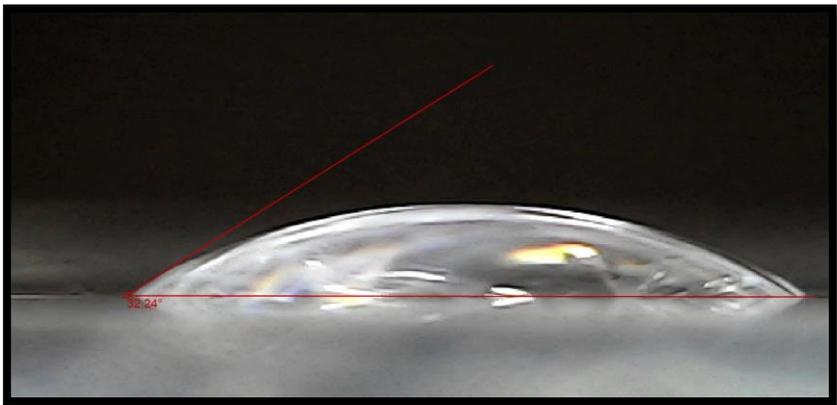
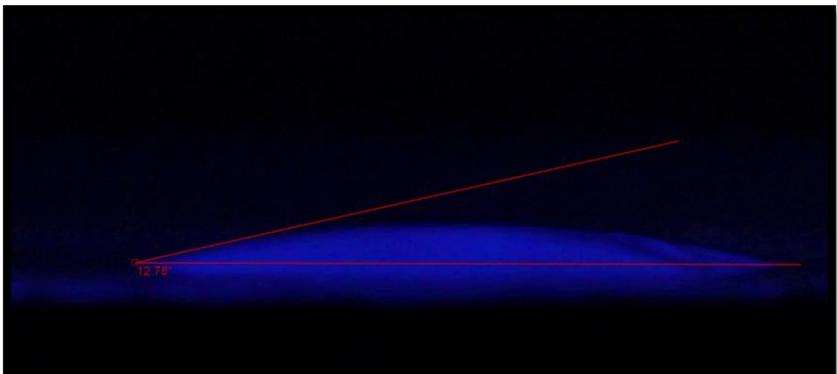
Figura 20 Gráfica de Longitud de onda vs % Transmitancia para cada uno de los sistemas.

### 7.5. Medición de ángulo de contacto.

De acuerdo a la tabla 6 se observa que el ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST1 y la tangente dibujada en la gota de agua es de  $32,24^\circ$  para una iluminación con luz blanca, este ángulo está dentro de las superficies hidrófilas después de haber estado en un ambiente oscuro, posterior a esto, se puede observar que la película al haber estado

en contacto con la luz UV, presenta una disminución de un 60,36% del ángulo de contacto de la gota evidenciando la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$ . En comparación con los otros sistemas, ST1 muestra la mayor reducción después irradiarse con la luz UV y generó el menor ángulo de contacto estando a una diferencia de  $2,78^\circ$  para ser una superficie superhidrófila.

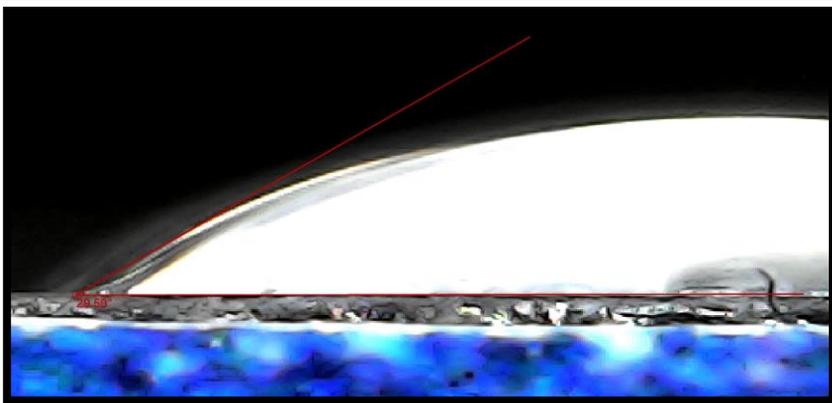
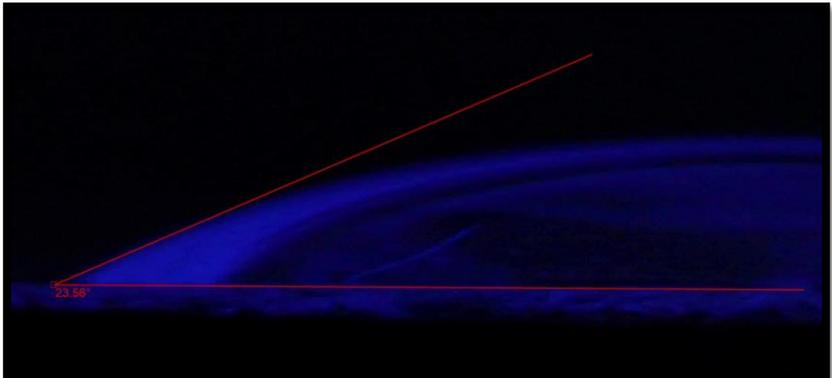
Tabla 6 Ángulos de contacto sistema ST1.

SISTEMA ST1		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA		32,24°
LUZ ULTRAVIOLETA		12,78°

En la tabla 7 se observa que el ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST2 y la tangente dibujada en la gota de agua es de  $29,5^\circ$ , este ángulo está dentro de las superficies hidrófilas después de haber estado en un ambiente oscuro, posterior a

esto, se puede observar que la película al haber estado con contacto con la luz UV, presenta una pequeña disminución de un 20,14% del ángulo de contacto de la gota evidenciando la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$ . En comparación con los otros sistemas presenta la menor reducción después de irradiarla con la luz UV.

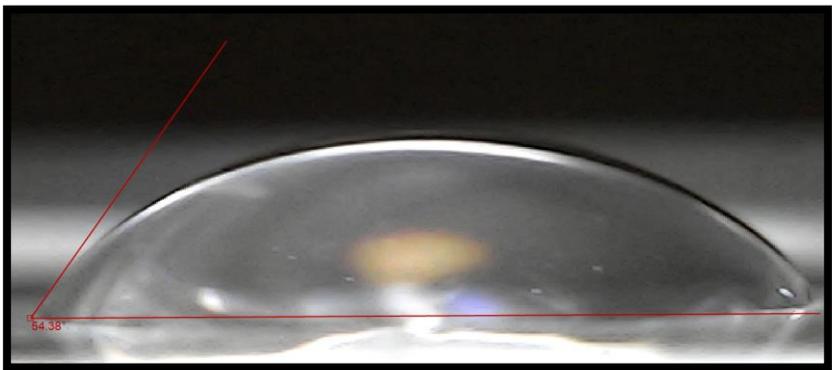
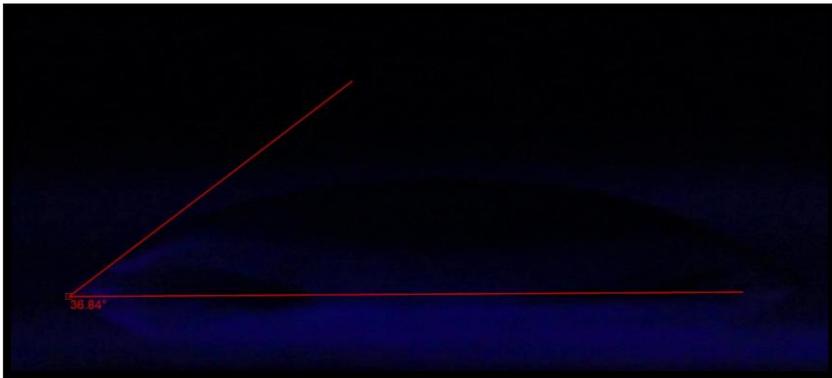
Tabla 7 Ángulos de contacto sistema ST2.

SISTEMA ST2		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA		29,50°
LUZ ULTRAVIOLETA		23,56°

De la tabla 8 se puede observar que el ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST3 y la tangente dibujada en la gota de agua es de  $54,38^\circ$ , este ángulo está dentro de las superficies hidrófilas después de haber estado en un ambiente oscuro, sin embargo

es el recubrimiento que generó el mayor ángulo con respecto a los otros 5 sistemas, posterior a esto, se puede observar que la película al haber estado con contacto con la luz UV, presenta una disminución de un 32,25% del ángulo de contacto de la gota evidenciando la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$ .

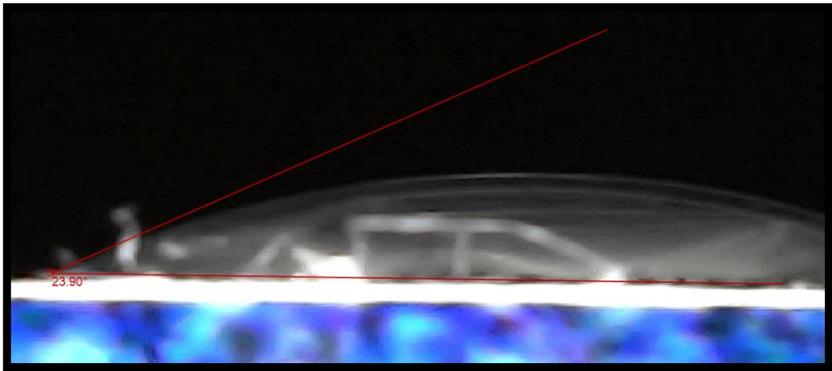
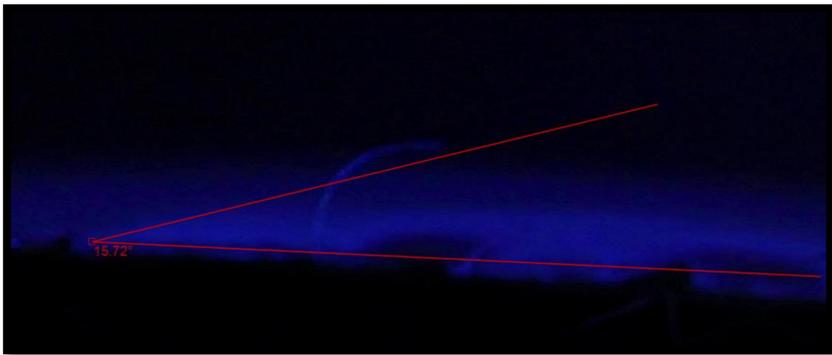
Tabla 8 Ángulos de contacto sistema ST3.

SISTEMA ST3		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA		54,38°
LUZ ULTRAVIOLETA		36,84°

El ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST4 y la tangente dibujada en la gota de agua es de 23,9° para una iluminación con luz blanca como se muestra en la tabla 9, este ángulo está dentro de las superficies hidrófilas después de haber estado en un ambiente oscuro, se puede analizar que en comparación con los otros sistemas la película

presenta el menor ángulo de contacto en ambiente oscuro, posterior a esto, se puede observar que la película al haber estado con contacto con la luz UV, muestra una disminución de 34,22% del ángulo de contacto de la gota evidenciando la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$ .

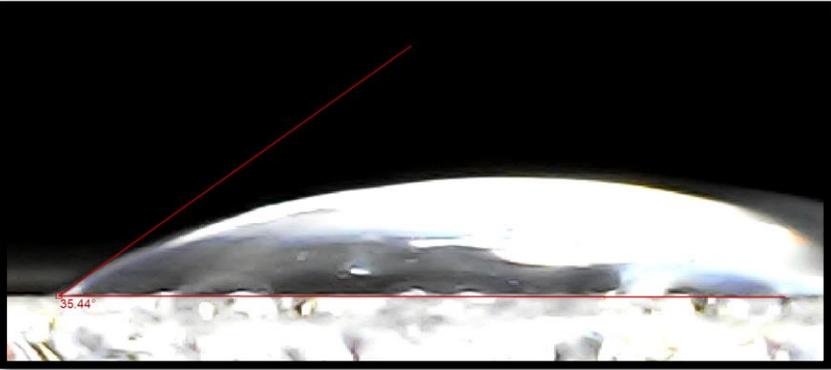
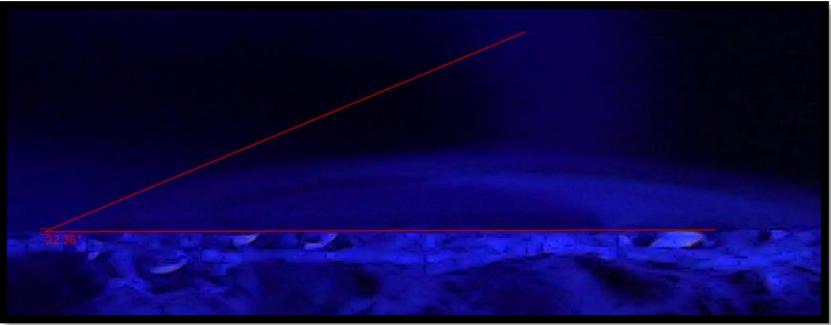
Tabla 9 Ángulos de contacto sistema ST4.

SISTEMA ST4		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA		23,9°
LUZ ULTRAVIOLETA		15,72°

Es posible observar en la tabla 10 que se presenta una superficie hidrófila, ya que el ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST5 y la tangente dibujada en la gota de agua es de 35,44° para una iluminación con luz blanca, en comparación con los otros sistemas mantiene un ángulo de contacto muy semejante a ST1 y ST6, también es posible observar que la

película al haber estado con contacto con la luz UV, presenta una disminución considerable del ángulo de contacto de la gota del 36,9%.

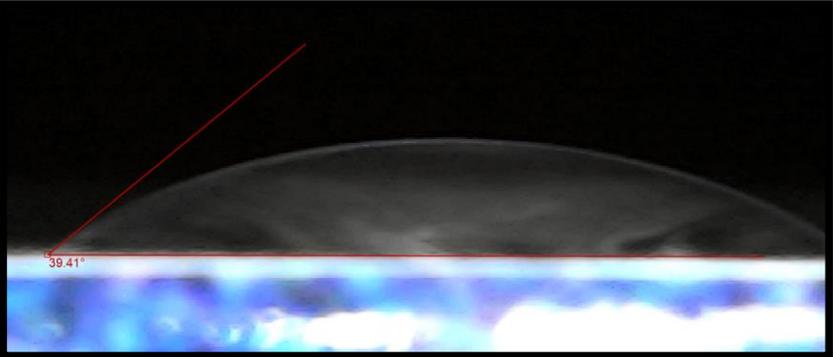
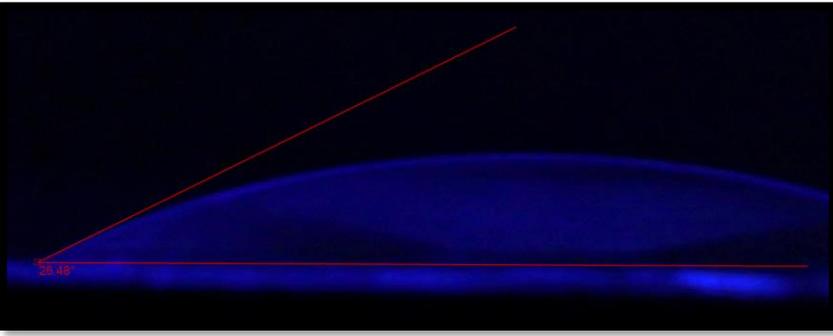
Tabla 10 Ángulos de contacto sistema ST5.

SISTEMA ST5		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA		35,44°
LUZ ULTRAVIOLETA		22,36°

El ángulo de contacto formado entre la superficie del recubrimiento de ST6 y la tangente dibujada en la gota de agua es de 39,41° para una iluminación con luz blanca, este ángulo está dentro de las superficies hidrófilas después de haber estado en un ambiente oscuro, posterior a esto, se puede observar que la película al haber estado con contacto con la luz UV, presenta una disminución del ángulo de contacto de la gota del 32, 8%, esto evidencia la actividad

fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$ . Se recomienda realizar un estudio con mayor tiempo de contacto con la luz UV sobre la película y observar la acción fotocatalítica y la superhidrofilia fotoinducida.

Tabla 11 Ángulos de contacto sistema ST6.

SISTEMA ST6		
ILUMINACIÓN	IMAGEN	ÁNGULO
LUZ BLANCA	 A photograph showing a dark, semi-circular droplet on a surface. A red line is drawn from the center of the droplet to the contact point on the surface. Another red line is drawn along the surface. The angle between these two lines is labeled as 39.41°.	39,41°
LUZ ULTRAVIOLETA	 A photograph showing a dark, semi-circular droplet on a surface under UV light. A red line is drawn from the center of the droplet to the contact point on the surface. Another red line is drawn along the surface. The angle between these two lines is labeled as 26.48°.	26,48°

(Moraes Lopes de Jesus, y otros, 2015) obtuvieron un ángulo de contacto de  $6^\circ$  para la composición de  $\text{Si}_{40}\text{Ti}_{60}$  calcinada a  $400^\circ\text{C}$  y un ángulo de contacto de  $0,1^\circ$  para la misma composición después de ser irradiada por 30 minutos con la luz UV. La disminución del ángulo de contacto para nuestros datos obtenidos después de la irradiación con la UV es muy mínima ya que sólo se irradió por un minuto.

## 7.6. Propiedades mecánicas (coeficiente de fricción).

Las propiedades mecánicas en un recubrimiento son de gran importancia, ya que dependiendo de su adherencia nos asegura una durabilidad sobre el sustrato ante la exposición al medio ambiente. Conociendo que una superficie con coeficiente de fricción igual a 1 es bastante abrasivo y un coeficiente de fricción igual a 0 es una superficie totalmente lisa ideal. Según (Sayem Mozumder, I. Mourad, Pervez, & Surkatti, 2019) en su artículo informan que “los recubrimientos superhidrófilos exhiben unas de las mejores propiedades de autolimpieza con un ángulo de contacto con el agua de tan sólo  $5^\circ$ , facilitan la humectación y a su vez transportan la suciedad. Los recubrimientos de esta naturaleza son más adecuados para las aplicaciones de paneles solares ya que son más lisos a diferencia de las superficies superhidrofóbicas más rugosas. Los recubrimientos más lisos brillan más que los más ásperos y, por lo tanto, no contribuyen mucho a la pérdida de reflejo y eventualmente la transmisión de la luz y la eficiencia de conversión de energía”.

Analizando la tabla 12, datos obtenidos de los coeficientes de fricción de cada uno de los sistemas de la figura 21, es correcto afirmar que todas las películas son perfectamente lisas al obtener valor de COF muy cercanos a cero. El sistema ST6 es la película más lisa al arrojar el valor más cercano a cero  $\text{COF} = 0,000547$  y ST1 es la mayor con  $\text{COF} = 0,02349$ , de acuerdo a esto, se puede decir que a mayor contenido de  $\text{TiO}_2$  menor es el COF.

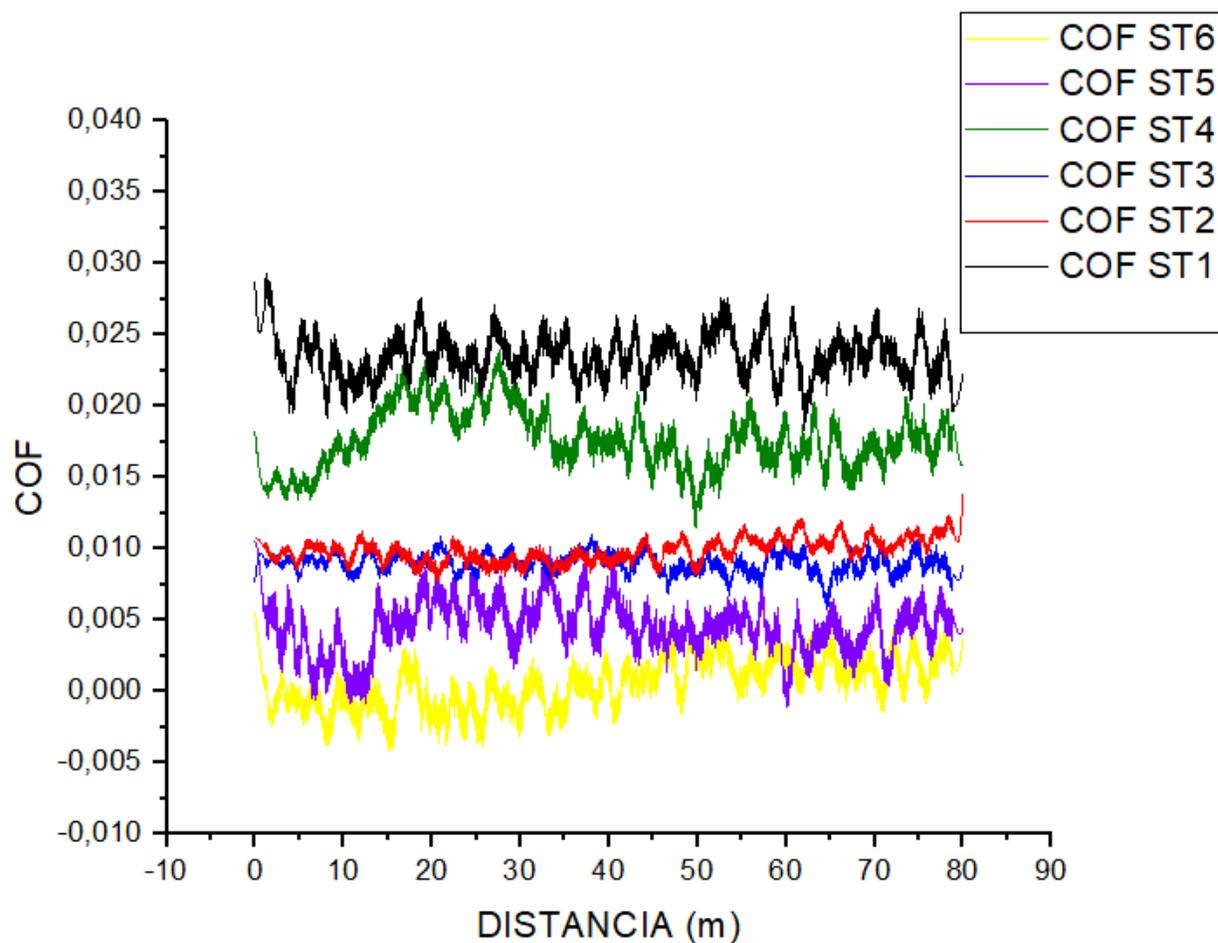


Figura 21 Gráfica de Coeficiente de fricción para cada uno de los sistemas.

Tabla 12 Promedio de COF para cada sistema.

<b>PROMEDIO COF</b>	
<b>SISTEMA</b>	<b>RMS</b>
<b>ST1</b>	0,02349
<b>ST2</b>	0,00987
<b>ST3</b>	0,00898
<b>ST4</b>	0,01762
<b>ST5</b>	0,004501
<b>ST6</b>	0,000547

## 7.7. Rendimiento de autolimpieza

De la figura 22 se puede estimar que la variación del potencial eléctrico en cada uno de los días es debido a la variación de la intensidad del sol y la disminución continua de este es debido a días soleados continuos sin lluvia que generan barreras de polvo. De acuerdo a los datos obtenidos se observa que los 3 sistemas presentaron en la mayoría de los días un mayor potencial eléctrico que el sustrato de vidrio sin recubrimiento.

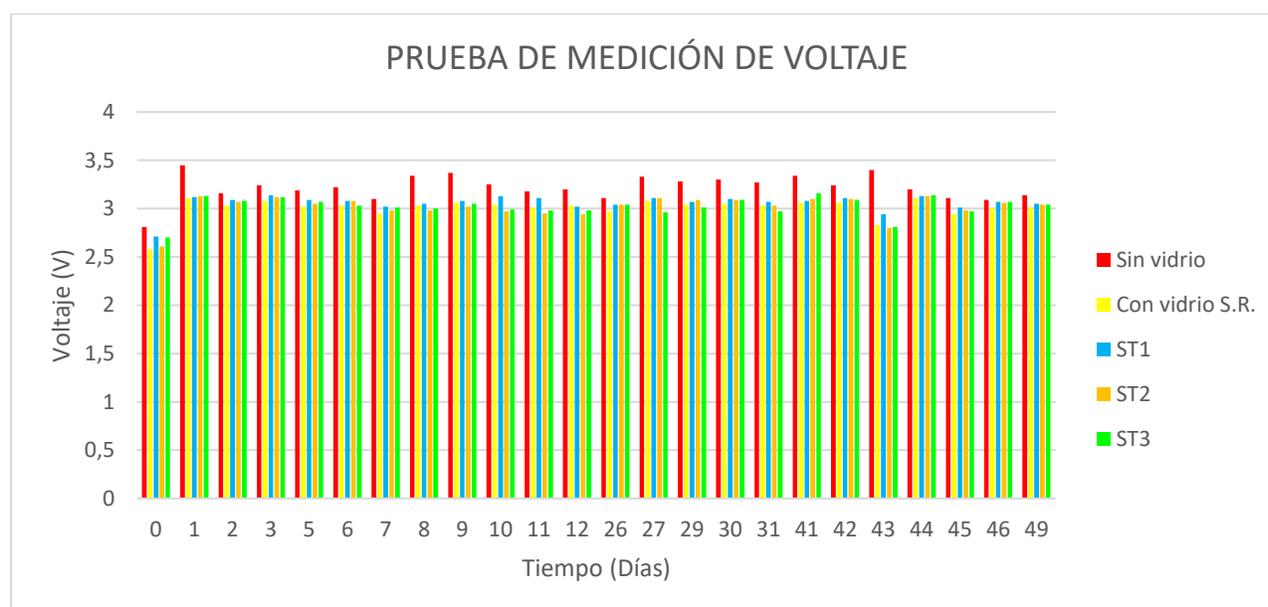


Figura 22 Prueba de eficiencia para los sistemas ST1, ST2 y ST3

Para tener un análisis más detallado de la eficiencia se elaboró la gráfica 23 tomando 4 días de la gráfica 22. Se compararon los datos del potencial eléctrico de los 3 sistemas y la del vidrio sin recubrimiento con respecto al panel sin vidrio que sería tomado como un 100% de la eficiencia al no tener exposición al medio ambiente.

Como es posible analizar en la figura 23 el sistema ST1 obtuvo mejor eficiencia con respecto a las otras dos películas y el vidrio sin recubrimiento. La eficiencia de los 3 sistemas durante un mes se mantuvo superior al 90%, se puede estimar que la eficiencia de los recubrimientos se mantendrá por encima de este promedio, sin embargo, se recomienda realizar un estudio del rendimiento de los sistemas a largo plazo.

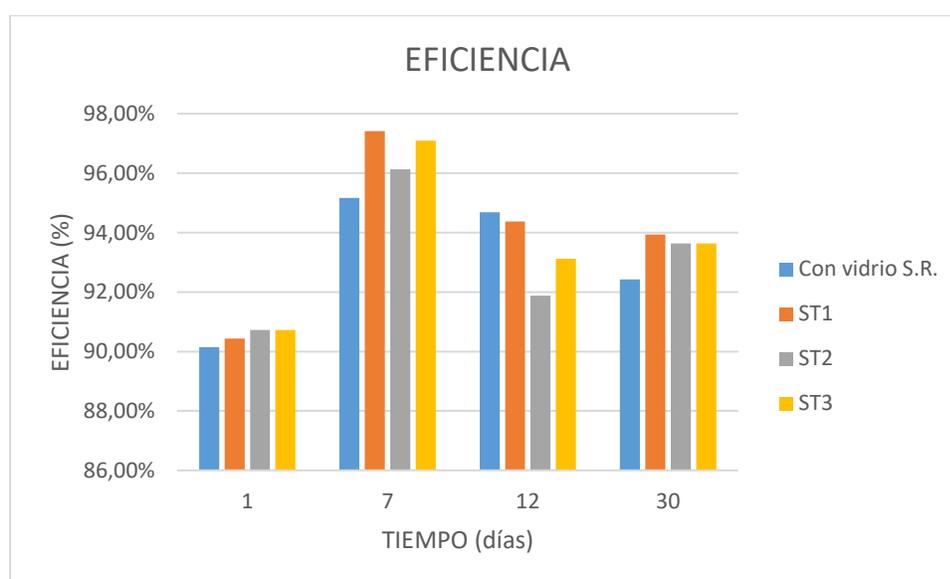


Figura 23 Eficiencia de los recubrimientos ST1, ST2, ST3 y el vidrio sin recubrimiento con respecto al panel fotovoltaico.

Analizando la figura 24 se observa que los recubrimientos ST4, ST5 y ST6 con mayor concentración de  $\text{TiO}_2$  nos permite afirmar que la propiedad de fotocatalisis y de autolimpieza mejora la estabilidad en la eficiencia a través del tiempo. La variación del potencial eléctrico en cada uno de los días es debido a la variación de la intensidad del sol.

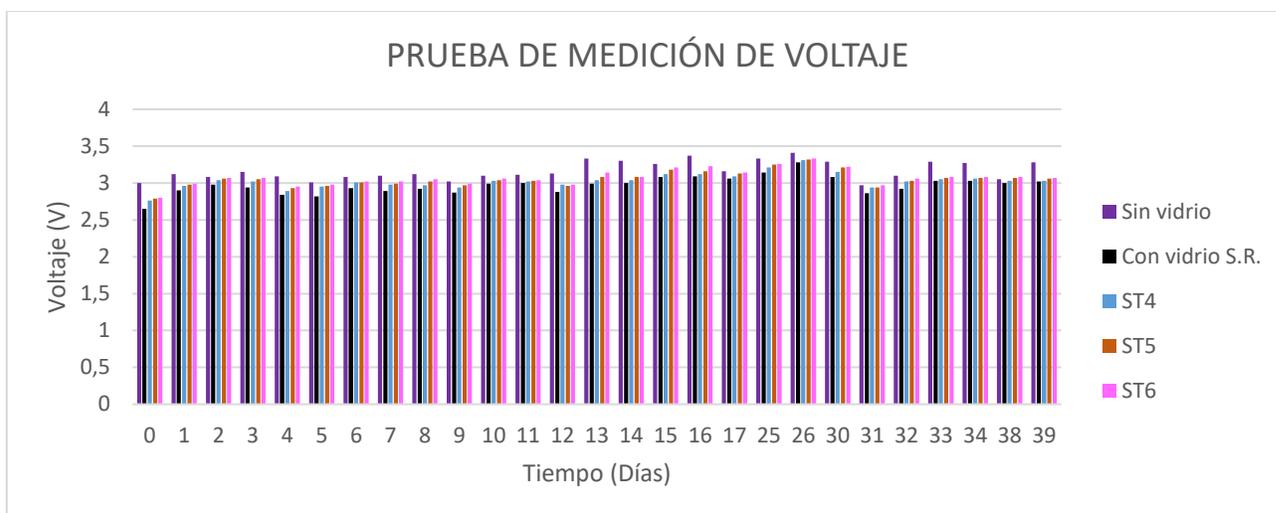


Figura 24 Prueba de eficiencia para los sistemas ST4, ST5 y ST6.

Los datos de la figura 25 no se pueden comparar con los de la figura 23 debido a que se desarrollaron en tiempos diferentes, esto conlleva a diferencias en las condiciones ambientales en las que estuvieron expuestas, sin embargo, los sistemas ST4, ST5 y ST6 presentaron una eficiencia por encima del 95%, superior a la de los sistemas ST1, ST2 y ST3, de acuerdo a esto podemos afirmar que los sistemas con mayor contenido de  $\text{TiO}_2$  muestran mejor rendimiento de autolimpieza que los sistemas con mayor  $\text{SiO}_2$ , siendo ST6 el mejor sistema para una estabilidad del potencial eléctrico a través del tiempo.

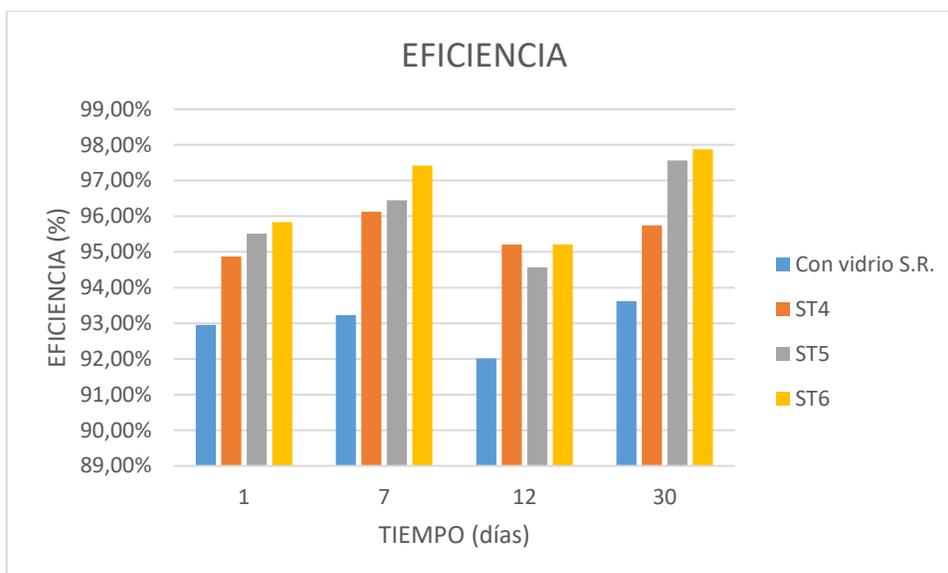
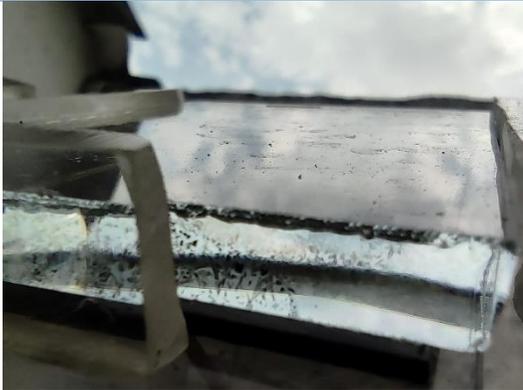
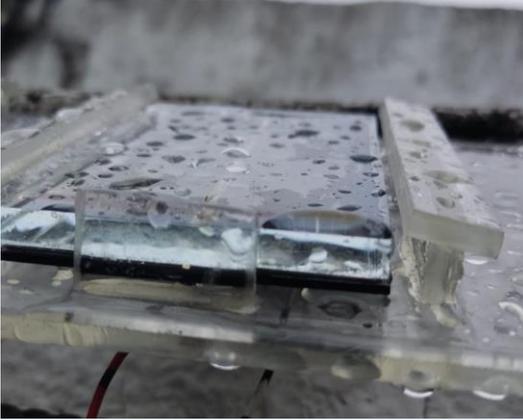
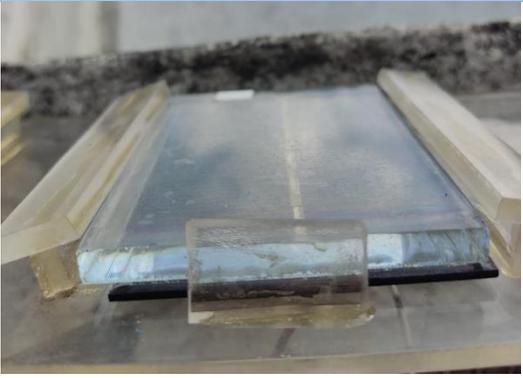


Figura 25 Eficiencia de los recubrimientos ST4, ST5, ST6 y el vidrio sin recubrimiento con respecto al panel fotovoltaico.

En la tabla 13 se evidencia la exposición que tuvo uno de los sustratos con el recubrimiento ST5, en la primera imagen se observa partículas de polvo sobre ella, esto es a causa de la generación de polvos en días soleados. En la siguiente imagen se puede observar la acción de autolimpieza con gotas de agua que presentan un ángulo menor a  $90^\circ$  y el agrupamiento de algunas gotas para un mayor contacto con la superficie que mejora el lavado de la suciedad, por último, se puede evidenciar que al día siguiente se volverá a obtener una superficie limpia a simple vista o por lo menos sin aquellas partículas visibles para el ojo humano.

Tabla 13 Ejemplo de autolimpieza en los sustratos de vidrios recubiertos.

<b>AUTOLIMPIEZA EN PANEL CON ST5</b>	
Días de exposición	Imagen
11 días expuesto al medio ambiente	
Lluvia en el día 12	
Día 13	

## 7.8. Análisis general de los sistemas

En la tabla 14 se califican cada uno de los sistemas de 1 a 6 para cada análisis realizado, donde 1 es la nota más baja y 6 la calificación que coincide con los objetivos del proyecto. El sistema ST5 que contiene  $\text{Si}_{20}\text{Ti}_{80}$ , representa en general las condiciones más óptimas para tener un recubrimiento antirreflectante y autolimpiante. El sistema ST6 nos presenta en sus resultados un recubrimiento con mejores propiedades de autolimpieza y el sistema ST3 un recubrimiento antirreflectante.

Tabla 14 Calificación de los sistemas para cada análisis realizado.

SISTEMA	Rugosidad	Calificación	% Transmitancia	Calificación	Ángulo de contacto UV	Calificación	COF	Calificación	Rendimiento de autolimpieza	Calificación	CALIFICACIÓN PROMEDIO
ST1	0,2971 nm	5	83%	3	12,78°	6	0,02349	1	95%	3	3,6
ST2	0,2938 nm	6	85%	5	23,56°	3	0,00987	3	94%	2	3,8
ST3	0,3191 nm	3	86%	6	36,84°	1	0,00898	4	93,80%	1	3
ST4	0,3031 nm	4	82%	2	15,72°	5	0,01762	2	95,6	4	3,4
ST5	0,3298 nm	2	84%	4	22,36°	4	0,004501	5	96,40%	5	4
ST6	0,3435 nm	1	80%	1	26,68°	2	0,000547	6	97%	6	3,2

## 8. Conclusiones

- Los análisis de DRX mostraron que los recubrimientos son amorfos al no indicar ningún pico característico de las fases cristalinas del  $\text{TiO}_2$ , esto es debido a que la película al ser tan delgada los rayos difractados fueron del sustrato de vidrio y no del recubrimiento, los átomos que constituyen el vidrio no están colocados en un orden repetitivo de largo alcance, por este motivo no presenta estructura cristalina.
- Los 6 sistemas muestran una morfología similar con rugosidad muy tenue. De acuerdo a los datos obtenidos por el promedio de rugosidad de cada uno de los sistemas, es correcto afirmar que a mayor concentración de  $\text{SiO}_2$  menor es la rugosidad  $\text{ST}_2= 50\text{Si}50\text{Ti}$  con un valor promedio de 0,2938 nm y  $\text{ST}_6= 10\text{Si}90\text{Ti}$  con valor promedio de 0,3435 nm, sin embargo, se obtuvieron valores muy pequeños de rugosidad, los recubrimientos más lisos brillan más que los más rugosos, por lo tanto, no contribuyen a la pérdida de reflejo y eventualmente aumentan la transmisión de la luz.
- En la comparación de los recubrimientos en los análisis de transmitancia con respecto al sustrato de vidrio sin recubrimiento, los sistemas que contienen mayor contenido de  $\text{SiO}_2$  presentan mejor transmisión de la luz UV vis ( $\text{ST}_3 \cong 86\%$ ), que los sistemas que contienen mayor contenido de  $\text{TiO}_2$  ( $\text{ST}_6 \cong 80\%$ ), esto se debe a que el  $\text{SiO}_2$  posee un bajo índice de refracción  $n=1,53-1,54$  en sus superficies porosas que facilitan la transmisión de luz, en cambio el  $\text{TiO}_2$  presenta un índice de refracción en la fase cristalina anatasa  $n=2,52$ . El sustrato de vidrio sin recubrimiento presenta un  $\%T \cong 90$ , y los sustratos recubiertos con cada uno de los sistemas se encuentran en un promedio  $\%T \cong (80 - 86)$ , esto indica que se cumple el objetivo de elaborar recubrimientos

antirreflectantes, ya que la variación de los %T es muy baja con respecto al vidrio sin recubrimiento.

- En el análisis de los ángulos de contacto podemos afirmar que las películas presentan alta energía superficial, al generar gotas hidrófilas ( $10^\circ < \theta < 90^\circ$ ). Al obtener recubrimientos hidrófilos se facilita la humectación y difusión completa de las gotas de agua sobre ellos, que a su vez transportarán la suciedad. Las superficies hidrófilas fotocatalíticas utilizan la luz solar para descomponer la suciedad y otras impurezas que se encuentran y la luz UV ayuda a generar superficies superhidrófilas fotoinducidas, en los resultados obtenidos de la medición de contacto se puede observar el efecto que hace la incidencia de esta luz sobre el ángulo de la gota, presentando como película más óptima al sistema ST1 que formó un ángulo de contacto después de haber estado en la oscuridad de tan sólo  $32,24^\circ$  y un ángulo de  $12,78^\circ$  después de ser irradiada con la luz UV.
- Los resultados del análisis realizado con el equipo nanovea tibometers T100 mostraron valores muy cercanos a 0, esto nos demuestra que se obtuvieron películas lisas, el sistema con menor coeficiente de fricción fue ST6 con  $\text{COF} = 0,000547$ .
- Del estudio de la eficiencia del voltaje con respecto al tiempo, los vidrios con recubrimientos mantuvieron una estabilidad en la eficiencia y un diferencial mínimo con respecto al panel sin vidrio, también se evidencia mayor potencial eléctrico con respecto al panel que contiene al vidrio sin recubrimiento.
- Se concluye de acuerdo a todos los análisis desarrollados en el proyecto con el fin de elaborar un recubrimiento antirreflectante y con propiedades de autolimpieza, el sistema ST5 es el más óptimo al presentar una superficie lisa con COF muy cercano a "0", un porcentaje de transmitancia alta con diferencial muy pequeño con respecto a la del vidrio

sin recubrimiento y presenta excelente estabilidad en las salidas de energías gracias al ángulo hidrófilo que se genera para un mayor contacto superficial y por ende mayor limpieza.

## 9. Recomendaciones

- Variar las velocidades de deposición de la película sobre el sustrato y las capas sobre ella con el fin de estudiar la morfología de la superficie y la relación con la rugosidad.
- Realizar estudio de dopaje con óxido de hierro sobre el  $\text{TiO}_2$ , ya que se estima que puede mejorar la actividad fotocatalítica del recubrimiento, analizar ángulos de contacto y el band gap para la eliminación de los contaminantes.
- Se recomienda realizar un estudio manejando otros tipos de temperaturas, mesetas y ratas de calentamiento, para obtener un análisis más detallado de DRX sobre las películas, se recomienda emplear la técnica de configuración haz rasante para películas delgadas, ya que para este caso se coloca el tubo de RX a un ángulo muy pequeño con respecto a la muestra y coloca al detector que se mueva sobre todo el ángulo de rotación, esto con el fin de lograr obtener de alguno de los rayos difractados un pico característico de las fases cristalinas del  $\text{TiO}_2$  de la película más no del sustrato de vidrio.
- Analizar la variación que genera la modificación del pH en la morfología, topografía y transmitancia en los recubrimientos, teniendo en cuenta que superficies más lisas generan mayor energía superficial y se transmite mejor la luz.
- En el estudio del ángulo de contacto emplear mayor tiempo de contacto de la luz UV sobre los recubrimientos y hacer un estudio del ángulo de contacto con respecto al tiempo y el sustrato de vidrio sin recubrimiento, analizar la relación que hay con el band gap y la eliminación de los contaminantes.

## Bibliografía

- Boutamart, M., Briche, S., Nouneh, K., Rafqah, S., & Agzenai, Y. (2020). Transparent and Self-Cleaning Surfaces Based on Nanocomposite Sol-Gel Coatings. *chemistry select*.
- Jilavi, M., Mousavi, S., Müller, T., & de Ol, P. (2017). Dual functional porous anti-reflective coatings with a photocatalytic effect based on a single layer system. *Applied Surface Science*.
- Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagómez Paucar, A. (2014). *Metodología de la investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis (cuarta edición)*. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.
- Sepúlveda Mora, S. B., Galban Pineda, M. G., & Contreras Sepúlveda, W. (2018). Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 7.
- ACIEM. (2020, Agosto 04). Recuperé sur [https://aciem.org/noticias-energia-colombia-aumentara-50-veces-su-capacidad-instalada-de-energia-renovable/?utm\\_source=newsletter\\_475&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=colombia-aumentara-50-veces-su-capacidad-instalada-de-energia-renovable-aciem](https://aciem.org/noticias-energia-colombia-aumentara-50-veces-su-capacidad-instalada-de-energia-renovable/?utm_source=newsletter_475&utm_medium=email&utm_campaign=colombia-aumentara-50-veces-su-capacidad-instalada-de-energia-renovable-aciem)
- Adak, D., Bhattacharyya, R., Saha, H., & Maiti, P. S. (2020). Sol-gel processed silica based highly transparent self-cleaning coatings for solar glass covers. *Materials today*, 5.
- Alam, K., Fareed, S., Ahmad Khan, U., Khan, S., Umar Farooq, M., Shakoor, A., & Saher, S. (2019). Development Of Anti-Reflective And Self-Cleaning Sio2 Nanoparticles Coatings For Photovoltaic Panels. *Communication and Computer Engineering (ICECCE)*.
- Appasamy, J. S., Kurnia, J. C., & Assadi, M. K. (2020). Synthesis and evaluation of nitrogen-doped titanium dioxide/single walled carbon nanotube-based hydrophilic self-cleaning coating layer for solar photovoltaic panel surface. *Solar energy*, 12.
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International thomson editores.
- Barkhade, T., & Banerjee, I. (2019). Optical Properties of Fe doped TiO2 Nanocomposites Synthesized by Sol-Gel Technique. *Materials today*, 6.
- Bautista Ruiz, J. H. (2012). *Síntesis, caracterización microestructural y resistencia a la corrosión de películas delgadas de Bi Si O producidas por el método sol-gel*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Brinker, C., Hurd, A., Schunk, P., Frye, G., & Ashley, C. (1992). Review of sol-gel thin film formation. *Non-Crystalline Solids*.
- Brinker, C., Hurd, A., Schunk, P., Frye, G., & Ashley, C. (1992). Review of sol-gel thin film formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*.
- Camera, F. L. (s.d.). IRENA. Recuperé sur <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>

- Chaoyou, T., & Lin, Z. (2020). Fabrication of multifunctional closed-surface SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> antireflective thin. *Colloids and Surfaces A*.
- Chavez Mendiola, E., Carrillo Castillo, A., Godoy Rosas, R., & Castillo, S. (2018). APLICACIÓN DE EQUIPO CARY UV VIS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS Y SOLUCIONES.
- Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Universidad de America*.
- corporation, D. (2022). *Defelsko*. Récupéré sur <https://es.defelsko.com/resources/test-methods-for-coating-adhesion>
- Decco, O., Engelke, W., Zuchuat, J., & Cura, A. (2019). Estudio de la fotofuncionalización de membrana rígidas de cromo-cobalto utilizadas en la generación de aumento óseo mediante radiación ultravioleta controlada. *Ciencia, Docencia y Tecnología suplemento*.
- Flores Larsen, S., Hernandez, A. L., & Lesino, G. (203). Transmitancia de materiales fotoselectivos para cubiertas de invernaderos. *Universidad Nacional de la Plata*.
- Flores, J., Caballero, C., & Moreira, M. A. (2008). Una interpretación aproximativa del concepto de Hidrólisis en estructuras peptídicas en un Curso de Bioquímica del IPC en el contexto de la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud. *Revista de investigación*, 26.
- Ganbavle, V., Bangi, U., Latthe, S., Mahadik, S., & Venkateswara Rao, A. (2011). Self-cleaning silica coatings on glass by single step sol-gel route. *Surface & Coatings Technology*.
- Gonzalez, M., & Castellón, J. (2005). Microscopio de fuerza atómica. *Universidad autónoma del estado de morelos*.
- González Hernández, J., Pérez Robles, J., Ruiz, F., & Martínez, J. (2020). Vidrios SiO<sub>2</sub> nanocompuestos preparados por sol-gel: revisión.
- González, M. (2010, Noviembre 8). *La guía*. Récupéré sur Química: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/transmitancia-y-absorbancia>
- Gupta, V., Sharma, M., Pachauri, R. K., & Dinesh Babu, K. (2019). Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques. *Solar Energy*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). *Metodología de la investigación*. Naucalpan de Juárez, México: McGRAW - HILL INTERAMERICANA DE MÉXICO.
- IEA (2020). (s.d.). Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- Ingaruca Alvarez, E., Vilca Moreno, O., Rojas Zacarías, E., Ochoa León, H., Caro Meza, E., & Tinoco Bernuy, E. (2022). Evaluación de la temperatura y el tiempo de calcinación en la síntesis y caracterización de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para el uso como agente antibacterial. *UNCP*.
- Kazem, H., Chaichan, M., Al-Waeli, A., & Sopian, K. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*.

- Kim, B.-M., Yadav, H., & Kim, J.-S. (2016). Self-cleaning performance of sol-gel-derived TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> double-layer thin films. *American Coatings Association*.
- Kolahalam, L., Kasi Viswanath, I., Diwakar, B., Govindh, B., Reddy, V., & Murthy, Y. (2019). Review on nanomaterials: Synthesis and applications. *Materials Today: Proceedings*.
- Lin, W., Zheng, J., Yan, L., & Zhang, X. (2017). Sol-gel preparation of self-cleaning SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> double-layer antire- flective coating for solar glass. *Results in physics*.
- Liu, J., Ma, N., Wu, W., & He, Q. (2020). Recent progress on photocatalytic heterostructures with full solar spectral responses. *Chemical Engineering Journal*.
- Lopez, e. a. (2011). Fotocatálisis heterogenea.
- Malvernpanalytical. (2022). Récupéré sur [https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Empyrean%20Brochure\\_tcm50-56767.pdf](https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/Empyrean%20Brochure_tcm50-56767.pdf)
- MinAmbiente. (2013, 09 18). *Norma técnica Colombiana NTC 6018*. Récupéré sur [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello\\_ambiental\\_colombiano/NTC\\_6018\\_-\\_Etiquetas\\_Ambientales\\_Tipo\\_I.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/NTC_6018_-_Etiquetas_Ambientales_Tipo_I.pdf)
- Moraes Lopes de Jesus, M. A., da Silva Neto, J. T., Timò, G., Perdigão Paiva, P. R., S Dantas, M. S., & Ferreira, A. d. (2015). Superhydrophilic self-cleaning surfaces based on TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite films for photovoltaic module cover glass. *Applied adhesion science*.
- Moraes Lopes de Jesus, M. A., Timò, G., Sáenz, C. A., Braceras, I., Cornelli, M., & Ferreira, A. (2018). Anti-soiling coatings for solar cell cover glass: Climate and surface properties influence. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- Mosquera Espinel, E. G. (2016). Obtención de películas delgadas de dióxido de titanio sobre superficies vítreas para generar propiedades autolimpiables. *Proyecto previo a la obtención del título de ingeniería química*. Quito.
- Nacional, M. d. (2015). *ORIENTACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN EN LOS ESTABLECIMIENTOS EDUCATIVOS DEL MANUAL DE NORMAS DE SEGURIDAD EN EL LABORATORIO DE QUÍMICA Y DE FÍSICA*. Récupéré sur [https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355749\\_recurso\\_normatividad.pdf](https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355749_recurso_normatividad.pdf)
- Nanosurf. (2022). *Nanosurf AG*. Récupéré sur <https://www.nanosurf.com/en/products/naioafm-the-leading-compact-afm>
- Nayak, P., Mahesh, S., Snaith, H., & Cahen, D. (2019). Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. *Nature Reviews Materials*.
- Nevarez, M., Espinoza, P., Quiroz, F., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perpectivas a través del TiO<sub>2</sub> . *Avances en Química*.
- Osorio Hernández, J. I., Ramos Galván, C. E., García Alamilla, R., Morales Cepeda, A. B., & Rivera Armenta, J. L. (2017). EFECTO DEL PROCESO DE CALCINACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE ACIDEZ SUPERFICIAL EN TiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>. *Academia Journals*.

- Padmanabhana, N., & John, H. (2020). Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Pérez Pérez, J. (2007). *Difracción de Rayos X*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Quan, Y. Y., & Zhang, L. Z. (2017). Experimental investigation of the anti-dust effect of transparent hydrophobic coatings applied for solar cell covering glass. *Solar energy materials y solar cells*, 8.
- Rad, A. S., Afshar, A., & Azadeh, M. (2020). Anti-reflection and self-cleaning meso-porous TiO<sub>2</sub> coatings as solar systems protective layer: Investigation of effect of porosity and roughness. *Optical materials*, 9.
- Raimondo, M., Zanelli, C., Guarini, G., Dondi, M., Marani, F., & Fossa, L. (2012). Baldosas cerámicas fotocatalíticas: factores claves para el aumento de la escala a nivel industrial (y la cuestión abierta del comportamiento). *ISTEC-CNR*.
- Ramirez Riaño, D. A. (2017). *SÍNTESIS POR SOL-GEL DE UN RECUBRIMIENTO NANOESTRUCTURADO DE TiO<sub>2</sub> PARA SER APLICADO EN SUSTRATO DE VIDRIO*. Bogotá.
- Ren, Y., Li, W., Cao, Z., Jiao, Y., Xu, J., Liu, P., . . . Li, X. (2020). Robust TiO<sub>2</sub> nanorods-SiO<sub>2</sub> core-shell coating with high-performance self-cleaning properties under visible light. *Applied surface science*, 10.
- Rojas Cervantes, M. L. (2015). Diseño y síntesis de materiales “a medida” mediante el método sol-gel.
- Samet Sarkin, A., Ekren, N., & Saglam, S. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Elsevier*, 11.
- Sayem Mozumder, M., I. Mourad, A. -H., Pervez, H., & Surkatti, R. (2019). Recent developments in multifunctional coatings for solar panel. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102.
- Serway, r., & Beichner, R. (2002). *Física para ciencias e ingeniería tomo II*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- Smith, w., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mc Graw Hill.
- Sun, X., Li, L., Xu, X., Song, G., Tu, J., Yan, P., . . . Hu, K. (2020). Preparation of hydrophobic SiO<sub>2</sub>/PTFE sol and antireflective. *Elsevier*.
- Tao, C., Zou, X., Du, K., Zhou, G., Yan, H., Yuan, X., & Zhang, L. (2018). Fabrication of robust, self-cleaning, broadband TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> doublelayer antireflective coatings with closed-pore structure through a surface sol-gel process. *Journal of alloys and compounds*.
- Travizano, M., Romano, S., & Kamienskowski, J. (2002). Determinación de la banda prohibida (Band gap) en si. *UBA*.
- Velu Kaliyannan, G., Velmurugan Palanisamy, S., Priyanka, E., Thangavel, S., Sivaraj, S., & Rathanasamy, R. (2020). Investigation on sol-gel based coatings application in energy sector – A review. *Materials Today: Proceedings*.

- Villanueva Jaramillo, C. (2011). Fotocatálisis con TiO<sub>2</sub>/ultravioleta y TiO<sub>2</sub> CuSO<sub>4</sub>/visible como sistemas de desinfección para inactivar E. coli proveniente de agua residual doméstica.
- XU, R., POPE, E. J., & MACKENZIE, J. D. (1998). Structural evolution of sol-gel systems through viscosity measurement.
- Yao, L., He, J., Genga, Z., & Ren, T. (2015). Fabrication of mechanically robust, self-cleaning and optically high-performance hybrid thin films by SiO<sub>2</sub>&TiO<sub>2</sub> double-shelled hollow nanospheres. *royal society of chemistry*.
- Yuan, J., Yan, S., Xiao, Z., & Hu, J. (2020). Multifunctional closed-pore silica/titania composite antireflective coatings. *Colloids and surfaces a*.
- Yun Hee, J., Verma Kumar, L., James Danner, A., Yang, H., & Singh Bhatia, C. (2012). The Effect of Dust on Transmission and Self-cleaning Property of Solar Panels. *Energy Procedia*.
- Zhang , M., E, L., Zhang , R., & Liu, Z. (2018). The effect of SiO<sub>2</sub> on TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> composite film for self-cleaning application. *Surfaces and Interfaces*.
- Zhong, H., Hu, Y., Wang, Y., & Yang, H. (2017). TiO<sub>2</sub>/silane coupling agent composed of two layers structure: A super-hydrophilic self-cleaning coating applied in PV panels. *Applied energy* , 7.