

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica



**Estudio del efecto plasmónico de nanopartículas de plata en la absorción
de energía solar**

Tesis presentada por el Bachiller:

Patiño Castro, Luis Emilio

ORCID: 0009-0005-3206-8477

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor:

Mg. Carpio Rivera, Marco Antonio

ORCID: 0000-0003-4730-0230

Arequipa - Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Diciembre del 2023

Dictamen: 004659-C-EPIMMEM-2023

Visto el borrador del expediente 004659, presentado por:

2016101391 - PATIÑO CASTRO LUIS EMILIO

Titulado:

**ESTUDIO DEL EFECTO PLASMÓNICO DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN LA ABSORCIÓN DE
ENERGÍA SOLAR**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29361846 - CHIRE RAMIREZ EMILIO
DICTAMINADOR**



**29667313 - ALCAZAR ROJAS HERMAN ENRIQUE
DICTAMINADOR**



**29685318 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS
DICTAMINADOR**



Estudio del efecto plasmónico de nanopartículas de plata en la absorción de energía solar

ORIGINALITY REPORT

11%	11%	2%	2%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	docplayer.es	4%
Internet Source		

2	e-spacio.uned.es	2%
Internet Source		

3	www.optoprim.com	1%
Internet Source		

4	vsip.info	1%
Internet Source		

5	ciqa.repositorioinstitucional.mx	1%
Internet Source		

6	repositorio.utp.edu.co	1%
Internet Source		

7	eprints.soton.ac.uk	1%
Internet Source		

8	hdl.handle.net	1%
Internet Source		

9	repositorio.uncp.edu.pe	1%
Internet Source		

DEDICATORIA

*El presente trabajo va dedicado a aquellas personas
que depositaron su confianza en mí y me han
acompañado en estos aún cortos años de mi vida
profesional y laboral.*

*Una dedicación especial a la memoria de mi madre,
por formar la persona que soy hoy en día, sé que
debe estar orgullosa de cada paso que doy.*



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios, por haberme dado la fuerza y sabiduría para abocarme a este nuevo desafío en mi vida profesional. Agradezco la confianza y el apoyo indispensable brindado por parte de mi familia. A mi padre y hermano, que su compañía fue fruto de grandes logros y superaciones, a mi madre que desde el cielo va guiándome y acompañándome en mis decisiones.

Agradezco también al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Católica de Santa María, a través del Dr. Leopoldo Alcázar y del Dr. Hermann Alcázar, por haberme permitido ser partícipe del proyecto 2019 - Fondo Docente Tiempo Completo 27495-R-2020 "Ruptura del agua por proceso foto-catalítico, sobre catalizadores a base de grafeno modificados por Óxido de Cobre", el cual me ha permitido desarrollar esta tesis. Finalmente, agradecer a mis seres queridos y más grandes amigos, que siempre fueron fuente de apoyo y reconforte demostrándome el verdadero significado de amor y amistad.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.



RESUMEN

En este trabajo de tesis se estudió el efecto plasmónico de nanopartículas de plata (AgNPs) en microcolectores solares. Para ello, se sintetizaron AgNPs variando los diferentes parámetros que forman parte de su obtención, y se caracterizaron mediante UV-visible, zetasizer y microscopia electrónica de transmisión (TEM). Posteriormente, se evaluó el diferencial de temperatura de las AgNPs en un microcolector solar bajo un sistema dinámico y estático respectivamente establecidos, variando la velocidad de flujo y la concentración de las AgNPs. Por medio de la espectroscopia UV-visible se identificó que la intensidad de absorbancia de las muestras aumenta a medida que aumenta el pH y alcanza su mayor valor cuando la concentración de plata es de 0.2 ml de AgNO_3 .

La evaluación del zetasizer mostró que el pH y la concentración de las AgNPs pueden modificar su estructura y tamaño. En el caso del pH, a medida que aumenta, también aumenta el tamaño de las nanopartículas con una dispersión poblacional más uniforme. La muestra SP07, presentó un tamaño de 94,02 nm con un área poblacional del 100 %.

Mediante TEM, se mostró que las AgNPs tienen una estructura esférica o cuasi esférica. El tamaño de las AgNPs aumenta a medida que aumenta el pH o la concentración de plata.

La evaluación del diferencial de temperatura mostró que el diferencial es mayor a menor velocidad de flujo, es el caso de la muestra E2-025 bajo sistema dinámico que alcanzó un diferencial de temperatura de 1.316°C . Esto se debe a que las nanopartículas tienen mayor tiempo de interacción para absorber energía solar a menor velocidad de flujo. Además, entre el sistema estático y dinámico se mostró que el sistema dinámico es el óptimo en cuanto a obtener un mayor diferencial de temperatura. Esto se debe a que las nanopartículas tienen más libertad de movimiento en el sistema dinámico, lo que les permite absorber más energía solar.

La evaluación del diferencial de temperatura variando la intensidad luminosa mostró que guardan una regresión no lineal por causa del efecto plasmónico, ya que si no se aplicara este efecto, el comportamiento entre las variables mencionadas sería netamente lineal.

En general, los resultados de este trabajo de tesis muestran que las AgNPs son un material prometedor para la aplicación en colectores solares gracias a su propiedad plasmónica. Las AgNPs pueden mejorar la absorción de energía solar y, por lo tanto, la eficiencia de conversión fototérmica en los colectores solares.

Palabras Clave: Plasmónica, nanopartículas de plata, colectores solares.

ABSTRACT

In this thesis work, the plasmonic effect of silver nanoparticles (AgNPs) in solar microcollectors was studied. To do this, AgNPs were synthesized by varying the different parameters that are part of their production, and they were characterized by UV-visible, zetasizer and transmission electron microscopy (TEM). Subsequently, the temperature differential of the AgNPs in a solar microcollector was evaluated under a dynamic and static system respectively established, varying the flow speed and concentration of the AgNPs.

Through UV-visible spectroscopy, it was identified that the absorbance intensity of the samples increases as the pH increases and reaches its highest value when the silver concentration is 0.2 ml of AgNO₃.

The evaluation of the zetasizer showed that the pH and concentration of the AgNPs can modify their structure and size. In the case of pH, as it increases, the size of the nanoparticles also increases with a more uniform population dispersion. Sample SP07 had a size of 94.02 nm with a demographic area of 100%.

Using TEM, it was shown that AgNPs have a spherical or quasi-spherical structure. The size of AgNPs increases as the pH or silver concentration increases.

The evaluation of the temperature differential showed that the differential is greater at lower flow speeds, this is the case of sample E2-025 under a dynamic system that reached a temperature differential of 1,316°C. This is because nanoparticles have a longer interaction time to absorb solar energy at a lower flow rate. Furthermore, between the static and dynamic system it was shown that the dynamic system is the optimal one in terms of obtaining a greater temperature differential. This is because the nanoparticles have more freedom of movement in the dynamic system, allowing them to absorb more solar energy.

The evaluation of the temperature differential varying the light intensity showed that they have a non-linear regression due to the plasmonic effect, since if this effect were not applied, the behavior between the aforementioned variables would be clearly linear.

In general, the results of this thesis show that AgNPs are a promising material for application in solar collectors thanks to their plasmonic property. AgNPs can improve solar energy absorption and therefore photothermal conversion efficiency in solar collectors.

Keywords: Plasmonic, silver nanoparticles, solar collectors.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTAS DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	6
1.2.1 Justificación económica.....	6
1.2.2 Justificación ambiental	6
1.2.3 Justificación tecnológica.....	6
1.2.4 Justificación social.....	7
1.3 ALCANCES.....	7
1.4 LIMITACIONES	7
1.5 VARIABLES	7
1.5.1 Variables independientes	7
1.5.2 Variables dependientes	8
1.6 OBJETIVOS	8
1.6.1 Objetivo General.....	8
1.6.2 Objetivos Específicos	8
CAPITULO II.....	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. ANTECEDENTES	10
2.2. NANOMATERIALES	12
2.2.1. Nanopartículas	14

2.2.2. Nanopartículas Metálicas	14
2.2.3. Obtención de nanopartículas de plata	15
2.2.4. Métodos físicos	17
2.2.5. Métodos químicos	19
2.2.6. Métodos biológicos	20
2.2.7. Síntesis de nanoestructuras usando métodos ópticos	20
2.2.8. Técnicas de caracterización de nanopartículas de plata	22
2.3. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES DE LAS NANOPARTICULAS DE PLATA	27
2.3.1. Efecto del agente estabilizador en la síntesis de nanopartículas de plata	27
2.3.2. Efecto del pH en la síntesis de nanopartículas de plata	28
2.3.3. Síntesis de nanopartículas de plata con diferentes formas	28
2.4. APLICACIONES DE LAS NANOPARTICULAS METALICAS	29
2.4.1. Aplicaciones de las nanopartículas de plata	31
2.4.2. Fenómeno de atrapamiento de luz	32
2.4.3. Esparcimiento de luz	34
2.5. EFECTO PLASMONICO	35
2.5.1. Resonancia de plasmones superficiales localizados	36
2.5.2. Nanopartículas de plata plasmónica	37
2.5.3. Efecto plasmónico en nanopartículas	42
2.6. CONVERSION DE ENERGIA SOLAR FOTOTÉRMICA	44
2.6.1. Propagación de radiación EM en un medio	44
2.7. AVANCES EN LA APLICACIÓN DE NANOFLUIDOS EN COLECTORES SOLARES	45
2.7.1. Nanofluidos con un solo tipo de partícula	48
2.8. NANOFLUIDOS PLASMONICOS USADO EN COLECTORES SOLARES	49
2.9. RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO	51
2.9.1. Tipos según su estructura de red	52
2.9.2. Isoporosas	53
2.10. TIPOS SEGÚN SU GRUPO FUNCIONAL	53
2.10.1. Resinas catódicas de ácido fuerte	53
2.10.2. Resinas catódicas de ácido débil	53
2.10.3. Resinas aniónicas de base fuerte	53
2.10.4. Resinas aniónicas de base débil	54
2.10.5. Resinas quelantes	55
2.11. APLICACIONES DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO PARA SOLUCION DE NANOPARTICULADO DE PLATA	55
CAPITULO III	57
3. MATERIALES Y MÉTODOS	59

3.1. METODOLOGÍA.....	59
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	60
3.2.1. Materiales y Reactivos.....	60
3.2.2. Materiales y equipos	60
3.3. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION	61
3.4. METODOS DE INVESTIGACION	61
3.4.1. Variables independientes	62
3.4.2. Variables dependientes	62
3.4.3. Número de ensayos.....	62
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACION DE DATOS	63
3.5.1. Síntesis de nanopartículas de plata	63
3.6. CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA	67
3.6.1. Espectroscopia UV-visible	67
3.6.2. Zetasizer.....	69
3.6.3. Microscopia electrónica de transmisión (TEM)	70
3.7. APLICACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA EN MICROCOLECTOR SOLAR.....	71
3.7.1. Aplicación de AgNP en microcolector solar bajo Sistema Dinámico.....	71
3.7.2. Aplicación de AgNP en microcolector solar bajo Sistema Estático.....	72
3.7.3. Aplicación de resinas en el microcolector solar	75
3.8. CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PARA ESTUDIO DE EFECTO PLASMÓNICO EN MICROCOLECTOR SOLAR.....	78
3.8.1. Diseño de Microcolector Solar	78
3.8.2. Procedimiento para medición de diferencial de temperatura	79
3.8.3. Regulación de velocidad de fluido en microcolector solar.....	80
3.8.4. Consideraciones para la realización de pruebas en microcolector solar.....	81
CAPITULO IV	82
4. RESULTADOS Y DISCUCIONES	83
4.1. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA (AgNPs)	83
4.1.1. Resultados de caracterización de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible.....	83
4.1.2. Resultados de caracterización de AgNPs usando Zetasizer	86
4.1.3. Resultados de caracterización de AgNPs en Microscopia electrónica de transmisión (TEM).....	89
4.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL EFECTO PLASMÓNICO DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA	94
4.2.1. Evaluación del Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Dinámico.....	95
4.2.2. Evaluación de Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Estático.....	96
4.2.3. Análisis de la Intensidad Luminosa.....	96

CONCLUSIONES.....	98
RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS	101
ANEXOS.....	114



ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Página</u>
Figura 2. 1. División de los Nanomateriales.....	13
Figura 2. 2. Síntesis de AgNPs.....	16
Figura 2. 3. Estrategias utilizadas para la síntesis de nanopartículas metálicas.....	17
Figura 2. 4. Enfoque “Botttom-Up” y “Top-Down” para la obtención de un nanomaterial..	21
Figura 2. 5. Caracterización de AgNPs preparadas a base de especie Bacillus usando diversas técnicas.....	23
Figura 2. 6. Esquema del funcionamiento del equipo NTA para el rastreo de nanopartículas.....	26
Figura 2. 7. Esquema del funcionamiento de un microscopio electrónico de transmisión (TEM).....	27
Figura 2. 8. Esparcimiento de Luz.....	30
Figura 2. 9. Clasificación de diferentes morfologías típicas de las AgNPs y AuNPs y su localización en el espectro UV-Vis según la absorción provocada por la SPR	32
Figura 2. 10. Diagramas esquemáticos que ilustra una superficie de plasmón.....	36
Figura 2. 11. Resonancia de plasmón superficial localizado de nanopartículas metálicas esféricas.....	36
Figura 2. 12. Espectro de absorción de nanopartículas de oro.....	37
Figura 2. 13. Diagrama del efecto LSPR en nanofluidos de Au plasmáticos.....	51
Figura 3. 1. Metodología del proyecto de tesis	59
Figura 3. 2. Formación de nanopartículas de plata	64
Figura 3. 3. Equipo de espectrofotometría UV-Vis, marca ThermoScientific modelo Genesys 150.....	68
Figura 3.4. Muestras en tubo de ensayo diluidas en agua destilada para espectrofotometría.....	69
Figura 3.5. ZetaSizer Nano-ZS, marca Malvern modelo ZEN 3600.....	70
Figura 3. 6. Microscopio electrónico de transmisión TEM	70
Figura 3. 7. Aplicación de AgNP en microcolector bajo Sistema Dinámico.....	71
Figura 3. 8. Pesado y lavado de resina a regenerar	73
Figura 3. 9. Mezcla de resina con su respectiva solución de activación	73
Figura 3. 10. Lavado y filtrado de resina a regenerar	74
Figura 3. 11. Medición de conductividad para comprobación de regeneración de resina	74
Figura 3. 12. Almacenamiento de resina regenerada	75
Figura 3. 13. Reacción de resinas de intercambio iónico con soluciones AgNP	76
Figura 3. 14. Aplicación de resina en el microcolector solar.....	77
Figura 3. 15. Formación de empaques de resina aniónica para aplicación en microcolector solar	77
Figura 3. 16. Diseño de microcolector solar	78
Figura 3. 17. Circuito para medición de temperatura.....	79
Figura 3. 18. Arreglo final de sistema de medición de temperatura	80
Figura 3. 19. Bomba peristáltica para regulación de velocidad de flujo.....	80
Figura 3. 20. Toma de lectura del diferencial de temperatura en circuito de microcolector solar	81

Figura 4. 1. Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-Visible ...	84
Figura 4. 2. Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible.	85
Figura 4. 3. Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Zetasizer.	86
Figura 4. 4. Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Zetasizer.	88
Figura 4. 5. Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando TEM.....	90
Figura 4. 6. Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando TEM	91
Figura 4. 7. EDS de AgNPs según el pH	92
Figura 4. 8. EDS de AgNPs según la concentración.....	93
Figura 4. 9. Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Dinámico.....	95
Figura 4. 10. Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Estático.	96
Figura 4. 11. Análisis de la Intensidad Luminosa.....	97



ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 3. 1. Variables independientes.....	62
Tabla 3. 2. Codificación de ensayos.....	63
Tabla 3. 3. Soluciones elaboradas por variación de Nitrato de Plata y pH.....	64
Tabla 3. 4. Metodología de Síntesis de nanopartículas de plata.....	65
Tabla 3. 5. El procedimiento la caracterización de espectroscopia UV visible.....	68
Tabla 3. 6. Procedimiento para el uso de Zetasizer	69
Tabla 3. 7. Procedimiento para la regeneración de resinas.....	72
Tabla 4. 1. Resumen del efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible	84
Tabla 4. 2. Resumen del efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible.....	86
Tabla 4. 3. Resumen del efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Zetasizer	87
Tabla 4. 4. Resumen del efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Zetasizer	89
Tabla 4. 5. Análisis de la relación Ag/Cu por el efecto de pH en la obtención de AgNPs.....	93
Tabla 4. 6. Análisis de la relación Ag/Cu por el efecto de pH en la obtención de AgNPs.....	94



LISTAS DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS

SSF	Sistemas Solares Fotovoltaicos
SAS	Sistemas de Absorción de Superficie
NTC	Nanotubos de Carbono
RPSL	Resonancia de Plasmón de Superficie Localizada
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
RPS	Resonancia de Plasmón de Superficie
NTA	Análisis de seguimiento de nanopartículas
AgNPs	Nanopartículas de Plata
NF	Nanofluidos
NTC	Nanotubos de Carbono
NPs	Nanopartículas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ISO	Organización Internacional de Estandarización
AuNPs	Nanopartículas de Oro
TiNPs	Nanopartículas de Titanio
PLD	Ablación por Láser Pulsante
CVD	Deposición Química de Vapor
XRD	Difractometría de Rayos X
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
XPS	Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X
DLS	Dispersión Dinámica de Luz
SEM	Barrido Electrónico Microscopía

TEM	Microscopía Electrónica de Transmisión
AFM	Microscopía de Fuerza Atómica
UV-Vis	Espectroscopia Ultravioleta-Visible
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
EMCD	Cámara de Carga Acoplada de Electrones
PVP	Polímero Polivinilpirrolidona
PZC	Punto de Carga Cero
SPASERs	Superficie de Plasmón Amplificada por Emisión Estimulada por Radiación
EM	Electrones Radiación
DASC	Colectores Solares de Absorción Directa
CSP	Concentración de Energía Solar
FPSC	Colectores Solares de Placa Plana
ETSC	Colectores Solares de Tubo de Vacío
PTSC	Colectores Solares Cilindro Parabólicos
PV/T	Colector Fotovoltaico Térmico
UCSM	Universidad Católica de Santa María
RTD	Detector de Temperatura por Resistencia
EDS	Espectroscopía de Energía Dispersiva

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{λ}	Intensidad de la Radiación Espectral
f_v	Fracción de volumen de las nanopartículas
$Q_{e\lambda}$	Eficiencia de extinción de las nanopartículas individuales
$\sigma_{e\lambda, \text{agua}}$	Coefficiente de extinción del fluido base
ΔQ	Energía térmica
ml	Mililitro
AgNO_3	Nitrato de Plata
nm	Nanómetro
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
kW	Kilovatio
$\text{kWh/m}^2 \text{ día}$	Kilovatio hora por metro cuadrado día
RPM	Revoluciones por Minuto
Au	Oro
Ag	Plata
Cu	Cobre
TiO_2	Dióxido de Titanio
Ag^+	Catión de Plata
Ag^0	Átomos de plata
OH^-	Ion Hidróxido
H^+	Ion de Hidrógeno
C_{ext}	Sección transversal de extinción
C_{abs}	Sección transversal de absorción
C_{sca}	Sección transversal de esparcimiento
λ	Longitud de onda

α	Polarizabilidad
p	Porcentaje de llenado del nanocomposito
n_d	Índice de refracción del dieléctrico
ϵ_d	Constante dieléctrica del vidrio
ω_p	Frecuencia en la que ocurre la resonancia
$X_{eff}^{(3)}$	Reforzamiento de la susceptibilidad de tercer orden efectiva
$X_{diel}^{(3)}$	Susceptibilidad de tercer orden del metal
f_1	Factor de corrección del campo local
Al_2O_3	Alúmina
MW	Megavatios
ZnO	Oxido de Zinc
MgO	Oxido de Magnesio
ppm	Partes Por Millon
CuO	Oxido de Cobre
SiO_2	Dioxido de Silicio
SO_3H	Ácido Bencensulfónico
COOH	Grupo Carboxilo o Grupo Carboxi
R_4N^+	Sal de Amonio Cuaternario
-NH ₂	Grupos de amina primaria secundaria
-NHR	Grupos de amina secundaria
-NR ₂	Grupos de amina terciaria
H_2CO_3	Ácido Carbónico
H_2SiO_3	Ácido Silícico
R ⁻	Intercambiador catiónico
A ⁺	Catión Intercambiable del Sólido

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de fuentes de energía sostenible y eficiente se ha convertido en un imperativo global ante los desafíos ambientales y energéticos que enfrenta la sociedad contemporánea. En este contexto, la utilización de nanopartículas de plata como agentes plasmónicos para mejorar la absorción de energía solar ha emergido como un área de investigación prometedora. Este trabajo de tesis se centra en el estudio del efecto plasmónico de nanopartículas de plata y su impacto en la eficiencia de la absorción de energía solar. A través de un análisis detallado de las propiedades ópticas y eléctricas de estas nanopartículas, se busca comprender cómo su interacción con la radiación solar puede ser optimizada para incrementar la captación de energía. Esta investigación no solo contribuirá al avance del conocimiento en nanotecnología aplicada a la energía solar, sino que también ofrecerá perspectivas clave para el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el ámbito de la conversión fototérmica.

Por este motivo, la presente tesis se organiza en cuatro capítulos, los cuales serán detallados a continuación:

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este primer capítulo, se aborda de manera exhaustiva el planteamiento del problema que motiva la investigación. Se realiza una revisión detallada de la problemática en torno a la eficiencia en la absorción de energía solar, destacando la importancia del uso de nanopartículas de plata y su efecto plasmónico en este contexto. Se identifican las lagunas en el conocimiento existente, se justifica la relevancia del estudio y se establecen los objetivos de investigación que guiarán el desarrollo del trabajo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

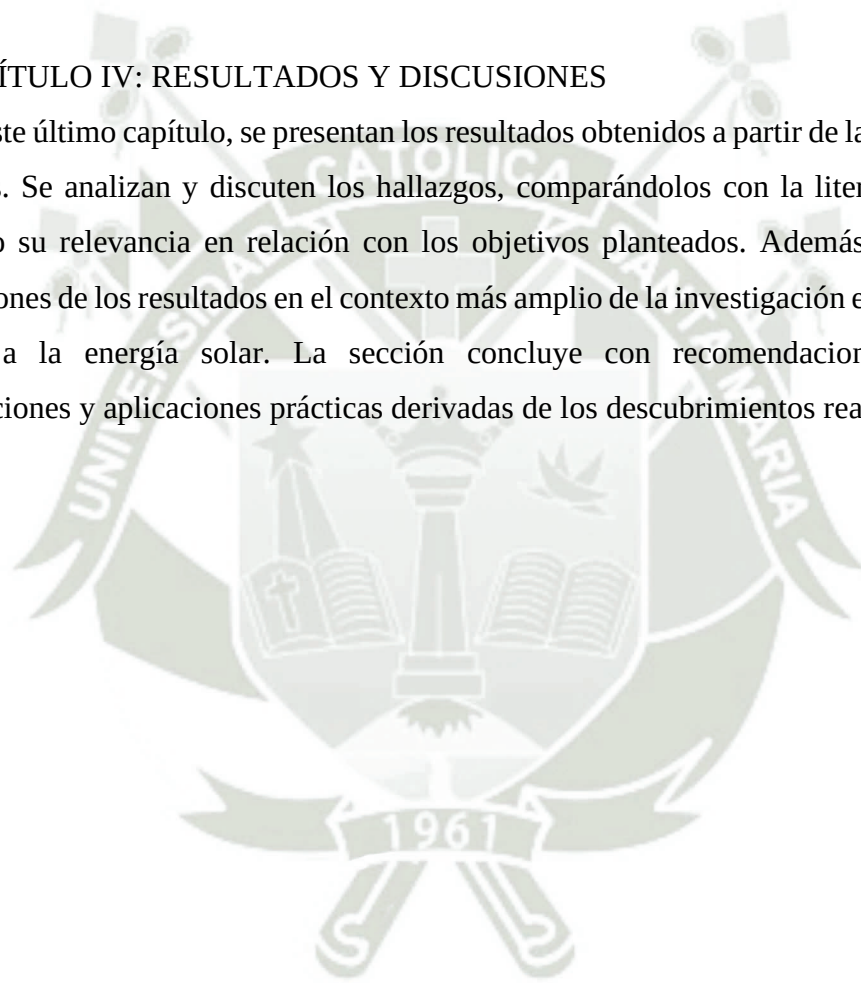
En este segundo capítulo, se proporciona un marco teórico sólido que respalda la investigación. Se exploran y analizan las teorías fundamentales relacionadas con las propiedades termofísicas y eléctricas de las nanopartículas de plata, así como sus aplicaciones en la absorción de energía solar. Además, se revisa la literatura científica relevante para contextualizar el estudio y se identifican las principales contribuciones de investigaciones previas en el campo.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

El tercer capítulo se dedica a describir en detalle los materiales utilizados en la investigación, así como los métodos experimentales y analíticos empleados. Se proporciona información sobre la síntesis de las nanopartículas de plata, las características de los dispositivos experimentales, y los procedimientos utilizados para medir y evaluar el efecto plasmónico en la absorción de energía solar. Esta sección busca brindar una base metodológica sólida y reproducible para el estudio.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este último capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir de las investigaciones realizadas. Se analizan y discuten los hallazgos, comparándolos con la literatura existente y evaluando su relevancia en relación con los objetivos planteados. Además, se destacan las implicaciones de los resultados en el contexto más amplio de la investigación en nanotecnología aplicada a la energía solar. La sección concluye con recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas derivadas de los descubrimientos realizados.





CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la quema insaciable de recursos energéticos no renovables y una amplia gama de actividades industriales, las emisiones están aumentando y están afectando negativamente al medio ambiente, aumentando el calentamiento global y exacerbando el cambio climático, pero también amenazando el desarrollo humano (Singh, 2017) . Por esta razón, el tema de la contaminación ambiental ha adquirido un fuerte enfoque para una serie de investigadores y responsables políticos. En 2015, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) determinó los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a alcanzar para 2030 formulando políticas para combatir la contaminación a través de la garantía de energía sostenible, asequible, confiable y moderna para todos (PNUD, 2023). A pesar de los esfuerzos globales, el problema de la contaminación sigue sin resolverse debido a la falta de atención adecuada a determinantes importantes como el cuidado de la industrialización y el consumo de energía no renovable junto con la estimulación de la energía renovable y el desarrollo financiero.

La energía renovable se deriva de procesos naturales que se reponen constantemente. En sus diversas formas, procede directamente del sol, el viento, la lluvia, las mareas oceánicas, la biomasa y los recursos geotérmicos del calor generado en las profundidades de la tierra. En el 2008, alrededor del 19% del consumo mundial de energía final procedía de fuentes renovables, donde el 13% procedía de la biomasa tradicional, el 3,2% de la energía geotérmica y el 3,2% de la hidroelectricidad. El porcentaje de renovables en la generación de electricidad ronda el 18%, el 15% de la electricidad mundial procede de la hidroelectricidad y el 3% de las nuevas energías renovables (Mohtasham, 2015). Para el 2022 en conjunto, todas las fuentes de electricidad limpia lograron alcanzar el 39% de generación de electricidad a nivel mundial, llegando así a su máximo valor en toda la historia. (Ember, 2023)

Sin embargo, la energía solar podría ser la mejor opción para el mundo futuro por varias razones: En primer lugar, la energía solar es la fuente de energía renovable más abundante y el sol la emite a unos $3,8 \times 10^{23}$ kW, de los que aproximadamente $1,8 \times 10^{14}$ kW es interceptada por la Tierra (Panwar et al., 2011). La energía solar llega a la Tierra en diversas formas, como calor y luz. A medida que esta energía viaja, la mayor parte se pierde por dispersión, reflexión y absorción por las nubes. Los estudios revelan que la demanda mundial de energía puede cubrirse satisfactoriamente utilizando la energía solar, ya que es abundante en la naturaleza y es una fuente de energía gratuita (Lewis, 2007). En segundo lugar, es una fuente de energía

prometedora en el mundo, porque no es agotable, da rendimientos sólidos y crecientes que otras fuentes de energía (Nozik, 2003). La distribución de la radiación solar y su intensidad son dos factores clave que determinan la eficiencia de la industria solar fotovoltaica. Los países asiáticos tienen mayor potencial para recibir radiación solar que otros países templados, ya que la duración de la insolación en estos países es alta al año. Es importante señalar que gran parte de la radiación solar no se aprovecha y se desperdicia (Löf et al., 1966). En tercer lugar, la utilización y el seguimiento de la energía solar no tienen ningún impacto nocivo en el ecosistema, en el que el equilibrio natural se mantiene para la mejora de los organismos vivos. Por último, el sistema solar puede utilizarse eficazmente para los pueblos, las operaciones industriales y los hogares, ya que es fácilmente asequible y aplicable (Kannan & Vakeesan 2016).

En el Perú, la disponibilidad de la energía solar es muy grande y uniforme durante todo el año, lo que hace atractivo su uso, a diferencia de otros países. En términos generales, se dispone, en promedio anual, de 4-5 kWh/m² día en la costa y de 5-6 kWh/m² día en la selva, aumentando de norte a sur. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia. El problema es transformar esta energía solar en energía útil y con un costo aceptable.

La energía solar se puede transformar con facilidad en calor, de hecho, cualquier cuerpo preferentemente de color negro absorbe la energía solar y la transforma en calor, que puede usar para calentar ambientes, calentar agua (termas solares), secar diversos productos, cocinar, etcétera (Horn, 2006). El uso de colectores solares en el Perú está creciendo rápidamente. En 2018, había alrededor de 100.000 colectores solares instalados en el país, y esta cifra se espera que crezca a 1 millón para 2025. Hay una serie de razones para el creciente interés en los colectores solares en el Perú. En primer lugar, el país tiene una gran cantidad de radiación solar, lo que lo convierte en un lugar ideal para la energía solar. En segundo lugar, los precios de los colectores solares han ido cayendo en los últimos años, lo que los hace más asequibles para el público en general. En tercer lugar, el gobierno peruano está ofreciendo incentivos fiscales para la instalación de colectores solares, lo que hace que sea aún más atractivo para los consumidores (Horn, 2006).

Los colectores solares son una forma de energía renovable, lo que significa que no producen emisiones de gases de efecto invernadero. Esto los convierte en una opción ideal para ayudar a reducir el cambio climático. También son una forma de energía sostenible. Esto significa que pueden utilizarse para generar energía durante muchos años sin agotar los recursos naturales. Además, son una forma de energía limpia y eficiente que puede ayudar a reducir

nuestra dependencia de los combustibles fósiles, proteger el medio ambiente y ahorrar dinero en nuestras facturas de energía (Horn, 2006).

Es por lo que este trabajo de tesis consiste en estudiar el efecto plasmónico de nanopartículas de plata en la absorción de energía solar y así aplicarlo en microcolectores, que en el futuro se podría producir para colectores solares a nivel industrial.

1.2 JUSTIFICACIÓN

1.2.1 Justificación económica

Las nanopartículas de plata tienen una alta capacidad de absorción de la radiación solar, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la conservación de la energía solar en calor, con ello es posible reducir el tamaño y por consecuencia el costo de los colectores solares.

Además, que las nanopartículas de plata son muy resistentes a la corrosión, lo que puede prolongar la vida útil de los colectores solares, también puede reducir los costos de mantenimiento y reemplazo. Finalmente, el costo inicial es comparable al de los colectores solares convencionales, sin embargo, los costos operativos serán menores debido a la mayor eficiencia y durabilidad.

1.2.2 Justificación ambiental

En general, los colectores solares que utilicen nanopartículas de plata tienen un potencial para reducir el impacto ambiental de la producción de energía solar. Esto se debe a que son una fuente de energía renovable, no producen emisiones de gases de efecto invernadero y no requieren agua para su producción.

1.2.3 Justificación tecnológica

Los colectores solares que hagan uso de nanopartículas de plata tienen el potencial de ser una tecnología más eficiente, rentable y duradera que los colectores solares convencionales.

Los colectores solares de nanopartículas de plata, aunque se encuentren en fase de desarrollo, tienen el potencial de revolucionar la industria de la energía solar. A medida que la tecnología siga desarrollándose, se espera que sean una opción aún más atractiva para la producción de energía solar eficiente, rentable y sostenible.

1.2.4 Justificación social

Los colectores solares a base de nanopartículas de plata tienen el potencial de tener un impacto positivo en la sociedad, proporcionando energía asequible, limpia y sostenible a un mayor número de personas.

En general, las nanopartículas de plata son una opción prometedora para su uso en colectores solares. Estas nanopartículas tienen una serie de ventajas sobre los materiales absorbentes tradicionales, incluyendo una alta capacidad de absorción de la luz solar, una alta resistencia a la corrosión y un bajo coste de producción.

1.3 ALCANCES

Los alcances que se buscan con la presente tesis es la descripción y comprobación del efecto de resonancia plasmónica existente en un sistema nanoestructurado contenido por nanoparticulado de plata. Mediante los ensayos a ejecutar se alcanzará la revisión y evaluación de los métodos de sintetización existentes para la óptima obtención de nanopartículas de plata, además se usará intercambiadores iónicos que ayudarán a retener estas partículas de escala nanométrica. Finalmente, se contempla con este trabajo el análisis de propiedades emergentes y beneficiadas por el efecto de resonancia de plasmones superficiales localizadas dentro de un sistema nanoestructurado.

1.4 LIMITACIONES

Las principales limitaciones para esta tesis son la falta de recursos dentro del marco de la sintetización de nanoparticulado metálico, como reactivos químicos, específicamente para el nanoparticulado de plata. Además, la falta de equipos apropiados para realizar los respectivos ensayos. A todo esto se debe disponer de laboratorios de ensayo bien implementados y adecuados para evaluar el fenómeno de resonancia por la emisión de una luz en un sistema nanoestructurado.

1.5 VARIABLES

Dentro de las variables que más se ven influenciadas con esta tesis se encuentra las siguientes:

1.5.1 Variables independientes

- Velocidad de flujo (RPM)

- Concentración de AgNP (ml AgNO₃)

1.5.2 Variables dependientes

- Diferencial de temperatura (°C)

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Estudiar el efecto plasmónico de nanopartículas de plata en la absorción de energía solar.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Analizar la absorbancia de las nanopartículas de plata mediante espectroscopia UV-visible.
- Analizar el tamaño de las nanopartículas de plata mediante zetasizer.
- Analizar la morfología de nanopartículas de plata mediante microscopia electrónica de transmisión.
- Evaluar el diferencial de temperatura en microcolector solar a través de un sistema dinámico a base de nanofluido de plata.
- Evaluar el diferencial de temperatura en microcolector solar a través de un sistema estático haciendo uso de resinas intercambiadoras de iones captadoras de iones nanoplata.
- Evaluar el diferencial de temperatura en microcolector solar a través de un sistema dinámico a base de nanofluidos de plata teniendo en cuenta la variación de intensidad luminosa.

CAPITULO II



2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

En las últimas dos décadas, el crecimiento sin precedentes en los países desarrollados ha aumentado el nivel de vida de las personas y, por lo tanto, el consumo de energía también ha aumentado significativamente (Ahmed & Azam, 2016; Esso & Keho, 2016). Se espera que para 2040, la demanda de energía pueda aumentar en más de un tercio en comparación con el valor actual (International Energy Agency, 2017). Para satisfacer esta creciente demanda de energía, las tecnologías de energía renovable están atrayendo mucho la atención de la comunidad investigadora, dada la creciente conciencia sobre el cambio climático y el rápido agotamiento de los recursos de energía primaria (Kalogirou, 2004; Ohler & Fetters, 2014; Tugcu et al., 2012). Las otras razones incluyen la disponibilidad limitada de combustibles fósiles y sus impactos ambientales adversos, como las emisiones de dióxido de carbono que provocan un efecto de calentamiento global (Esso & Keho, 2016; Muhammad, 2019). La energía solar es una fuente de energía relativamente limpia, gratuita, inagotable y no localizada con impactos ambientales insignificantes (Kabir et al., 2018). Actualmente, la energía solar se aprovecha en diferentes formas: (i) fotovoltaica, (ii) fotocatalítica y (iii) sistemas de conversión fototérmica (Mallah et al., 2018). Los sistemas solares fotovoltaicos (SSF) convierten la energía solar interceptada directamente en electricidad. Mientras que los sistemas de conversión fototérmica convierten la luz solar en energía térmica que se puede utilizar para calentar agua, calentar espacios y cocinar, o para generar vapor para la producción de electricidad. Las tecnologías solares fotovoltaicas han demostrado la ventaja de la generación directa de electricidad en comparación con las tecnologías solares térmicas a un costo nivelado de electricidad mucho más bajo (Kumar et al., 2021).

Los sistemas solares térmicos están diseñados para una absorción solar óptima y para obtener el máximo rendimiento térmico con las mínimas pérdidas de calor a través del colector (Goel et al., 2020). En los Sistemas de Absorción de Superficie (SAS), también denominados colectores solares térmicos convencionales, la radiación solar incidente es primero absorbida por el material absorbente (tubos) y el calor se transfiere al fluido de trabajo, generalmente agua o etilenglicol. Teniendo en cuenta el bajo costo, el diseño simple y la alta durabilidad, los SAS se utilizan ampliamente en aplicaciones térmicas solares de baja temperatura, como calentamiento de agua o aire (Kalogiru, 2004; Tyagi et al., 2009). Sin embargo, las eficiencias térmicas solares de los SAS son limitadas debido a las altas pérdidas de calor por convección y emisión de sus superficies absorbentes (Bhalla & Tyagi, 2018).

Sin embargo, con los avances recientes en nanotecnología, los investigadores han realizado muchos intentos para mejorar la eficiencia térmica de estos SAS mediante la siembra de soluciones coloidales de nanopartículas, también conocidas como Nanofluidos (NF) (Gorji & Ranjbar, 2017). Los nanofluidos generalmente están hechos de metales, óxidos, carburos o Nanotubos de Carbono (NTC) con diferentes morfologías complejas como cuasi esféricos, nanorods, core-shell, triangular, prisma (Hussein, 2016; Raj & Subudhi, 2018). Debido a las propiedades termofísicas, reológicas y de absorción mejoradas de estos nanofluidos sobre los fluidos de trabajo convencionales como el agua o el etilenglicol, son medios de trabajo más adecuados para aplicaciones térmicas solares de alto rendimiento (Lee et al., 2012). Las nanopartículas (NP) de metales nobles exhiben una serie de propiedades que las hacen atractivas para una amplia gama de aplicaciones en tecnologías biomédicas, energéticas y de la información (Chen et al., 2019; Wang et al., 2020). Debido a la interacción de estas nanoestructuras metálicas con ondas electromagnéticas, una oscilación colectiva de electrones libres, llamada plasmón, se vuelve dominante y genera la resonancia de plasmón superficial. La Resonancia de Plasmones de Superficie Localizada (RPSL) es un fenómeno resonante en el que los electrones de conducción en los metales resuenan colectivamente en respuesta a una onda electromagnética entrante (Wang et al., 2020). Esto provoca una fuerte absorción y dispersión, así como la mejora localizada del campo cercano a la frecuencia natural de las nanopartículas plasmónicas. Au, Ag y Cu son los tres metales bien conocidos que exhiben un notable efecto RPSL, y sus partículas de tamaño nanométrico se denominan nanopartículas plasmónicas (Eustis & El-Sayed, 2006). Debido a este efecto RPSL, los coloides de las nanopartículas plasmónicas en los fluidos base se conocen como nanofluidos plasmónicos y proporcionan eficiencias de conversión fototérmica mejoradas en los colectores solares térmicos (García & Martin 2008).

Las nanopartículas de plata han adquirido una inmensa importancia en diversos campos como la electrónica, la biomedicina, la protección del medio ambiente, los textiles, los cosméticos, la agricultura y conductores térmicos. Se ha descubierto que las nanopartículas de plata son importantes en los colectores solares por varias razones. Uno de los principales beneficios es su capacidad para mejorar la absorción de luz en la capa fotoactiva, lo que conduce a una mayor generación de excitones y una mayor densidad de corriente en la energía fotovoltaica. Se ha demostrado que la incorporación de nanopartículas de plata en la capa activa de una célula solar mejora la eficiencia de conversión de energía del dispositivo, con mejoras que van del 12,7% al 36,7% dependiendo de las condiciones específicas y los materiales utilizados.

En lo que respecta a los diversos métodos de obtención para la síntesis del nanoparticulado de plata, el punto de partida fue a partir del descubrimiento de los grandes beneficios que traían las nanopartículas, así como Cardoso (2016) que abarcó un estudio acerca de las nanopartículas de plata, su aspecto fisicoquímico, síntesis (física, química, biológica), propiedades como bactericida y su potencial impacto en salud. También Monge Oroz (2009) aborda de manera general los procesos empleados en la obtención de las nanopartículas de plata como un ejemplo de la tecnología empleada en el diseño de nanomateriales; los parámetros de calidad aplicados para resguardar su funcionalidad y una explicación de su mecanismo de acción antibacteriana en vista de una evaluación terapéutica eficaz y como punto de referencia del impacto del desarrollo de materiales a través de la nanotecnología. Además, en la investigación de Sithole (2014) podemos observar la síntesis de nanopartículas de plata por medio de la reducción química en donde se requiere de la presencia de un agente reductor, agente estabilizador además del precursor de plata.

En una tesis sustentada en el año 2008 en la ciudad de México, Frías (2008) se encargó de hacer un estudio teórico y experimental de nanopartículas en guías de onda planas y de canal fabricadas con la técnica de implantación de iones de metales nobles como el Au, Ag y Cu. Es este tipo de guías de onda características de nanopartículas metálicas y por ende forma parte intrínseca de los plasmones ópticos de superficie.

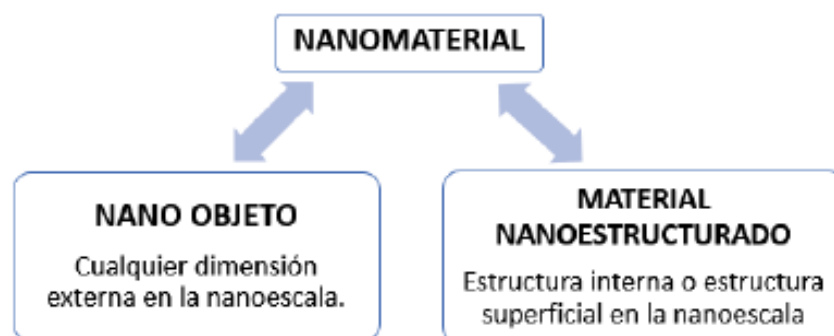
Para el año 2011 en la ciudad de La Plata – Argentina, Videla (2011) realizó una tesis que abarcaba el desarrollo de técnicas ópticas útiles en la determinación del tamaño de partículas tanto dieléctricas en el rango micrométrico como metálicas en el rango nanométrico.

Dentro del estudio teórico que conlleva este fenómeno, en la ciudad de Lima – Perú, Osorio et al. (2019) realizaron un estudio sobre el efecto de plasmón que se visualizaba en nano esferas de oro. Para tal fin, los autores de este artículo se apoyaron en simulaciones del comportamiento de dichos nanomateriales para diferentes medidas inmerso en un medio acuoso frente a luminosidad en un rango establecido de longitudes de onda, de 400 a 650 nm.

2.2. NANOMATERIALES

La Organización Internacional de Estandarización (ISO), sentencia que los materiales cuyo tamaño se encuentra en el rango de 0.1 a 100 nanómetros son considerados como nanomateriales, los cuales están conformados por partículas, fibras, tubos, hilos u otras estructuras o una parte específica de una estructura más grande. En la Figura 2.1. muestra la división de los nanomateriales (International Organization for Standardization, 2015).

Figura 2. 1.
División de los Nanomateriales



Nota: (International Organization for Standardization, 2015)

De acuerdo con Camino (2017) se puede realizar una clasificación de los materiales nanométricos en función de su composición:

- *Basados en el tipo de materiales:* En ellos se incluyen los puntos cuánticos y elementos metálicos, como las nanopartículas de plata (AgNPs) y las nanopartículas de oro (AuNPs), y óxidos, tales como el dióxido de titanio (TiO₂).
- *Los nanomateriales basados en carbono:* Son aquellos que están compuestos principalmente por carbono. Estos materiales pueden tener una forma esférica, elipsoidal, cilíndrica o plana. Los nanomateriales de carbono esféricos y elipsoidales se conocen como fullerenos. Los nanomateriales de carbono cilíndricos se conocen como nanotubos y nanofibras. Los nanomateriales de carbono planos se conocen como grafeno y óxidos gráfiticos.
- *Los dendrímeros:* Son una clase de moléculas que tienen una estructura arborescente. Estas moléculas están formadas por unidades repetitivas, que se conectan entre sí para formar una estructura ramificada. Las unidades repetitivas de los dendrímeros se clasifican según su conectividad. La conectividad de una unidad repetitiva es el número de otras unidades repetitivas a las que está conectada.
- *Los nanocompuestos:* Son materiales que están formados por dos o más componentes, cada uno de los cuales tiene una estructura nanométrica. En los nanocompuestos, al menos un componente forma una fase continua, es decir, que ocupa la mayor parte del volumen del material.

2.2.1. Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) son partículas muy pequeñas, con dimensiones de menos de 100 nanómetros. Su tamaño, forma y distribución dependen de cómo se hayan fabricado. Las propiedades más importantes de las nanopartículas son su composición química, tamaño y forma.

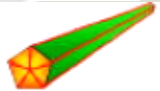
De acuerdo con Hernández Díaz (2013) la forma de una nanopartícula es un factor importante que determina sus posibles aplicaciones en nanotecnología. Las nanopartículas pueden tener una variedad de formas, como esféricas, cilíndricas, en forma de barras o plaquetas. Estas formas están influenciadas por el tamaño y la composición química de la nanopartícula.

2.2.2. Nanopartículas Metálicas

Las nanopartículas hechas de metales, óxidos metálicos o compuestos a base de metales (como las nanopartículas de plata -AgNPs- o de titanio -TiNPs-) tienen propiedades únicas que las hacen útiles en una variedad de aplicaciones en los ámbitos biológico, óptico, magnético, electrónico y catalítico. Estas propiedades están influenciadas por el tamaño, la forma, la composición, la cristalinidad y la estructura de las nanopartículas (Camino, 2017).

Las nanopartículas de plata son un tipo de nanopartícula metálica que ha atraído una gran atención debido a su potente actividad antimicrobiana. Esta actividad ha llevado a su uso en una variedad de aplicaciones, que incluyen el tratamiento de agua, la fabricación de dispositivos médicos y la producción de productos de consumo. En la Tabla 2.1 a continuación, se presentan ejemplos de las formas convencionales de diversas nanoestructuras metálicas.

Tabla 2. 1.
Formas convencionales para las diversas nanopartículas metálicas.

Estructura	Formas	Dibujo esquemático	Metales
Cristal único	Cubo perfecto/truncado		Pd, Ag, Au, Pt, Cu, Rh, Bi, Fe
	Octaedro perfecto/truncado		Pd, Ag, Au, Pt
	Tetraedro perfecto/truncado		Ag, Au, Pt, Rh
	Barra rectangular		Pd, Ag, Pt
	Barra octagonal		Pd, Au, Fe, Co, Ni
	Alambre octagonal o rectangular		Pb, In, Sn, Sb, Fe, Co
Maclado individualmente	Bipirámide derecha		Pd, Ag
	Rayo		Ag
Maclado múltiple	Decaedro		Pd, Ag, Au
	Icosaedro		Pd, Au
	Barra pentagonal maclada cinco veces		Pd, Ag, Au, Cu
	Alambre pentagonal maclado cinco veces		Ag, Cu
	Plato triangular/hexagonal		Pd, Ag, Au, Cu, Pb, Bi, Co, Ni
	Disco		Sn, Co

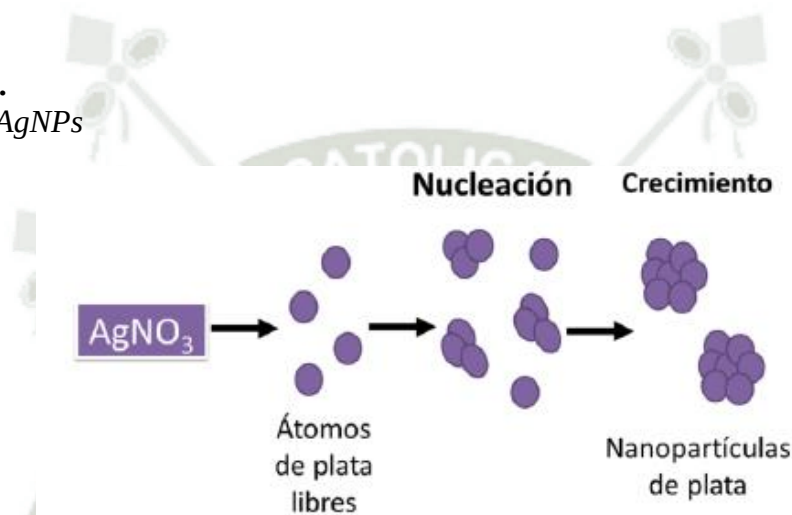
Nota: (Hernández Díaz, 2013)

2.2.3. Obtención de nanopartículas de plata

Para Díaz Acosta (2019) existen muchas técnicas para llevar a cabo la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs), tal como se ilustra en la Figura 2.2. La información que se presenta es válida para todas las nanopartículas, independientemente de si están en su forma original o si tienen un revestimiento para mantener su estabilidad. Siguiendo lo planteado por Monge (2009) la síntesis de las AgNPs requiere la presencia de tres componentes esenciales:

- *Precursor metálico que contenga plata (por ejemplo, AgNO_3):* Esta sustancia provee la fuente de plata necesaria para la formación de las nanopartículas.
- *Agente reductor que cause la reducción de la plata de Ag^+ a Ag^0 :* Este agente es responsable de la conversión de los iones de plata (Ag^+) en átomos de plata (Ag^0), lo cual es esencial para la formación de las nanopartículas.
- *Agente estabilizante:* Este componente juega un papel crucial al facilitar la reacción y favorecer la estabilidad de las AgNPs resultantes.

Figura 2. 2.
Síntesis de AgNPs



Nota: (Monge Oroz, 2009)

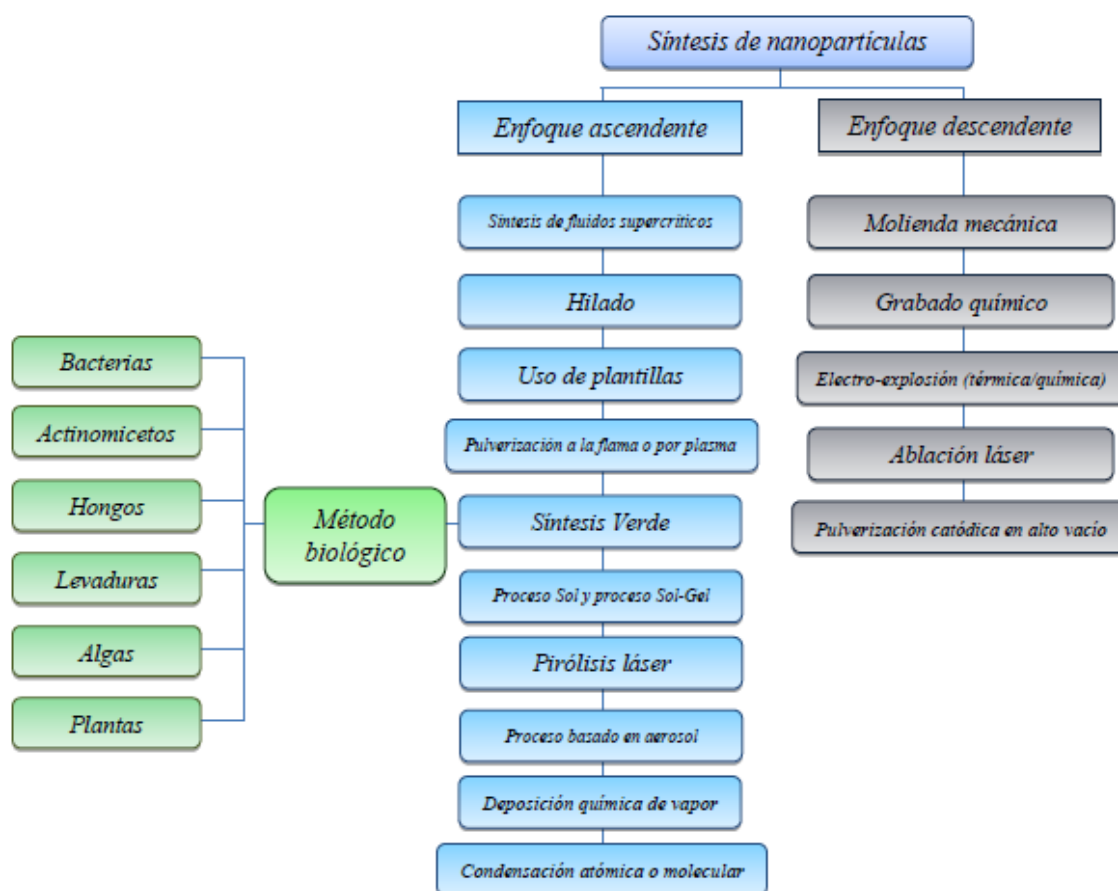
La síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) se ha vuelto más amigable con el medio ambiente en los últimos años. Esta tendencia, conocida como "química verde", utiliza materiales y procesos que son menos tóxicos y producen menos residuos. Esta aproximación se refleja en la Figura 2.3 (Díaz Acosta, 2019).

Para Cardoso (2016) en los métodos para producir nanopartículas generalmente se clasifican en dos categorías:

- *Métodos Top-down:* También conocidos como técnicas descendentes, son un enfoque para la síntesis de nanopartículas que comienza con un material más grande y lo reduce en tamaño hasta alcanzar el tamaño deseado.
- *Métodos Bottom-up:* También conocidos como técnicas ascendentes, son un enfoque para la síntesis de nanopartículas que comienza con átomos o moléculas individuales y los ensambla en estructuras más grandes. Es un proceso que se basa en la construcción desde lo más simple hasta lo más complejo.

Figura 2. 3.

Estrategias utilizadas para la síntesis de nanopartículas metálicas



Nota: (Hernández Díaz, 2013).

Los diferentes métodos de síntesis de nanopartículas pueden producir nanopartículas de diferentes tamaños, formas y propiedades. En general, estos métodos se pueden clasificar en tres categorías: síntesis física, síntesis química y síntesis biológica (Cardoso, 2016).

2.2.4. Métodos físicos

En los métodos físicos top-down, se emplean enfoques que implican la reducción gradual del tamaño de las partículas más grandes para llegar a la escala nanométrica. Estos métodos incluyen la molienda o desgaste mecánico, donde se rompen partículas más grandes hasta alcanzar el tamaño deseado. Además, se pueden aplicar procesos como el enfriamiento repetido para conseguir una fragmentación controlada de los materiales. La fotolitografía es otra técnica que se utiliza en este enfoque, donde la luz es empleada para esculpir patrones a nivel nanométrico en un material.

Por otro lado, en los métodos bottom-up, se parte de componentes más pequeños, como átomos o moléculas, para construir estructuras más grandes y complejas. En el contexto de las nanopartículas de plata, se inicia con un precursor químico que contiene plata en forma de sal. A través de una reacción química, esta sal de plata es reducida para formar las nanopartículas. Este enfoque permite construir nanoestructuras a partir de sus componentes básicos, y es especialmente útil para crear tamaños y formas precisos de nanopartículas (Cardoso, 2016).

Para Sánchez et al. (2017) los principales procesos de síntesis de AgNPs por métodos físicos son:

- **Evaporación-Condensación:** En este método, se evapora un precursor de plata y luego se condensa para formar partículas nanométricas de plata en fase gaseosa, que posteriormente se recolectan en un sustrato.
- **Ablación por Láser Pulsante (PLD):** Este método utiliza un láser pulsante para vaporizar una fuente sólida de plata, generando un plasma que se condensa para formar nanopartículas.
- **Técnica del Arco de Descarga:** En esta técnica, un arco eléctrico se forma entre dos electrodos de plata en un gas inerte, lo que produce vaporización y posterior condensación de la plata en forma de nanopartículas.
- **Magnetron Sputtering:** Este método utiliza un proceso de deposición física en fase vapor, donde se utiliza un campo magnético para arrancar átomos de plata de un objetivo y depositarlos como nanopartículas en un sustrato.
- **Irradiación con Microondas:** En este método, se emplean microondas para calentar y sintetizar soluciones que contienen precursores de plata, generando la formación de AgNPs.
- **Síntesis Sonoquímica:** La síntesis sonoquímica involucra la generación de burbujas de cavitación en un líquido mediante ultrasonidos, lo que lleva a la formación de altas temperaturas y presiones locales que pueden desencadenar la formación de AgNPs.
- **Métodos Electroquímicos:** Estos métodos utilizan la electroquímica para reducir iones de plata en una solución, formando nanopartículas en el proceso.
- **Técnica Ultrasónica Spray Pirólisis:** En este enfoque, una solución que contiene precursores de plata se descompone en una neblina fina utilizando ultrasonidos y luego se somete a pirólisis para formar AgNPs.
- **Reducción Fotoquímica:** En este método, se emplea la luz para catalizar la reducción de iones de plata en una solución, resultando en la formación de nanopartículas.

Estos procesos físicos son utilizados para generar nanopartículas de plata con distintos tamaños, formas y propiedades para diversas aplicaciones. Cada método tiene sus ventajas y limitaciones, y la elección del método depende de los requisitos específicos de la síntesis y las aplicaciones previstas.

2.2.5. Métodos químicos

La reducción química se destaca como el método más común para la síntesis de nanopartículas de plata. En este proceso, se utiliza una sal de plata como precursor, así como reductores y agentes estabilizantes para controlar el crecimiento de las partículas. El nitrato de plata es una opción frecuente para la síntesis de AgNPs debido a su bajo costo y estabilidad química en comparación con otras sales disponibles (Cardoso, 2016).

Los métodos químicos en general son relativamente sencillos en comparación con otros enfoques de síntesis. Además, permiten la producción de nanopartículas a gran escala con una distribución de tamaño monodispersa, lo que significa que las partículas tienen un tamaño muy uniforme. Por esta razón, muchos grupos de investigación optan por estos métodos para sintetizar AgNPs.

De acuerdo con lo mencionado por Sánchez (2014), los principales procesos de síntesis de AgNPs utilizando métodos químicos son:

- **Reducción Química:** Se emplean reductores químicos para reducir los iones de plata en una solución, generando nanopartículas.
- **Proceso Sol-Gel:** Implica la transformación de precursores químicos en una solución coloidal y luego su gelificación para obtener nanopartículas.
- **Microemulsión:** Se forman microemulsiones que contienen los precursores de plata, donde las reacciones químicas tienen lugar en los compartimentos de las microgotas.
- **Deposición Química de Vapor (CVD):** En este método, los precursores químicos reaccionan en fase vapor para formar nanopartículas en una superficie.
- **Termólisis:** Involucra la descomposición térmica de precursores químicos para formar nanopartículas.

Estos métodos químicos ofrecen flexibilidad en términos de tamaño y forma de las nanopartículas obtenidas, lo que los hace altamente relevantes para la síntesis de AgNPs con propiedades específicas para diversas aplicaciones.

2.2.6. Métodos biológicos

Por Cardoso (2016) sabemos que la biosíntesis o síntesis verde de nanoplate es observada en forma continua, y merece mucha atención debido a una creciente necesidad de métodos de síntesis amigables para el medio ambiente, que utilizan agentes reductores y de terminación ecológicos, como son las proteínas, péptidos, carbohidratos, varias especies de bacterias, hongos y levaduras, algas y plantas.

Según Sánchez (2014) estos métodos de síntesis los podemos describir como procesos biológicos, donde las biomoléculas sustituyen a los agentes reductores y estabilizantes convencionales. Debido al impacto que tienen las síntesis propuestas con anterioridad (química y física) con el medio ambiente, en la actualidad se están desarrollando métodos y buscando nuevas alternativas para la producción de AgNPs que sean más amigables con la naturaleza.

Hablando a una escala industrial, se está pretendiendo el desarrollo de técnicas de síntesis con altos rendimientos y que, además, no genere una gran cantidad de productos secundarios de difícil gestión medioambiental.

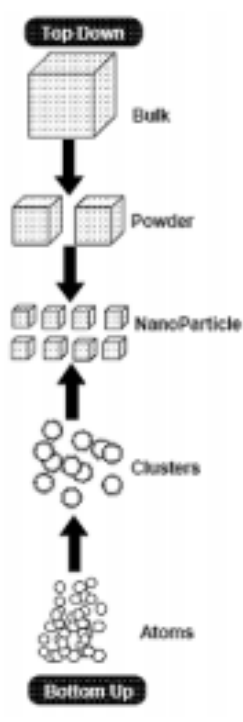
2.2.7. Síntesis de nanoestructuras usando métodos ópticos

La física de la materia condensada se centró en la creación intencional de nanomateriales y en el estudio de las propiedades y características de la materia a baja dimensión, para ser utilizados en posteriores desarrollos científicos. Existen principalmente dos enfoques para la obtención de un nanomaterial: “bottom-up” y “top-down” (Duque, 2017). Este se observa en la Figura 2.4.

Dentro de estos dos enfoques se encuentran los diferentes métodos para la obtención de materiales a escala nano. Fundamentalmente se destaca el método químico que por sus características es un método ascendente “Bottom-up”, puesto que parte de los átomos y moléculas para formar un nanomaterial, aunque necesita de precursores y otras sustancias para llevar a cabo la reducción; esta clase de método es laborioso y en ocasiones costoso. En los años recientes el uso de técnicas ópticas para fabricar nanoestructuras ha ido aumentando.

Figura 2. 4.

Enfoque “Bottom-Up” y “Top-Down” para la obtención de un nanomaterial



Nota: (Duque, 2017)

La otra parte de métodos se basan en el enfoque de arriba hacia abajo “top-down”; una de las técnicas que emplea láseres para llevar a cabo la reducción de dimensión del material en volumen hasta la escala nanométrica, es la ablación láser, que es útil y fácil de implementar, pues permite obtener nanoestructuras de un solo paso. El uso de la técnica de ablación láser en la fabricación de nanopartículas proporciona ventajas relevantes al ser un método sencillo, limpio y eficiente, y posee la característica de que, mediante el control de parámetros como la energía del haz, el tiempo de depósito y la tasa de repetición sea posible modificar propiedades como forma y tamaño de las nanopartículas metálicas. Además, no requiere de precursores químicos, al contrario de los métodos convencionales. Se pueden utilizar diversos tipos de solventes y gran variedad de materiales, es por esto que en las últimas décadas se ha implementado tal método para la fabricación de esta clase de nanoestructuras (Duque, 2017).

Una vez obtenidas las muestras, con el fin de entender las propiedades ópticas, eléctricas y estructurales del nanomaterial en cuestión, y sus características básicas como forma y tamaño, serán necesario el uso de las diversas técnicas de caracterización de materiales existentes. En la

siguiente sección se nombrarán estas técnicas usadas para el estudio experimental de nanomateriales (Mastranzo, 2017).

2.2.8. Técnicas de caracterización de nanopartículas de plata

Las propiedades físicas y químicas de las nanopartículas juegan un papel fundamental en su comportamiento, biodistribución, seguridad y eficacia. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo la caracterización de las nanopartículas metálicas para evaluar sus aspectos funcionales, como se ilustra en la Figura 2.5. Esta caracterización se realiza mediante una variedad de técnicas analíticas, que incluyen:

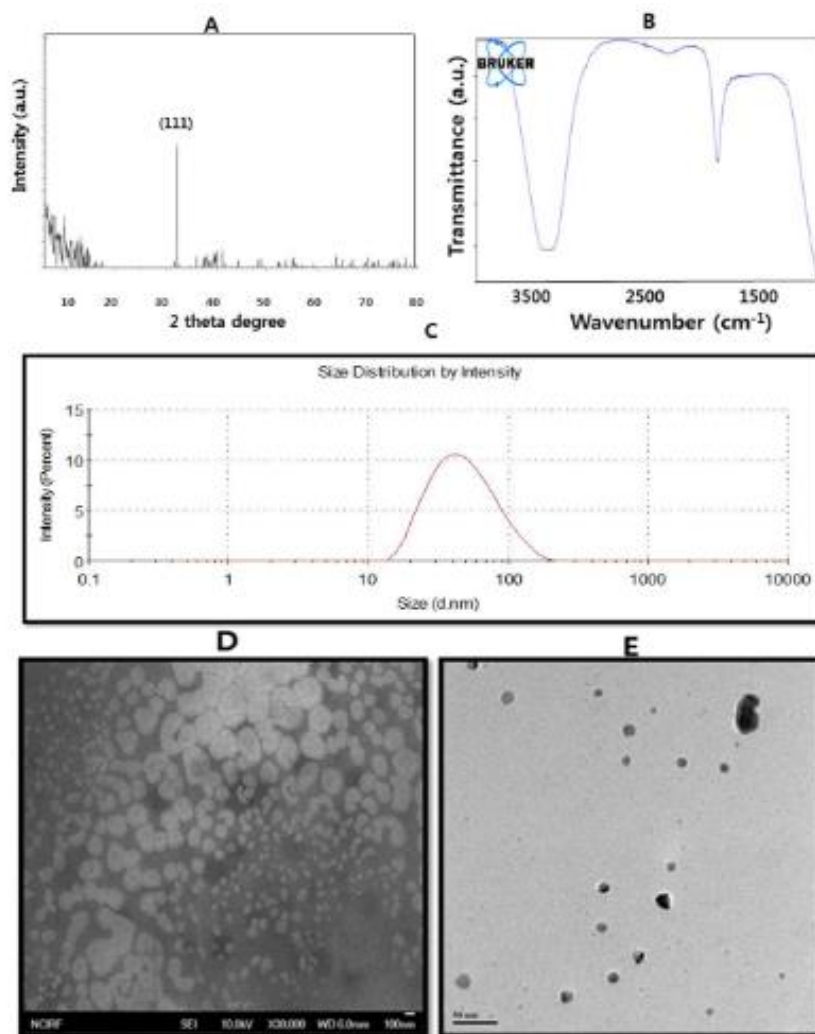
- ***Espectroscopía UV-Vis:*** Permite analizar la absorción y dispersión de la luz en función de la longitud de onda, proporcionando información sobre las propiedades ópticas y el tamaño de las nanopartículas.
- ***Difractometría de Rayos X (XRD):*** Se utiliza para analizar la estructura cristalina de las nanopartículas y determinar su composición química.
- ***Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR):*** Permite identificar grupos funcionales y enlaces químicos en las nanopartículas, lo que proporciona información sobre su superficie y estabilidad.
- ***Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS):*** Se utiliza para analizar la composición química de la superficie de las nanopartículas y determinar la presencia de elementos y su estado de oxidación.
- ***Dispersión Dinámica de Luz (DLS):*** Mide el tamaño de las partículas en suspensión y su distribución de tamaños, lo que proporciona información sobre su homogeneidad.
- ***Barrido Electrónico Microscopía (SEM):*** Permite visualizar la morfología superficial de las nanopartículas a alta resolución.
- ***Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM):*** Ofrece imágenes de alta resolución de la morfología interna y externa de las nanopartículas.
- ***Microscopía de Fuerza Atómica (AFM):*** Se utiliza para analizar la topografía y propiedades mecánicas de las superficies de las nanopartículas.

Estas técnicas analíticas proporcionan una comprensión detallada de las propiedades de las nanopartículas, lo que es esencial para su caracterización y evaluación en diversas aplicaciones. Aunque hay libros y revisiones especializadas que presentan a fondo estas técnicas, se presentan

aquí los conceptos básicos para facilitar la comprensión de su utilización en la caracterización de las AgNPs (Zhang et al., 2016).

Figura 2. 5.

Caracterización de AgNPs preparadas a base de especie Bacillus usando diversas técnicas



Nota: (A) Caracterización de AgNP mediante espectros de difracción X de AgNP; (B) Espectros infrarrojos de cuatro transformaciones de AgNP; (C) Medición de la distribución de tamaño de los AgNP por dispersión de luz dinámica; (D) Imágenes de microscopía electrónica de barrido de AgNP; (E) Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de AgNP. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de AgNP. (Zhang et al. 2016).

A continuación, vamos a tratar específicamente las técnicas de caracterización relacionadas al efecto de resonancia de plasmones superficiales para el caso de nanoparticulado metálicos.

A. Espectroscopía UV-Visible

La espectroscopía UV-Vis es una técnica muy útil y confiable para la caracterización primaria de nanopartículas sintetizadas que también se utiliza para monitorear la síntesis y estabilidad de AgNPs. Las AgNPs tienen propiedades ópticas únicas que los hacen interactuar fuertemente con longitudes de onda específicas de luz. Además, la espectroscopía UV-Vis es rápida, fácil, simple, sensible, selectiva para diferentes tipos de NP, solo necesita un corto período de tiempo para la medición y, finalmente, no se requiere una calibración para la caracterización de partículas de suspensiones coloidales. En los AgNP, la banda de conducción y la banda de valencia se encuentran muy cerca entre sí en las que los electrones se mueven libremente. Se observó la estabilidad de los AgNP preparados a partir de métodos biológicos durante más de 12 meses y se observó un pico de SPR a la misma longitud de onda utilizando espectroscopía UV-Vis (Zhang et al., 2016).

B. Dispersión dinámica de la luz (DLS)

La evaluación fisicoquímica de los nanomateriales sintetizados desempeña un papel crucial en el análisis de las propiedades biológicas mediante métodos que implican la dispersión de radiación. La técnica conocida como Dispersión Dinámica de la Luz (DLS) permite examinar la distribución de tamaños de partículas pequeñas en un rango que abarca desde submicrones hasta dimensiones nanométricas en soluciones o suspensiones. DLS se basa en la interacción de la luz con las partículas y se emplea para determinar distribuciones de tamaño de partículas con gran precisión, especialmente en el rango de 2 a 500 nm.

De todas las técnicas de caracterización de nanopartículas, la DLS es la más comúnmente empleada. En esencia, esta técnica cuantifica la dispersión de luz proveniente de un láser que atraviesa un coloide, y su fundamento radica principalmente en el fenómeno de dispersión de Rayleigh ocasionado por las nanopartículas suspendidas (Zhang et al., 2016).

C. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (XRD) representa una de las metodologías más efectivas para analizar tanto cualitativa como cuantitativamente las fases cristalinas presentes en una amplia variedad de materiales, ya sean naturales o sintéticos. Esta eficacia radica en que los rayos X poseen longitudes de onda comparables a las distancias entre átomos en materiales cristalinos. En consecuencia, la difracción de rayos X se convierte en una herramienta poderosa para explorar la estructura molecular a nivel microscópico. De hecho, esta técnica fue instrumental en la revelación de la configuración de la doble hélice del ácido desoxirribonucleico (ADN) en

1953. Actualmente, se emplea de manera extendida para precisar con gran exactitud la estructura molecular de diversos tipos de materiales, abarcando desde compuestos inorgánicos y minerales hasta proteínas e incluso virus (Duque, 2017).

Todas las características físicas y químicas inherentes a cualquier sustancia están intrínsecamente ligadas a la disposición de las unidades fundamentales más pequeñas: átomos y moléculas. Estos constituyentes definen la identidad de un material en particular. El conocimiento minucioso de la disposición espacial relativa de los átomos y la intensidad de las interacciones o enlaces que los unen resulta esencial para la comprensión de las propiedades físicas, eléctricas, magnéticas y químicas de las sustancias. En determinadas situaciones, esta comprensión nos brinda la capacidad de planear ajustes en estas propiedades en un material específico. Por ejemplo, es posible fortalecer un plástico o mejorar la eficiencia del catalizador en un motor de combustión al manipular deliberadamente estas características subyacentes (Willets & Van Duyne, 2007).

D. Nano Tracking Análisis (NTA)

La Nanopartícula Tracking Analysis (NTA), o Análisis de Seguimiento de Nanopartículas, es una técnica utilizada para observar y analizar partículas en líquidos, estableciendo una relación entre la velocidad de movimiento browniano y el tamaño de las partículas. Esta velocidad se vincula directamente con la viscosidad y la temperatura del líquido, siendo independiente de la densidad de las partículas o el índice de refracción.

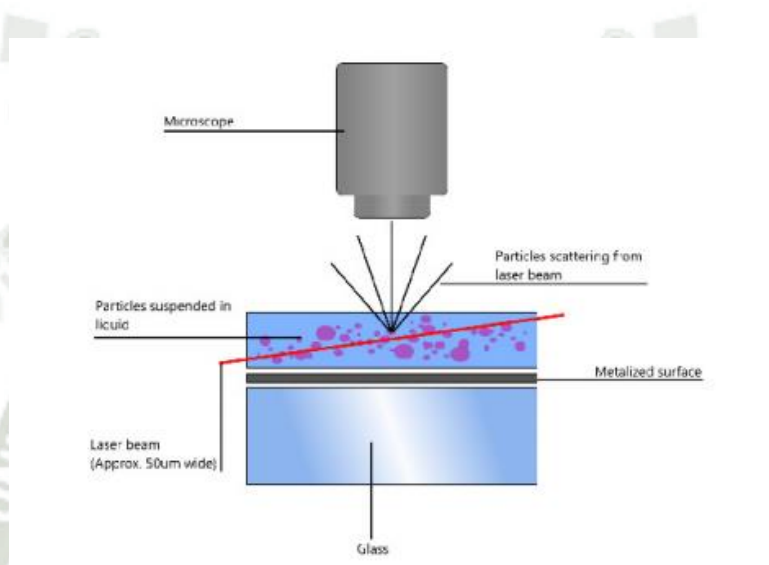
El método NTA permite determinar un perfil de distribución de tamaño de partículas pequeñas con diámetros que oscilan alrededor de los 10 nanómetros (nm) a 1000 nm en suspensiones líquidas. La técnica se basa en el seguimiento individual de las partículas mientras experimentan el movimiento browniano en el líquido. A partir de estas observaciones, se puede deducir el tamaño de las partículas y obtener un perfil de distribución que muestra cómo se distribuyen en el rango de tamaños especificado (Duque, 2017).

Esta técnica se emplea en conjunción con un microscopio con una ampliación de 20 veces en una configuración de distancia de trabajo larga. En este montaje, se incorpora una cámara de video y un dispositivo de iluminación láser que, en conjunto, permiten la visualización en movimiento de pequeñas partículas en suspensión líquida mediante el fenómeno del movimiento browniano. La luz dispersada por estas partículas es capturada mediante una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada) o una cámara EMCCD (cámara de carga acoplada de electrones) a lo largo de múltiples cuadros de imagen. Se emplea un software informático para rastrear el desplazamiento de cada partícula de cuadro a cuadro.

La velocidad de movimiento de las partículas se correlaciona con el radio hidrodinámico de la esfera equivalente, el cual se calcula utilizando la ecuación de Stokes-Einstein. La Figura 2.6 presenta el esquema operativo de esta técnica, ofreciendo una representación visual de su funcionamiento y componentes clave. (Manno et al., 2020).

Figura 2. 6.

Esquema del funcionamiento del equipo NTA para el rastreo de nanopartículas

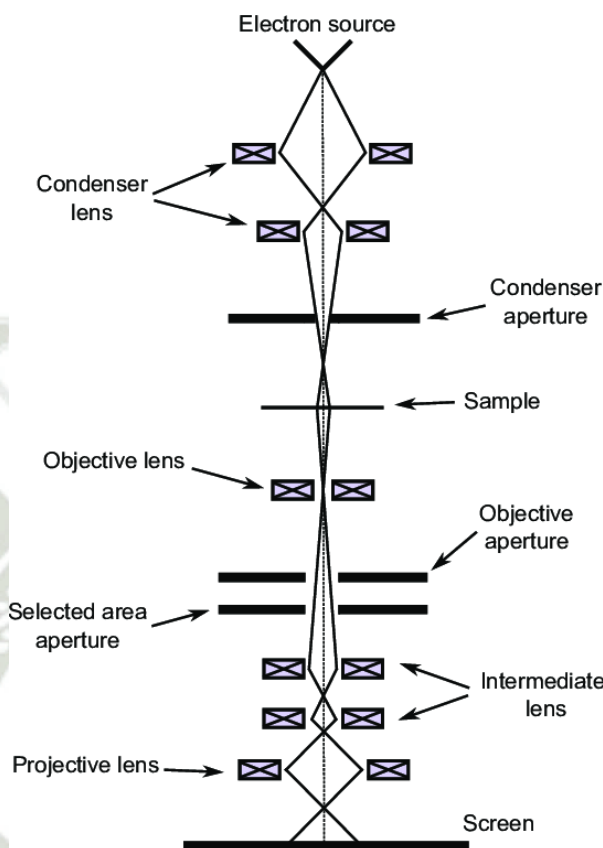


Nota: (Duque, 2017)

E. Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

La Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) como se ve en la Figura 2.7, es una técnica altamente valiosa y ampliamente utilizada para la caracterización de nanomateriales. Se emplea para obtener medidas cuantitativas del tamaño de partículas y/o granos, así como para analizar la distribución de tamaños y la morfología de estas estructuras en la escala nanométrica. El aumento en TEM está principalmente determinado por la relación entre la distancia entre la lente del objetivo y la muestra, y la distancia entre esta lente y el plano de imagen.

En comparación con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), el TEM presenta dos ventajas destacadas: en primer lugar, ofrece una mejor resolución espacial, lo que permite visualizar detalles más finos en las muestras a nivel nanométrico. En segundo lugar, el TEM tiene la capacidad de llevar a cabo mediciones analíticas adicionales, lo que significa que puede proporcionar información más detallada sobre la composición química y la estructura cristalina de las muestras. (Zhang et al., 2016).

Figura 2. 7.
Esquema del funcionamiento de un microscopio electrónico de transmisión (TEM)


Nota: (Naresh Marturi, 2013)

2.3. PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA

2.3.1. Efecto del agente estabilizador en la síntesis de nanopartículas de plata

Para Srinivas et al. (2009) un agente estabilizador es una sustancia que se aplica a las partículas para evitar que se agrupen. Los agentes estabilizadores forman una capa protectora alrededor de las partículas que aumenta su carga eléctrica. Esta carga eléctrica repele a las partículas vecinas, lo que evita que se agrupen.

Los agentes estabilizadores pueden ser tensioactivos, polímeros o iones. Los tensioactivos son moléculas que tienen una cabeza hidrofílica (atraída por el agua) y una cola hidrofóbica (atraída por los aceites). Cuando se aplican a las partículas, los tensioactivos se orientan de modo que la cabeza hidrofílica quede hacia el agua y la cola hidrofóbica quede hacia las partículas. Esto crea una capa protectora alrededor de las partículas que las mantiene separadas.

Según Qin et al. (2010) el polímero (agente estabilizador) se adhiere a la partícula en un extremo, por lo que el polímero se ve como tentáculos en la partícula. El pH alcalino y la presencia de citrato como agente dispersante promueve la formación de nanopartículas de plata esféricas monodispersas. Asimismo, el uso de polímero polivinilpirrolidona (PVP) como agente estabilizador produce pequeñas partículas con una distribución de tamaño uniforme. PVP es uno de los polímeros conocidos que tiene una alta afinidad por el metal plateado. Este polímero hidrofóbico se une covalentemente al metal plateado por sus grupos piridilo.

El polímero fue estudiado por Irwin et al. (2010), determinaron que éste se une a los AgNP y forma una micela alrededor de las nanopartículas. La PVP está parcialmente cargada, por lo tanto, causa repulsión entre partículas. Las moléculas de polímero requieren un buen solvente para funcionar a su máxima capacidad. Si el solvente permite que el agente estabilizador se estire lejos de la partícula, entonces el solvente es efectivo, mientras que si el solvente hace que el agente estabilizador colapse sobre la superficie de la partícula, entonces el solvente es pobre. Estas moléculas de polímero colapsan cuando las nanopartículas se suspenden en un disolvente pobre como el pH ácido de la síntesis basada en ácido ascórbico.

2.3.2. Efecto del pH en la síntesis de nanopartículas de plata

Cuando una sustancia con carga positiva o negativa se expone a un electrolito, el OH⁻ o el H⁺ se adhiere a su superficie a través de la interacción electrostática, alterando así la carga superficial. El punto de carga cero (PZC) es una característica de la superficie de un material y se define como el pH al que la superficie de un material tiene una carga neta neutra o cero.

Se estima que el punto de carga cero de la plata es de pH 5,5. Qin et al. (2010) sintetizaron nanopartículas de plata, donde el ácido ascórbico reducía el nitrato de plata a diferentes pH y demostró que aumentar el pH de 6 a 10,5 podría alterar el tamaño de partícula de 73 nm a 31 nm. El pH alcalino y la presencia de un citrato como agente dispersante promovieron la formación de nanopartículas de plata esféricas monodispersas. Srinivas et al. (2009) también está de acuerdo en que el pH alcalino (8.5-9.0) produjo nanopartículas monodispersas más pequeñas a una velocidad más rápida que el pH ácido.

2.3.3. Síntesis de nanopartículas de plata con diferentes formas

Varios estudios han predicho que las nanopartículas de plata con diferentes formas tienen diversos efectos sobre las bacterias. Jiang et al. (2011) expusieron esferas de nanopartículas de plata a la luz y produjeron nanopartículas de diferentes formas. Se formaron diferentes formas en diferentes etapas de maduración; por ejemplo, los discos esféricos se forman inmediatamente

mientras que las plaquetas triangulares se forman a medida que la reacción progresa a temperaturas elevadas de aproximadamente 40°C y después de 48 horas de exposición, las suspensiones eran una estructura icosaédrica tridimensional.

2.4. APLICACIONES DE LAS NANOPARTICULAS METALICAS

Desde los albores del desarrollo moderno de la nanociencia hasta la fecha, han emergido y evolucionado diversas áreas especializadas en este campo. Las aplicaciones de las nanoestructuras metálicas están intrínsecamente vinculadas a su tamaño y forma. Un ejemplo destacado es la nanoplasmonica, una disciplina interdisciplinaria que ha encontrado aplicaciones en una amplia gama de campos, que abarcan desde la catálisis, la fotónica y la electrónica hasta la biología, la medicina, la energía solar y el medio ambiente.

La propiedad esencial de la nanoplasmonica se basa en la sensibilidad de la energía del plasmón localizado, que se deriva de la interacción entre el campo electromagnético de una nanopartícula y su entorno circundante. Esta propiedad se ha aprovechado para diversos propósitos, incluida la detección y la identificación de líquidos y vapores potencialmente tóxicos, así como la detección de iones metálicos con alta afinidad. Además, esta característica ha sido aplicada en la creación de biosensores. La combinación de selectividad y sensibilidad puede mejorarse mediante la formación de ensamblajes controlados de nanopartículas. En estos ensamblajes, el agente de unión puede desempeñar el papel de un sensor al experimentar cambios en su posición debido a la variación en la posición del plasmón localizado cuando las nanopartículas se acercan o se alejan unas de otras.

En conjunto, la nanoplasmonica ejemplifica cómo las propiedades únicas de las nanoestructuras metálicas pueden aplicarse en diversas áreas científicas y tecnológicas, permitiendo desarrollos innovadores en la detección, la sensing y otras aplicaciones clave (Molina, 2016).

También, las nanopartículas pueden usarse en aplicaciones como la denominada terapia fototérmica basada en la funcionalización de nano cilindros metálicos capaces de absorber en la región de transparencia de los tejidos, en el infrarrojo cercano en torno a 830 nm. Estos anticuerpos hacen que las nanopartículas se retengan selectivamente en determinadas zonas del organismo, por ejemplo, para combatir células tumorales (Molina, 2016).

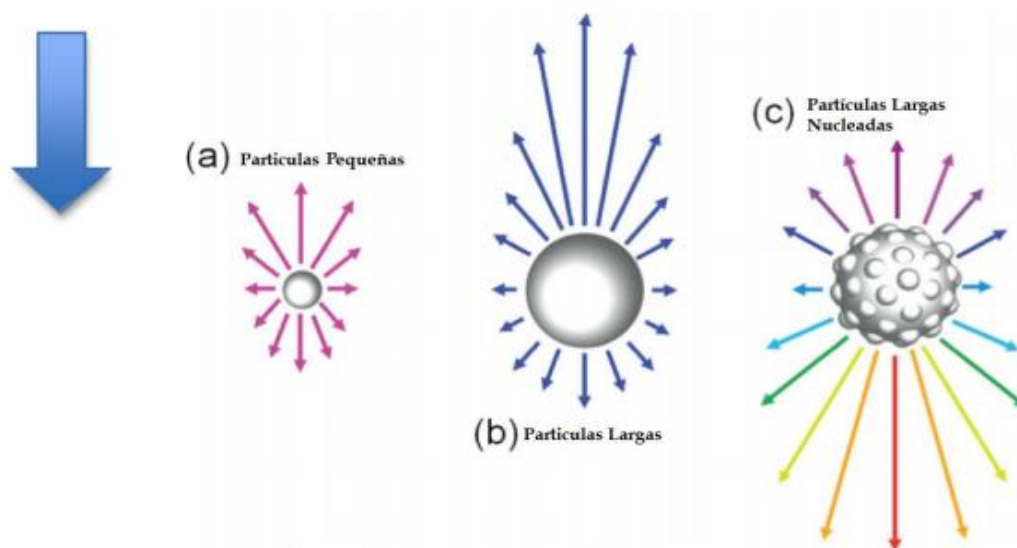
La óptica no lineal de plasmones ha dado lugar a la generación de diferentes dispositivos ópticos tales como los llamados superficie de plasmón amplificada por emisión estimulada por radiación (SPASERs por sus siglas en inglés, surface plasmon amplification by stimulated

emission of radiation), equivalentes a láseres ultrapotentes y miniaturizados, basados en el acoplamiento de segundos armónicos plasmónicos. También pueden obtenerse materiales con propiedades ópticas tales que poseen índices de refracción negativos y que, a priori, hacen posible la fabricación de dispositivos como la capa de invisibilidad (Rocha et al., 2018).

La utilización de nanopartículas metálicas como recubrimientos antirreflejo en sustratos de silicio cristalino es de suma importancia en la investigación y el desarrollo tecnológico. En particular, las obleas de silicio, que constituyen la base de las células fotovoltaicas convencionales, poseen una reflectancia promedio del 30% en la región visible del espectro. Esto implica que aproximadamente un tercio de la luz incidente no se aprovecha eficientemente. Para contrarrestar esta pérdida, se ha implementado la deposición de nanopartículas de plata en la superficie del silicio cristalino.

En el caso de partículas de mayor tamaño, la luz incidente tiende a dispersarse preferentemente hacia el interior del semiconductor, como ilustra la Figura 2.8. Esto resulta en la ausencia de reflexión en la superficie del sustrato debido a que las corrientes de polarización generadas pueden quedar atrapadas en el silicio. Como consecuencia, la eficiencia de conversión fotovoltaica en células solares basadas en silicio puede ser mejorada gracias a este fenómeno de atrapamiento de luz.

Figura 2. 8.
Esparcimiento de Luz



Nota: a) pequeñas partículas, b) grandes partículas y c) partículas nucleadas. Note como el esparsamiento hacia adelante del lóbulo, (indicadas con flechas de colores), en dirección del haz incidente (flecha en azul), es mayor en partículas nucleadas. (Rocha et al. 2018).

La optimización del esparcimiento de luz en la dirección de la luz incidente, es decir, hacia adelante, depende del tamaño, la forma y la distancia entre las nanopartículas metálicas. Esta técnica demuestra cómo la nanotecnología puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la eficiencia de los dispositivos fotovoltaicos al manipular la interacción de la luz con las nanoestructuras en la superficie (Rocha et al., 2018).

2.4.1. Aplicaciones de las nanopartículas de plata

Las nanopartículas de metales, de óxidos metálicos o de compuestos basados en metales (como pueden ser las AgNPs) muestran interesantes propiedades biológicas, ópticas, magnéticas, electrónicas y catalíticas que, en general, se relacionan con su tamaño, forma, composición, cristalinidad y estructura de la partícula, pudiendo ser interesantes desde el punto de vista de su aplicación práctica (Camino, 2017).

Cuando se iluminan las nanopartículas metálicas con luz incidente, la presencia de electrones libres en la banda de conducción en su superficie da lugar a una excitación colectiva de estos electrones. Esto ocurre debido a la intensa interacción entre la luz incidente y los electrones libres. Esta excitación colectiva se manifiesta como una oscilación coherente que abarca la superficie de las nanopartículas metálicas, extendiéndose en la interfaz entre el metal y el dieléctrico o el semiconductor. Esta excitación electromagnética se conoce como polaritón del plasmón de superficie. El polaritón es una especie de híbrido entre una partícula y una onda, que surge debido al fuerte acoplamiento entre la luz y los electrones libres en la superficie de la nanopartícula.

En ciertas frecuencias de energía incidente, se establece una coincidencia entre las frecuencias de la onda incidente y las oscilaciones del polaritón. Este fenómeno se llama resonancia del plasmón de superficie. La resonancia del plasmón de superficie tiene la capacidad de absorber ciertas frecuencias de la luz incidente y transmitir las frecuencias no absorbidas, que se asocian a colores específicos. Por ejemplo, las nanopartículas de oro, plata y cobre en disoluciones coloidales exhiben colores intensos. Las frecuencias de resonancia de plasmón de estas partículas se encuentran en el rango de longitudes de onda ultravioleta-visible. Además, estas frecuencias de resonancia están influenciadas por el tamaño y la forma de las partículas, lo que lleva a variaciones en los colores observados, como se representa en la Figura 2.9 (Camino, 2017).

Figura 2. 9.

Clasificación de diferentes morfologías típicas de las AgNPs y AuNPs y su localización en el espectro UV-Vis según la absorción provocada por la SPR



Nota: (Camino, 2017)

Las nanopartículas de plata (AgNPs) son destacadas por su potencial y versatilidad, ya que encuentran aplicaciones en diversos campos como la optoelectrónica, la catálisis y los procesos de remediación ambiental. Además, su uso en aplicaciones biomédicas es significativo debido a sus propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y estructurales. Su capacidad de actividad fotoactiva las convierte en candidatas ideales como agentes antimicrobianos, tanto contra bacterias como hongos, lo que las hace valiosas en el ámbito de la salud. Además, se han empleado exitosamente para el marcaje celular en aplicaciones biomédicas.

Dentro de la familia de las nanopartículas metálicas, las AgNPs han despertado un gran interés debido a su marcada actividad antimicrobiana. Esta característica es esencial en el desarrollo de productos que incorporan AgNPs en diversos materiales, especialmente por su eficacia como agentes bactericidas contra microorganismos como bacterias y hongos.

En el campo médico, se utilizan AgNPs en aplicaciones como apósitos para heridas, instrumental quirúrgico y prótesis óseas. Estos materiales están recubiertos o integrados con AgNPs para prevenir el crecimiento bacteriano y reducir el riesgo de infecciones. Por ejemplo, los catéteres a menudo se fabrican con materiales que contienen AgNPs para disminuir las posibilidades de infecciones asociadas. Además, las AgNPs también se utilizan en la industria textil para la fabricación de prendas antibacterianas (Camino, 2017).

2.4.2. Fenómeno de atrapamiento de luz

En diversas aplicaciones como energía solar, fototerapias, espectroscopía Raman y fotoelectroquímica, el proceso de atrapamiento de la luz juega un papel fundamental. Este

proceso está diseñado para maximizar la captura de fotones provenientes de una onda electromagnética incidente en un dispositivo, con el propósito de generar portadores de carga, excitones o ambos tipos de cargas. La eficiencia de retención de la luz se logra típicamente cuando la longitud del trayecto óptico es mayor que el espesor físico del dispositivo en cuestión.

En esencia, el atrapamiento de la luz busca aumentar la interacción entre la luz incidente y el material del dispositivo, permitiendo la absorción y utilización más eficiente de la energía luminosa. Este proceso es especialmente crítico en tecnologías como la energía solar, donde se busca capturar la mayor cantidad posible de fotones para generar corriente eléctrica a partir de la conversión de la energía luminosa.

Además, en aplicaciones como la fototerapia y la espectroscopía Raman, el atrapamiento de la luz puede mejorar la detección y el efecto terapéutico al aumentar la interacción entre la luz y las moléculas objetivo. En la fotoelectroquímica, este proceso puede aumentar la eficiencia de la generación de corriente eléctrica a partir de reacciones electroquímicas inducidas por la luz (Molina, 2016).

La elección de la gama de frecuencias para captar la luz depende de la aplicación específica. Para tecnologías fotovoltaicas y fototérmicas, es deseable retener la luz en todo el espectro solar. Por otro lado, en aplicaciones como la fototerapia, las longitudes de onda del infrarrojo cercano son altamente efectivas. Para lograr este objetivo, se han utilizado diversos enfoques, como nanoestructuras metálicas, metamateriales fotónicos, absorbentes de capas múltiples, absorbentes cermet y puntos cuánticos, entre otros materiales, para la retención de la luz en dispositivos.

Las nanoestructuras metálicas, por ejemplo, han demostrado ser eficaces en mejorar la eficiencia de los dispositivos de captación de energía. Estas nanoestructuras, cuando se depositan en la superficie de células solares, pueden contribuir a la retención de la luz mediante mecanismos como el esparcimiento y múltiples reflexiones/absorciones. Sin embargo, es importante señalar que la región de longitud de onda de resonancia de las nanopartículas metálicas tiende a ser estrecha, lo que puede limitar la eficiencia de conversión de potencia a una región espectral estrecha.

Por lo tanto, uno de los desafíos clave en esta área es desarrollar nanopartículas metálicas que sean capaces de cubrir todo el espectro solar. Esto implica la creación de estructuras que puedan absorber y retener la luz en una amplia gama de longitudes de onda. Superar esta limitación podría tener un impacto significativo en la mejora de la eficiencia de dispositivos de captación de energía y otras aplicaciones (Díaz Acosta, 2019).

Una forma de mejorar la eficiencia de las células solares es permitir que la luz rebote en el interior de esta, incrementando las posibilidades de que sea absorbida. Una película rugosa nanoestructurada sobre una célula de silicio permitiría que los fotones que entren en el material tiendan a ser reflejados dentro del mismo. El atrapamiento de la luz funciona de forma distinta a estas escalas. En lugar de una reflexión interna total, la luz queda atrapada en la superficie de nano capas, que actúan como guías de onda. Este incremento en la cantidad de tiempo que pasa el fotón en el material también mejora las opciones de absorción. Debido a la geometría de las capas, algunas longitudes de onda son atrapadas mejor que otras, y esto da lugar a resonancias en ciertas frecuencias (Molina, 2016).

2.4.3. Esparcimiento de luz

El esparcimiento es el fenómeno físico el cual consiste en que moléculas o partículas absorben la luz incidente y la reemiten en todas direcciones. Si el esparcimiento absorbe y reemite más un color que otro, es llamado esparcimiento Rayleigh, si absorbe y reemite todos los colores por igual se le conoce como esparcimiento Mie. Para el primer caso, las partículas son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente y para el segundo caso, las partículas son más grandes o iguales que la longitud de onda incidente (Camino, 2017).

El fenómeno de esparcimiento ofrece aplicaciones novedosas e innovadoras en el campo de las energías renovables basadas en celdas solares. La capacidad de las nanopartículas plasmónicas para absorber y esparcir la luz de manera más eficiente permite utilizarlas junto a materiales que presentan actividad fotovoltaica, de manera que éstos recojan la luz y la transformen en energía eléctrica de manera más eficiente. El potencial de los plasmones para optimizar las eficiencias solares por procesos de esparcimiento de luz hacia delante es objeto de intensa investigación en todo el mundo (De Ciencia et al., 2017).

A longitudes de onda en la proximidad de la resonancia de las nanopartículas metálicas, éstas tienen una constante dieléctrica negativa. Esto permite a la partícula interactuar con luz sobre una gran área de sección transversal de extinción. Las áreas de sección transversal de extinción C_{ext} , absorción C_{abs} y para el esparcimiento C_{sca} están dadas como:

$$C_{ext} = C_{abs} + C_{sca} \quad (2.1)$$

En donde:

$$C_{abs} = 2\pi Im \frac{\alpha}{\lambda} + C_{sca} \quad (2.2)$$

$$C_{csa} = (2\pi)^4 \frac{(\alpha^2)}{6\pi\lambda^4} \quad (2.3)$$

$$\alpha = 3V \frac{(\epsilon - 1)}{(\epsilon + 2)} \quad (2.4)$$

La ecuación 2.3 indica que la sección transversal de esparcimiento de luz depende del inverso de la cuarta potencia de la longitud de onda y del cuadrado de la polarizabilidad. Mientras que la sección transversal de la absorción depende del inverso de la longitud de onda. Esto implica que para $C_{csa}/C_{abs} > 1$, se tendrá un importante esparcimiento hacia adelante. El efecto mejora cuando el tamaño de partícula se incrementa (Camino, 2017).

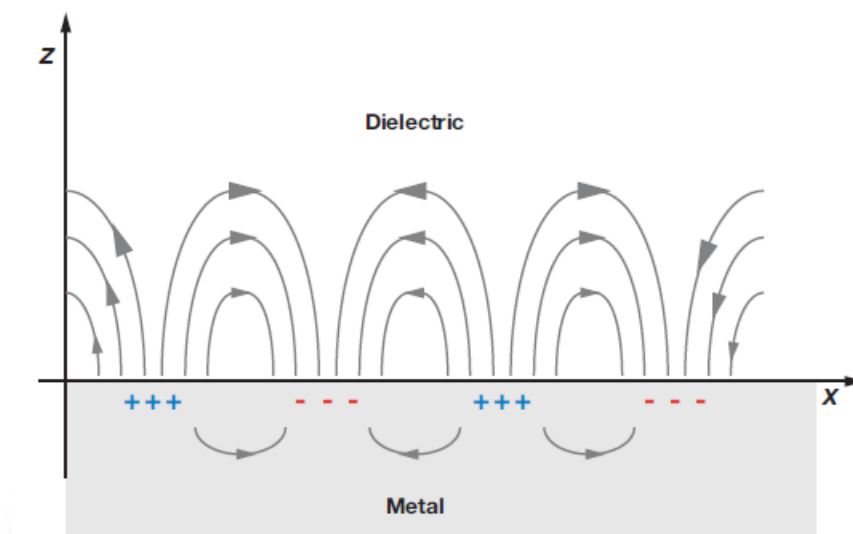
2.5. EFECTO PLASMONICO

Materiales que poseen una constante dieléctrica imaginaria real negativa y pequeña positiva imaginaria son capaces de soportar una resonancia de plasmón de superficie (SPR). Esta resonancia es una oscilación coherente de los electrones de conducción superficial excitados por electrones radiación (EM). La plasmónica es el estudio de estas interacciones particulares luz-materia, que han permitido una amplia gama de aplicaciones, incluidas espectroscopias mejoradas de superficie, detección biológica y química y fabricación litográfica (Willets & Van Duyne, 2007).

Los plasmones de superficie localizados se producen en nanopartículas metálicas de tamaño menor que la longitud de onda de la luz incidente. En este caso, la luz interactúa de manera muy intensa con la nanopartícula, lo que se traduce en una absorción o dispersión de la luz significativa, como se observa en la Figura 2.10. La excitación de los plasmones de superficie localizados en una nanopartícula metálica genera un campo eléctrico que oscila localmente alrededor de la nanopartícula. La frecuencia de oscilación de este campo eléctrico se conoce como LSPR. El LSPR es similar al SPR, que es un fenómeno óptico que se produce en superficies metálicas. El SPR es sensible a los cambios en el medio que rodea la superficie metálica. En el caso del LSPR, los investigadores pueden detectar cambios en el entorno local de la nanopartícula a través de una medición de desplazamiento de longitud de onda LSPR. También es posible realizar una medición de ángulo resuelto del LSPR (Willets & Van Duyne, 2007).

Figura 2. 10.

Diagramas esquemáticos que ilustra una superficie de plasmón



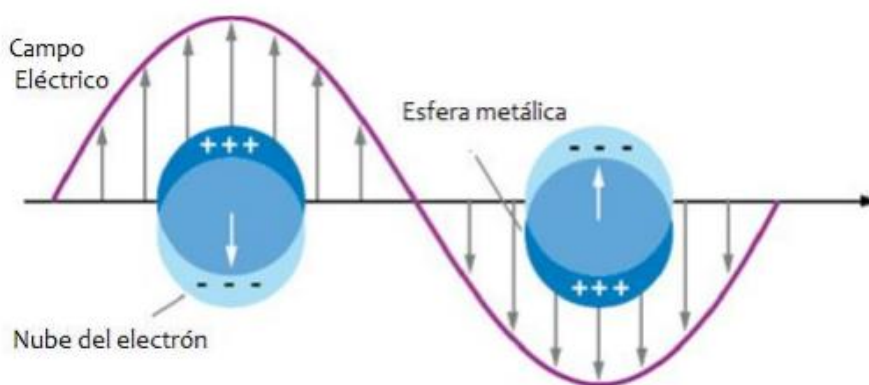
Nota: (Willems & Van Duyne, 2007)

2.5.1. Resonancia de plasmones superficiales localizados

La resonancia de plasmón superficial localizada, o LSPR, es un fenómeno óptico que se produce cuando los electrones libres de una nanoestructura metálica oscilan de manera colectiva en respuesta a la luz. La LSPR se caracteriza por un aumento de la absorción de luz en una longitud de onda específica, que depende del tamaño, la forma y el material de la nanoestructura, tal como se muestra en la Figura 2.11. (Molina, 2016).

Figura 2. 11.

Resonancia de plasmón superficial localizado de nanopartículas metálicas esféricas



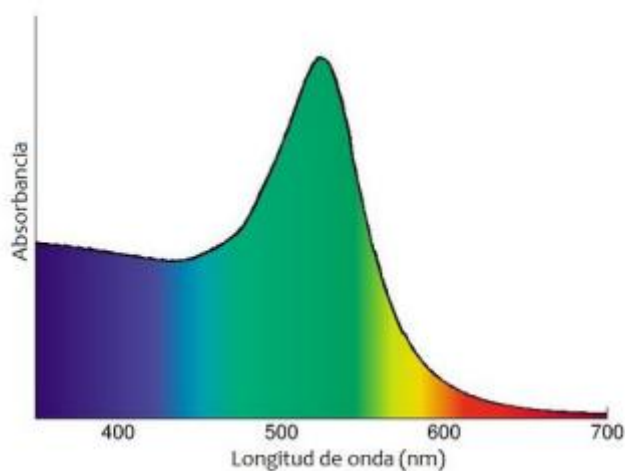
Nota: (Molina, 2016)

Las nanopartículas metálicas tienen electrones libres en su superficie que se pueden excitar con luz. Cuando los electrones se excitan, comienzan a oscilar a una frecuencia característica que depende del tamaño, la forma y el material de la partícula. Esto genera un aumento en el campo eléctrico en la cercanía de la superficie de la partícula (Molina, 2016).

Cuando la luz incide sobre una nanopartícula metálica, los electrones libres de la partícula se alinean con el campo eléctrico de la luz. Esto crea un dipolo eléctrico, que es una estructura con dos cargas opuestas. El dipolo genera un campo eléctrico que interactúa con el campo eléctrico de la luz, lo que lleva a una oscilación de los electrones. Esta oscilación se conoce como plasmón localizado.

Las nanopartículas de oro, plata, cobre y elementos alcalinos tienen plasmones localizados que emiten luz en la región visible del espectro electromagnético. Por ejemplo, las nanopartículas de oro con un diámetro menor a 20 nm absorben la luz verde y transmiten la luz roja. Figura 2.12 (Marín, 2021).

Figura 2. 12.
Espectro de absorción de nanopartículas de oro



Nota: Espectro de absorción de nanopartículas de oro de diámetro $d=13$ nm. Cuando la luz blanca interactúa con la nanopartícula se absorben principalmente los fotones verde y azul, transmitiendo la partícula el color rojo (Marín, 2021).

2.5.2. Nanopartículas de plata plasmónica

Hasta la fecha, la nanotecnología ha focalizado su atención en dos áreas primordiales: la plasmónica y las estructuras periódicas. La nanotecnología plasmónica abarca el estudio y control de la luz a nivel nanométrico. Las nanopartículas plasmónicas, con dimensiones entre 1 y 100 nanómetros, ocupan un papel central en este ámbito. Su tamaño reducido les otorga

propiedades únicas, convirtiéndolas en herramientas valiosas para diversas aplicaciones, tales como detección, imágenes y terapia.

Una de las cualidades más destacadas de las nanopartículas plasmónicas es su notable capacidad de absorción. Pueden captar una amplia gama de longitudes de onda, englobando luz visible, infrarroja y ultravioleta. Este rasgo resulta esencial para detectar diversos elementos, que abarcan desde células cancerosas hasta bacterias y virus. Otra característica favorable es su eficiencia sobresaliente: estas nanopartículas tienen la aptitud de transformar la luz en calor con una eficiencia elevada. Esta propiedad las convierte en herramientas útiles para tratar diversas afecciones, como el cáncer, las infecciones y enfermedades cardíacas.

Además de su alta capacidad de absorción y eficiencia, las nanopartículas plasmónicas se destacan por ser económicas y de fabricación sencilla. Estas cualidades las vuelven una elección atrayente para una amplia variedad de aplicaciones (Camacho, 2012).

Existen una variedad de nanopartículas plasmónicas entre ellas esta:

- **Nanopartículas de oro:** Estas son las nanopartículas plasmónicas más ampliamente estudiadas y utilizadas. Presentan una notable absorción de luz en el rango visible del espectro, lo que las convierte en herramientas valiosas para diversas aplicaciones, que incluyen la detección, la imagen y la terapia.
- **Nanopartículas de plata:** Las nanopartículas de plata también exhiben una alta capacidad de absorción de luz, aunque en un rango de longitud de onda diferente al de las nanopartículas de oro. Esta característica las hace útiles para una serie de aplicaciones distintas, tales como la detección de células cancerosas y la terapia fotodinámica.
- **Nanopartículas de semiconductores:** Las nanopartículas de semiconductores tienen la particularidad de que su absorción de luz puede ajustarse mediante la modificación de su tamaño y forma. Este atributo las convierte en instrumentos valiosos para diversas aplicaciones, como la detección y la imagen de células y tejidos.
- **Nanopartículas de carbono:** Las nanopartículas de carbono, como el grafeno y los nanotubos de carbono, poseen una serie de propiedades únicas que las vuelven versátiles para una diversidad de aplicaciones, entre ellas la detección, la imagen y la terapia.

Las nanopartículas de plata plasmónicas (AgNPs) son un tipo especial de nanopartícula con una notoria capacidad de absorción de luz. Esta característica las hace excepcionalmente adecuadas para una diversidad de aplicaciones, incluyendo la detección, la obtención de imágenes y la terapia. Un uso interesante de las AgNPs es como captadores de la luz solar.

Cuando se exponen a la luz solar, las AgNPs convierten esta luz en calor. Este calor generado puede emplearse para diversos fines, como el calentamiento de agua, el secado de alimentos y la generación de electricidad.

Las AgNPs ya se aplican en diversos dispositivos que funcionan mediante la energía solar, como paneles solares, calentadores de agua y sistemas de secado de alimentos. A medida que la investigación en este ámbito avanza, es muy probable que las AgNPs adquieran un uso aún más extenso en el futuro. Aquí hay algunos ejemplos específicos de cómo se utilizan las AgNPs como absorbentes de luz solar:

- **Paneles solares:** Las AgNPs se pueden utilizar en paneles solares para aumentar la eficiencia de conversión de la luz solar en electricidad.
- **Calentadores de agua:** Las AgNPs se pueden utilizar en calentadores de agua para calentar agua utilizando la luz solar.
- **Secadores de alimentos:** Las AgNPs se pueden utilizar en secadores de alimentos para secar alimentos utilizando la luz solar (Juárez, 2012).

Ciertamente, existe una diversidad de técnicas para la producción de nanopartículas, y se pueden agrupar en tres categorías principales: métodos físicos, síntesis química y procesos mecánicos, como la molienda.

- En los **métodos físicos**, encontramos técnicas como la ablación con láser, que permite generar nanopartículas a través de la interacción de la radiación láser con un material sólido.
- Por otro lado, **la síntesis química** es una categoría ampliamente utilizada, donde las nanopartículas se cultivan en un medio líquido que contiene diversos reactivos.
- En los **métodos mecánicos**, la molienda con perlas o bolas ha captado un interés significativo. Esta técnica implica la reducción del tamaño de partículas mediante la acción mecánica de las bolas en un entorno de molienda (Mosquera et al., 2015).

El nanoparticulado de plata resalta por su potencial y versatilidad, encontrando aplicaciones en optoelectrónica, catálisis y procesos de remediación ambiental. Su valor también radica en su utilidad en aplicaciones biomédicas, ya que sus propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y estructurales le confieren un alto potencial. Su fotoactividad en particular las hace destacar como agentes antimicrobianos con propiedades bactericidas y fungicidas, además de resultar ideales para el mercado de células.

Dentro de la familia de las nanopartículas metálicas, las de plata han generado un interés excepcional. Su capacidad antimicrobiana ha llevado a su incorporación en una amplia variedad

de productos de consumo disponibles en el mercado. De hecho, estas nanopartículas se han convertido en el nanomaterial más utilizado en la fabricación de bienes de consumo, llegando a estar presentes en alrededor de 435 productos.

La extraordinaria propiedad antimicrobiana de las nanopartículas de plata ha impulsado su adopción en diversos productos, lo que subraya su impacto y relevancia en la tecnología y en nuestra vida cotidiana (Cardoso, 2016).

Desde un enfoque teórico, los fenómenos de interacción entre la radiación electromagnética y las nanopartículas originan un movimiento colectivo de electrones en un medio dieléctrico a una frecuencia específica de resonancia. Este fenómeno se conoce como la Resonancia Plasmónica de Superficie (LSPR, por sus siglas en inglés).

La LSPR conlleva a dos efectos distintos. Primero, se produce una disipación de calor debido a las interacciones con la red de átomos de la nanopartícula, lo que resulta en la absorción de luz. Segundo, se observa un desplazamiento de los electrones libres que poseen carga negativa con respecto al núcleo, que presenta una carga positiva.

Estos comportamientos subrayan cómo las nanopartículas, en su escala nanométrica, tienen la capacidad de responder a la radiación electromagnética de una manera particular, generando efectos tanto en términos de absorción de energía como en la disposición de los electrones con relación al núcleo atómico. (Osorio et al., 2019).

Desde una perspectiva óptica, los plasmones superficiales han experimentado una transición gradual, evolucionando desde estudios fundamentales hacia aplicaciones más impulsadas por investigadores. A medida que se han ido comprendiendo mejor, se han explorado diversas aplicaciones tecnológicas aprovechando sus propiedades únicas. A través de esta exploración, se ha superado una serie de desafíos tecnológicos fundamentales.

Los plasmones superficiales ofrecen propiedades singulares que permiten resolver varios problemas tecnológicos. Investigaciones recientes han propiciado el desarrollo de una diversidad de elementos ópticos y técnicas, que abarcan desde una amplia gama de guías de onda hasta interruptores activos y biosensores. Los avances en el uso de plasmones no solo han enriquecido el campo de la óptica, sino que también han expandido su influencia hacia otras áreas de investigación.

En conjunto, esta evolución refleja cómo la comprensión y explotación de los plasmones superficiales han evolucionado a lo largo del tiempo, catalizando innovaciones en diversas áreas tecnológicas y científicas (Juárez, 2012).

En el contexto del nanoparticulado metálico, la interacción entre una radiación electromagnética y la propia partícula da lugar a características excepcionales debido a los

efectos cuánticos que se manifiestan en estos sistemas. En particular, las nanopartículas metálicas desencadenan plasmones superficiales, los cuales exhiben propiedades ópticas únicas en función del elemento químico utilizado.

Los plasmones superficiales resonantes se generan por la excitación de estas nanopartículas metálicas. Esta excitación produce una amplificación significativa del campo electromagnético en las proximidades de la superficie de la nanopartícula. En esencia, se trata de una concentración intensificada del campo electromagnético en la región cercana a la superficie de la nanopartícula debido a la excitación resonante de los plasmones superficiales.

Estos fenómenos cuánticos y las respuestas únicas de los plasmones superficiales en las nanopartículas metálicas desempeñan un papel esencial en el aprovechamiento de estas partículas para aplicaciones ópticas y otras áreas tecnológicas (Manno et al., 2020).

Las nanopartículas magnéticas ofrecen una amplia gama de aplicaciones atractivas, especialmente en los campos de la biología y la medicina. Su tamaño ajustable, que puede variar desde unos pocos nanómetros hasta decenas de nanómetros, permite que sean comparables en dimensiones a componentes biológicos como células (10-100 μm), virus (20-450 nm) o incluso genes (2 nm de ancho y 10-100 nm de largo). Esto las hace adecuadas para interactuar y unirse con diversas entidades biológicas de interés.

Un aspecto destacado de las nanopartículas magnéticas es su propiedad magnética, lo que significa que pueden responder a campos magnéticos externos de acuerdo con la ley de Coulomb. Esto permite que sean manipuladas y desplazadas por un campo magnético, lo que lleva a una transferencia de energía desde el campo magnético excitado hacia la nanopartícula. Esta característica tiene aplicaciones en la hipertermia, donde las nanopartículas magnéticas se calientan mediante un campo magnético, y también en la regulación de la entrega de energía térmica en cantidades específicas a órganos o tejidos específicos.

Estas propiedades especiales de las nanopartículas magnéticas han llevado a su uso en una variedad de aplicaciones biomédicas, incluida la regulación térmica, la entrega de medicamentos y otros enfoques terapéuticos. Su capacidad de interacción y manipulación a nivel nanométrico ha convertido a las nanopartículas magnéticas en herramientas valiosas en la investigación y la práctica médica (Mastranzo, 2017).

Los sistemas nanoestructurados desempeñan un papel crucial en el ámbito de la electrónica, especialmente en la manufactura de nano antenas para dispositivos móviles o satélites, donde se busca agrupar un gran número de antenas en un espacio reducido. Estas nanoestructuras permiten maximizar la eficiencia y la capacidad de comunicación en un tamaño mínimo.

Los metamateriales, y específicamente las estructuras o sistemas que incorporan nanopartículas, se encuentran en una etapa de investigación activa. Aunque ha transcurrido un tiempo considerable, el mundo de la nanotecnología todavía se encuentra en una etapa emergente y no ha alcanzado plenamente el mercado. A medida que se desarrolla una comprensión más profunda de las propiedades y posibilidades de los metamateriales y las nanoestructuras, es posible que en el futuro veamos aplicaciones más amplias y concretas en áreas como la electrónica, la comunicación y otras industrias.

Como se mencionó previamente, esta investigación se centra en la visualización de la resonancia del plasmón superficial localizado en el caso de nanopartículas de plata. Este enfoque abarca todo el proceso, desde la obtención de las nanopartículas metálicas hasta la evaluación de cómo un haz de luz incide sobre un objeto recubierto con estas nanopartículas. El objetivo es observar cómo la luz interactúa con el nanoparticulado de plata y cómo esta interacción resulta en propiedades energéticas.

El proceso comienza con la síntesis de las nanopartículas metálicas, en este caso, las de plata. Luego, se lleva a cabo un experimento donde un haz de luz incide sobre una superficie que está recubierta con estas nanopartículas. La incidencia de la luz provoca que el nanoparticulado de plata absorba energía de la luz y la convierta en energía cinética y calorífica. Esto transforma a las nanopartículas en excelentes captadores de luminosidad.

En resumen, la investigación se enfoca en entender cómo las nanopartículas de plata interactúan con la luz, aprovechando la resonancia del plasmón superficial localizado. Esto tiene implicaciones en términos de energía, donde la luz se convierte en calor y energía cinética gracias a la presencia de las nanopartículas, lo que las convierte en eficaces captadores de luminosidad.

2.5.3. Efecto plasmónico en nanopartículas

Las nanopartículas metálicas tienen la capacidad de absorber la luz al excitar los electrones libres en el metal. La cantidad de luz absorbida por una nanopartícula metálica en un medio dieléctrico se puede calcular mediante la ecuación de Maxwell-Garnet.

$$\alpha = p \frac{18\pi n_d^3}{\lambda} \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 2\epsilon_d)^2 + \epsilon_2^2} = p \frac{\omega}{n_0 c} |f_1(\omega)|^2 \epsilon_2 \quad (2.5)$$

Donde p es el porcentaje de llenado del nanocomposito, n_d es el índice de refracción del dielectrico, $\epsilon_m = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ y ϵ_d es la constante dieléctrica del vidrio.

$$\epsilon_1(\omega_p) + 2\epsilon_d(\omega_p) = 0 \quad (2.6)$$

Donde ω_p es la frecuencia en la cual ocurre esta resonancia. Con la igualdad en la ecuación anterior se cumple, los electrones libres en el metal se moverán en una oscilación resonante. Cuando la luz interactúa con una nanopartícula metálica en un medio dieléctrico, se produce una onda electromagnética oscilante en la interfaz entre los dos materiales. Esta onda se conoce como resonancia de plasmón superficial (SPR) y es un fenómeno ampliamente estudiado.

Cuando la interfaz entre un material dieléctrico y un material conductor tiene dimensiones iguales o mayores a la longitud de onda de la luz incidente, se produce una onda electromagnética que se propaga a lo largo de la interfaz. Esta onda se conoce como plasmón polariton de superficie. A medida que las dimensiones de la interfaz se reducen por debajo de la longitud de onda, el campo de acción de la onda electromagnética se vuelve comparable a las dimensiones de la nanopartícula. En este caso, la onda electromagnética se puede propagar a lo largo de una gran parte o toda la interfaz. Para el caso específico de nanopartículas metálicas de dimensiones mucho menores a la longitud de onda de la luz incidente, la onda electromagnética se confina a la superficie de la nanopartícula. Este tipo de onda se conoce como plasmón de superficie localizado.

La resonancia de plasmón de superficie localizado (LSPR) se produce cuando una nanopartícula metálica se coloca en un medio dieléctrico. La frecuencia de resonancia de la LSPR está determinada por las propiedades de conductividad de los dos materiales.

Para metales nobles, la LSPR tiene una resonancia bien definida en el espectro de absorción. Esto se traduce en un pico de absorción bien definido a una frecuencia específica. Experimentalmente, la frecuencia de resonancia de la LSPR depende directamente del tamaño de la nanopartícula. Esto significa que la susceptibilidad lineal de la nanopartícula también depende de su tamaño. También tiene implicaciones para la respuesta no lineal del nanocompuesto. Debido a la naturaleza puramente electrónica del movimiento del gas de electrones del plasmón, los tiempos de respuesta no lineal en materiales plasmónicos son del orden de femtosegundos.

En un material compuesto, la susceptibilidad de tercer orden efectiva del material depende de tres factores:

- La susceptibilidad de tercer orden del metal, que es una medida de la capacidad del metal para responder a la luz de una manera no lineal.

- La densidad de nanopartículas, que es la cantidad de nanopartículas por unidad de volumen.
- El contraste dieléctrico entre el metal y el sustrato, que es la diferencia entre las constantes dieléctricas del metal y el sustrato.

Para el caso de nanopartículas esféricas con tamaños pequeños en una distribución aleatoria, el reforzamiento de la susceptibilidad de tercer orden efectiva se puede calcular mediante la ecuación de (Haglund, 1998)

$$X_{eff}^{(3)} = p \left[\frac{3n_d}{\epsilon_1 + i\epsilon_2 + 2n_d^2} \right]^2 X_{met}^{(3)} + X_{diel}^{(3)} \equiv p_1^2 |f_1|^2 X_{met}^{(3)} + X_{diel}^{(3)} \quad (2.7)$$

Donde $X_{diel}^{(3)}$ representa la susceptibilidad de tercer orden del metal y f_1 es un factor de corrección del campo local.

2.6. CONVERSION DE ENERGIA SOLAR FOTOTÉRMICA

Existen diferencias significativas en la conversión de energía y transmisión entre colectores de absorción de superficie y DASC. Los factores reológicos y térmicos juegan un papel importante en la mejora del rendimiento de los colectores solares de absorción superficial, mientras que la radiación La propagación es el factor dominante que afecta el rendimiento de volumétrica Colectores solares de absorción (Mallah et al., 2019).

2.6.1. Propagación de radiación EM en un medio

Cuando la radiación EM se propaga a través de un medio, la radiación la intensidad se atenúa en la dirección de propagación. Algunos de los atenuados La energía se absorbe en el medio mientras que el resto las cantidades se encuentran dispersas en diferentes direcciones e intensidades. La direccional atenuación de radiación $I_{A,\lambda}$, se puede determinar a partir de la cerveza Ley de Lambert (Mallah et al., 2019).

$$I_{A,\lambda} = I_{inc,\lambda} (1 - e^{-K_{f,\lambda} \times L}) \quad (2.8)$$

2.7. AVANCES EN LA APLICACIÓN DE NANOFLUIDOS EN COLECTORES SOLARES

La utilización de la energía solar y la tecnología de los nanofluidos atrajeron mucha más atención. Choi (1995), del laboratorio nacional de Argonne (EE.UU.), desarrolló por primera vez los nanofluidos para la transferencia de calor en 1995.

Las suspensiones de nanofluidos que contienen partículas $<100\text{nm}$ y tienen una conductividad térmica de sólidos del orden de magnitudes superior a la de los fluidos base. Los estudios experimentales realizados por Choi et al. (1999); Koblinski et al. (2002) muestran que la conductividad térmica efectiva aumenta en condiciones macroscópicas estacionarias.

Los colectores solares térmicos también pueden considerarse legendarios en función del tipo de líquido caloportador y de su construcción utilizados y si están cubiertos o descubiertos. Los colectores solares planos se utilizan para calentar agua y su rendimiento y eficiencia de estos sistemas es de alrededor del 70%, lo que es muy alto en comparación con los sistemas de conversión directa de energía solar, que tienen una eficiencia de alrededor del 17%.

Estos colectores son útiles para aplicaciones domésticas, calefacción de espacios y calefacción industrial de baja temperatura. En la actualidad existe un gran número de colectores solares basados en sistemas de concentración de energía solar (CSP) que utilizan lentes o espejos y sistemas de seguimiento para concentrar una gran superficie de luz solar en un pequeño haz, que luego se utiliza como fuente de calor para una central eléctrica convencional. La amplia gama de tecnologías de concentración son los colectores cilindro-parabólicos, los reflectores lineales de Fresnel, los colectores Sterling y los colectores de torre de energía solar. Recientemente, el sistema de configuración termo-solar combinado con las tecnologías emergentes de nanofluidos y diferentes suspensiones de nanopartículas para desarrollar un enfoque innovador de colectores solares basados en nanofluidos.

En los últimos años, los nanofluidos han adquirido un gran potencial en muchos campos, como los colectores solares y la energía térmica. Para las aplicaciones energéticas, se utilizan dos propiedades notables de los nanofluidos: termofísicas de los nanofluidos, que mejoran la transferencia de calor, y la aplicación de nanofluidos en colectores solares. El colector solar convencional de absorción directa es una tecnología consolidada y se ha propuesto para diversas aplicaciones. Sin embargo, la eficiencia de estos colectores está limitada por las propiedades de absorción del fluido de trabajo.

Esta tecnología se ha combinado con las tecnologías emergentes de nanofluidos preparados mediante suspensiones de nanopartículas líquidas. La revisión de investigadores anteriores realizada por Mahian et al. (2013) ofrece un conocimiento noble sobre la mejora de la eficiencia

y el rendimiento del sistema solar térmico, calentador de agua solar, almacenamiento de energía térmica, células y alambiques solares.

En los últimos años, se ha realizado una importante investigación sobre la aplicación de nanofluidos en colectores solares. Los resultados de esta investigación han demostrado que los nanofluidos pueden mejorar la eficiencia de los colectores solares en un rango de 10 a 20%. Algunos de los avances más recientes en la aplicación de nanofluidos en colectores solares incluyen:

- El desarrollo de nanofluidos con partículas de nanoescala que tienen propiedades térmicas mejoradas. Estas partículas pueden ser de materiales que tienen una alta conductividad térmica, como el grafeno o el diamante.
- El desarrollo de nanofluidos que son estables y no se sedimentan fácilmente. Esto es importante para garantizar que los nanofluidos funcionen de manera efectiva en los colectores solares.
- El desarrollo de métodos para fabricar nanofluidos de manera económica y escalable. Esto es necesario para hacer que los nanofluidos sean comercialmente viables para su uso en colectores solares.

En estudios realizados por investigadores de la Universidad de Stanford, se demostró que un nanofluido con partículas de grafeno en suspensión podía aumentar la eficiencia de un colector solar plano en un 15%. En otro estudio, realizado por investigadores de la Universidad de California en Berkeley, se demostró que un nanofluido con partículas de nanotubos de carbono en suspensión podía aumentar la eficiencia de un colector solar de concentración en un 20%.

Aun así, hay un número muy limitado de trabajos de investigación en el área de colectores solares con nanofluidos. Básicamente los colectores solares de absorción directa basados en nanofluidos de baja temperatura fueron investigados por Tyagi et al. (2009), estudiaron nanofluidos basados en agua - Al_2O_3 , que se utilizaron para la investigación. Donde la fracción de volumen de partículas (0,1% a 5%) influyó en la eficiencia de los colectores. Se observó un aumento significativo de la eficiencia del colector no sólo variando el volumen de partículas sino también la transmisividad de la cubierta de vidrio y la altura del colector. La eficiencia aumenta un 8% para una fracción volumétrica que oscila entre 0,8% y 1,6%, y el efecto del tamaño de las nanopartículas en el aumento de la eficiencia es marginal.

Taylor et al. (2011) investigaron experimentalmente, utilizando nanofluidos de grafito/terminol VP-1 para colectores de torre de energía solar de 10-100 MW y observaron una mejora potencial de la eficiencia. Teóricamente 10% en la eficiencia se puede observar en

comparación con los colectores solares convencionales, cuando se utiliza relación de concentración solar de 10-1000. Los resultados experimentales muestran que se puede conseguir un aumento de la eficiencia del 5-10% utilizando nanofluidos en la sección receptora. Los autores también calcularon que se pueden obtener unos ingresos superiores en 3,5 millones de dólares al año si se aplica correctamente.

Li et al. (2011) realizaron estudios similares a Taylor utilizando tres nanofluidos diferentes (Al_2O_3 /agua, ZnO /agua y MgO /agua) en los colectores solares tubulares. Los resultados mostraron que el 95% de la luz solar entrante puede ser absorbida eficazmente mientras se utiliza el nanofluido de fracción de volumen inferior a 10 ppm. La eficiencia del colector solar de placa plana fue investigada experimentalmente por Yousefi et al. (2012) utilizando nanofluido de Al_2O_3 /agua con una concentración en peso de 0,2% y 0,4% y un tamaño de partícula de 15 nm. La investigación se llevó a cabo con Triton X-100 como tensioactivo y sin él. Los resultados mostraron un aumento de la eficiencia del 28,3% con un nanofluido con una fracción en peso del 0,2%. Además, se observa un aumento del 15,63% en la eficiencia al aumentar el caudal másico y utilizar el tensioactivo. Los tensioactivos influyen en la eficiencia y el pH del punto isoeléctrico aumenta la eficiencia del colector. Por último, la revisión de todos los resultados de datos experimentales y numéricos existentes para la predicción del colector solar con diferentes nanofluidos se observa en la Tabla 2.2.

Los nanofluidos (grafito y plata) basados en colectores solares de absorción directa (DASC) fueron estudiados experimental y numéricamente por Otanicar et al. (2010) los efectos de los nanofluidos en la eficiencia hasta un 5%, utilizando nanofluidos como medio de absorción. El autor comparó los datos experimentales con sus respectivos datos numéricos. Los resultados revelaron que se puede lograr un aumento de la eficiencia del 3% nanopartículas de grafito de 30 nm, el 5% con nanopartículas de plata de 20 a 40 nm, y se observó un aumento de la eficiencia del 6% cuando el tamaño de las partículas se reduce a la mitad.

Tabla 2. 2.
Revisión de todos los resultados de datos para colector solar con diferentes nanofluidos

Investigador	Tipo de colector	Nanofluidos (particular/fluido base)	Tamaño de partícula	Tipo de estudio	Observaciones
Yousefi et.al	Placa de laminas	Al ₂ O ₃ / H ₂ O Triton X-100 se utiliza como tensioactivo	15nm	Experimental	La eficiencia del colector con nanofluidos al 0,2% (peso) es superior a la del colector con agua en un 28.3%. El surfactante mejora la eficiencia en un 15,63%.
Yousefi et.al	Placa de laminas	MWCNT / H ₂ O Se utiliza Triton X-100 como tensioactivo	10-30nm	Experimental	La eficiencia del colector aumenta enormemente con nanofluidos al 0,4% (peso), mientras que con 0,2% (peso) la eficiencia disminuye en comparación con el agua. Los tensioactivos la eficiencia del colector.
Taylor et.al.	Absorción directa	Grafito/ H ₂ O & VPI, Al ₂ O ₃ / H ₂ O & VPI, Cu / H ₂ O & VPI, Oro, Plata/VPI	5nm	Teórico experimental	Alrededor del 95% de la luz solar entrante puede ser absorbida para espesores de nanofluido ≥ 10 y fracciones de volumen de nanopartículas inferiores a 1×10^{-5}
Taylor et.al	Concentración de absorcion directa	Grafito/ H ₂ O & VPI, Al ₂ O ₃ / H ₂ O & VPI, Cu / H ₂ O & VPI, Oro Plata/VPI	5-10nm 10-100nm	Teórico experimental	La eficiencia aumenta hasta un 10% utilizando un nanofluido en el receptor.
Otanicar et.al	Sin concentración absorción directa	Grafito/ H ₂ O & Plata / agua & CNT / agua 1000-5000 nm de longitud	30-20nm	Teórico experimental	La eficiencia aumenta considerablemente para fracciones de volumen inferiores al 0,5%, la eficiencia aumenta un 6% con la disminución del tamaño de las partículas en el nanofluido de plata/agua.
Li et.al	Tubular	Al ₂ O ₃ / H ₂ O & ZnO/ H ₂ O& MgO/ H ₂ O	<20nm	Experimental	El nanofluido de ZnO / agua con una concentración de volumen del 0,2% es la mejor selección para el colector.

2.7.1. Nanofluidos con un solo tipo de partícula

Los nanofluidos con un solo tipo de partícula indican que las partículas utilizadas son consistentes, incluido su material, forma y otros parámetros fijos. Las diferentes nanopartículas no se mezclan. Los colectores solares se pueden dividir en colectores solares de baja, media y alta temperatura según la temperatura. A continuación, se describen las aplicaciones de nanofluidos con un solo tipo de partícula en colectores solares de baja temperatura y colectores solares de media y alta temperatura (Wang et al., 2023).

A. Colectores solares de baja temperatura cargados de nanofluidos

Generalmente, los colectores solares cuyas temperaturas de trabajo son inferiores a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se denominan colectores solares de baja temperatura (Mallah et al., 2019). Los colectores solares de baja temperatura incluyen principalmente colectores solares de absorción superficial y colectores solares de absorción directa/volumétrica (DASC). La tecnología solar no concentrada suele adoptarse y se ha utilizado ampliamente en calefacción de aire, calefacción de espacios y calentamiento de agua (Wang et al., 2023). Los diferentes tipos de nanofluidos utilizados en los colectores solares de baja temperatura aportarán diferentes beneficios. Los investigadores han llevado a cabo extensos estudios sobre metales nobles, como las NP de Au y Ag. NP de Ag muestran excelentes propiedades de conversión fototérmica. Con el aumento del pico de extinción, se mejoran las propiedades fototérmicas de los nanofluidos de Ag, se mejoran la absorción solar y el aumento de temperatura, y el coeficiente de extinción es proporcional a la concentración (Kasaeian et al., 2015).

B. Colectores solares de media y alta temperatura cargados de nanofluidos

Aunque el análisis anterior encontró que los colectores solares de baja temperatura se han utilizado ampliamente, todavía no pueden satisfacer las necesidades de temperatura de las personas, por lo que los investigadores comenzaron a estudiar los colectores solares de temperatura media y alta. Los colectores solares de temperatura media y alta tienen un rango de temperatura de funcionamiento elevado, generalmente superior a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Shvets & Tsukerman, 2011). La tecnología solar centralizada se utiliza en colectores de media y alta temperatura para obtener altas temperaturas concentrando la radiación solar incidente en la superficie del absorbente, proporcionando así una alta eficiencia de conversión a aplicaciones solares. El colector solar de temperatura media y alta incluye principalmente un colector de tubo de vacío, un colector cilindro-parabólico, un colector parabólico compuesto, un colector de lente de Fresnel, un colector cilindro- parabólico, un reflector de plato parabólico y un colector de campo de helióstato.

2.8. NANOFLUIDOS PLASMONICOS USADO EN COLECTORES SOLARES

La conversión de energía solar se produce de dos formas principales: conversión fotoeléctrica y conversión solar-térmica. El primero utiliza paneles fotovoltaicos para convertir

la radiación solar en electricidad, mientras que el segundo convierte la energía solar directamente en calor (Rogelj et al., 2016).

Recientemente, la transferencia de calor solar ha atraído mucha atención. Los colectores solares son dispositivos que absorben la radiación solar y transfieren el calor generado al medio de transferencia de calor, incluidos los colectores solares de placa plana (FPSC), los colectores solares de tubo de vacío (ETSC), los colectores solares cilindro parabólicos (PTSC) y los colectores fotovoltaicos híbridos (Bodansky, 2016). Entre ellos, la FPSC es la más común, económica y sencilla, pero es ineficiente. ETSC tiene una menor pérdida de calor y un mejor rendimiento térmico que FPSC (International Energy, 1995). El PTSC se utiliza ampliamente en la operación de centrales eléctricas. Su forma parabólica lineal y su receptor se encuentran en la línea focal de la parábola cilíndrica. El colector fotovoltaico híbrido se forma combinando un colector solar fotovoltaico y un colector solar térmico, que se denomina colector fotovoltaico térmico (PV/T).

Choi & Eastman (1999) propusieron nanofluidos por primera vez en 1995. Después de eso, los investigadores intentaron sucesivamente aplicar nanofluidos a la recolección de calor solar y descubrieron que los nanofluidos tienen una alta conductividad térmica y un excelente rendimiento de transferencia de calor. Los nanofluidos están compuestos de NP y líquido base y generalmente consisten en metales (p. ej., Ag, Cu, Ti, Fe, Al, etc.), óxidos (p. ej., CuO, TiO₂, Al₂O₃, SiO₂, etc.), bases de carbono (p. ej., nanotubos de carbono, grafeno, etc.) MXene y polímero, suspendidos en el fluido base (p. ej., agua, queroseno, aceite, refrigerante, líquido iónico, etc.), en los que el tamaño de las NP es de 1 a 100 nm (Duffie, 2013).

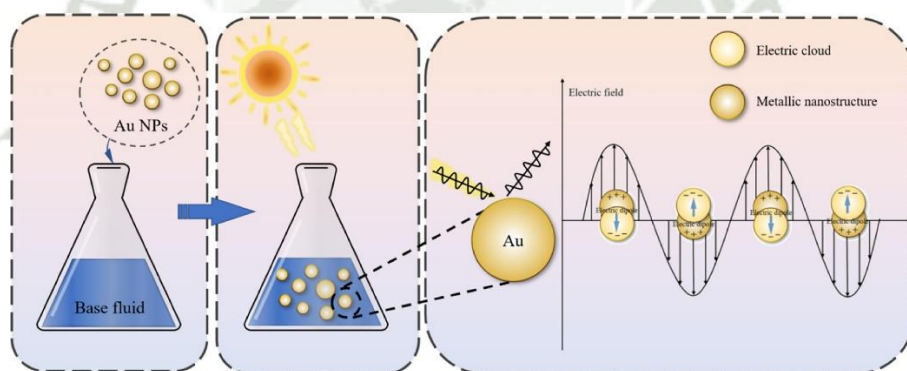
Los nanofluidos convencionales tienen excelentes propiedades termofísicas; sin embargo, debido a la influencia de sus propias propiedades físicas, como el color, la transmitancia y otros parámetros, su aplicación en colectores solares puede no aportar buenas características de absorción de luz y eficiencia de conversión fototérmica, que son dos propiedades importantes de colectores solares. Luego, los investigadores centraron su atención en algunas NP con alta conductividad térmica y propiedades ópticas especiales, y las NP plasmónica pueden cumplir con los requisitos.

En sistemas sólidos con una determinada concentración de portadores (p. ej., metal, semiconductor, etc.), debido a la interacción de Coulomb entre portadores, la fluctuación de la concentración de portadores en un lugar conducirá inevitablemente a la oscilación de la concentración de portadores en otros lugares. Esta excitación básica caracterizada por oscilaciones de la concentración de portadores se llama plasma.

Las NP plasmónica son conocidas por su resonancia de plasmón superficial local (LSPR). Cuando una onda electromagnética incide sobre NP de metales nobles, debido a la interacción entre las NP metálicas y las ondas electromagnéticas, la oscilación colectiva de electrones libres en la capa conductora (es decir, plasma) se vuelve dominante y luego se produce LSPR (Sarsam et al., 2015). En una longitud de onda específica, el plasma oscilante vibra a la misma frecuencia que la onda electromagnética incidente, resonando y generando campos electromagnéticos de alta energía cerca de las partículas, y la energía de la luz incidente se puede convertir efectivamente en energía cinética de vibración colectiva de electrones. y eventualmente en energía térmica a través de la interacción electroacústica del efecto de iluminación del plasma (Fernández-García et al., 2010). Tomando las NP de Au como ejemplo, la Figura 2.13. muestra la generación del efecto LSPR de los nanofluidos de Au en plasma.

Figura 2. 13.

Diagrama del efecto LSPR en nanofluidos de Au plasmáticos



La Au y Ag son dos metales nobles con un efecto LSPR significativo, y sus NP se denominan NP plasmáticas (McDonald, 1975). La eficiencia de conversión fototérmica de los colectores solares se puede mejorar suspendiendo las NP de plasma en el fluido base. LSPR es la razón principal de la alta absorción de luz de las nanopartículas de metales nobles.

2.9. RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO

Son pequeñas sustancias granuladas o esféricas insolubles en agua, compuestas por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante (Grágeda, 2006). Reaccionan como ácidos, bases o sales, pero tienen la peculiaridad de tener sólo cationes o aniones con la habilidad de tomar parte de la reacción química por su capacidad de migración (Nevárez, 2010).

Como la concentración de grupos polares en la resina es un número finito, éstas tienen una capacidad definida de intercambio. La ventaja de las resinas de intercambio iónico es que tienen habilidad para recuperar la capacidad original mediante el tratamiento con una solución que puede ser ácido, base o sal (según la resina y el uso) que desplace los iones retenidos por la resina y los remplace por iones deseados. Este procedimiento se llama regeneración y se realiza cuando la resina agota su capacidad, permitiendo de esta manera utilizar la resina una y otra vez (Nevárez, 2010).

Las resinas sintéticas de intercambio iónico son pequeñas sustancias granuladas e insolubles que consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales; el entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad.

El grado de entrecruzamiento es un factor importante de controlar ya que no sólo determina las propiedades mecánicas de la resina sino también su capacidad de hincharse (swelling) y de absorber agua. El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo la estructura. El proceso de hinchamiento favorece la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcionales (Grágeda, 2006).

Actualmente se realizan investigaciones para el desarrollo de nuevas resinas poliméricas de intercambio iónico ya que en el futuro éstas serán de gran utilidad e importancia en el tratamiento de agua para consumo humano, en aplicaciones industriales y medio ambiente (Pérez et al., 2006).

2.9.1. Tipos según su estructura de red

➤ **Micro porosas o tipo gel**

Son resinas convencionales originadas a partir de la polimerización del divinilbenceno y el estireno. Los grupos de intercambio están distribuidos estadísticamente en la partícula, es muy difícil describir la porosidad ya que la distancia entre los enlaces cruzados y las cadenas varía considerablemente (Pino-Vallejo et al., 2021).

➤ **Macro porosas o macro reticulares**

Son resinas formadas por el polímero de poliestireno y divinilbenceno, como las de tipo gel, pero su apariencia es diferente a las de gel (Pino-Vallejo et al., 2021) ya que durante la síntesis de esta resina se utiliza un cosolvente que actúa interponiéndose entre las cadenas

poliméricas creando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las de tipo gel siendo mayor la capacidad de intercambio favoreciendo la difusión de los iones y mejorando por lo tanto la cinética de intercambio (Bernal, 2019; Grágeda, 2006).

2.9.2. Isoporosas

Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red; son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y un costo más bajo que las resinas macro porosas (Bernal, 2019; Grágeda, 2006).

2.10. TIPOS SEGÚN SU GRUPO FUNCIONAL

2.10.1. Resinas catódicas de ácido fuerte

Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico, el grupo funcional es el ácido sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$) que es altamente ionizable, intercambian iones positivos (cationes). Estas resinas operan a cualquier pH (Nevárez, 2010), requiere de excesivas cantidades de regenerante y es la resina más utilizada (Pino-Vallejo et al., 2021).

2.10.2. Resinas catódicas de ácido débil

El grupo funcional es un ácido carboxílico (COOH) presente en uno de los componentes del copolímero principalmente el ácido acrílico o metacrílico. Son resinas altamente eficientes (Pino-Vallejo et al., 2021), tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos, elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en la columna cuando no cuentan con suficiente espacio en su interior. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo. Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico. Los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados (Nevárez, 2010).

2.10.3. Resinas aniónicas de base fuerte

Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno cloro metilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, (R_4N^+).

Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (Nevárez, 2010).

2.10.4. Resinas aniónicas de base débil

La información proporcionada describe las características y aplicaciones de resinas funcionalizadas con diferentes grupos de amina, como grupos de amina primaria ($-NH_2$), secundaria ($-NHR$) y terciaria ($-NR_2$). Estas resinas son utilizadas para la adsorción de ácidos fuertes, aunque su cinética puede ser lenta. A continuación, se detallan algunas de sus características clave:

- **Eficiencia y capacidad:** Estas resinas son altamente eficientes y tienen una buena capacidad de adsorción para ácidos fuertes. Esto las hace adecuadas para la eliminación de ciertos contaminantes en soluciones acuosas.
- **Regeneración:** Requieren menos cantidad de sosa (hidróxido de sodio) para su regeneración en comparación con otros materiales. La posibilidad de regenerarlas y reutilizarlas es una ventaja económica y ambiental.
- **Limitaciones de pH:** No se pueden utilizar en soluciones con pH alto. Esto limita su uso en condiciones alcalinas.
- **Problemas potenciales:** Pueden ser susceptibles a problemas de oxidación o ensuciamiento en ciertas condiciones de uso.
- **Compatibilidad:** Son adecuadas para su uso en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros. No son adecuadas para eliminar alcalinidad ni silicio de las soluciones.
- **Especificidad en la adsorción:** Estas resinas pueden fijar aniones de ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos. Sin embargo, no son efectivas para capturar aniones débiles como los del ácido carbónico (H_2CO_3) ni del ácido silícico (H_2SiO_3).

En resumen, las resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria, secundaria y terciaria son útiles para la adsorción de ácidos fuertes en soluciones acuosas. Aunque poseen ventajas en términos de eficiencia y regeneración, también tienen limitaciones en cuanto al rango de pH y la captura de ciertos aniones. Su elección dependerá de las necesidades específicas de tratamiento del agua y de las condiciones de uso (Nevárez, 2010).

2.10.5. Resinas quelantes

Las resinas descritas cuentan con grupos funcionales que actúan como reactivos específicos al formar quelatos selectivos con ciertos iones metálicos. Estos grupos funcionales suelen contener átomos como azufre, nitrógeno, oxígeno y fósforo, que establecen enlaces de coordinación con los metales presentes en las soluciones. Los quelatos resultantes son compuestos químicos formados por la interacción entre el grupo funcional y el ión metálico, lo que facilita su adsorción y separación.

Sin embargo, debido a su naturaleza selectiva y a la formación de enlaces coordinativos, estas resinas suelen ser menos utilizadas en la industria en comparación con otras alternativas. Esto se debe a algunas de sus características:

- **Costo:** Estas resinas tienden a ser más costosas de producir debido a su alta selectividad y a la necesidad de utilizar grupos funcionales específicos.
- **Cinética más lenta:** La cinética de absorción o adsorción de iones metálicos es más lenta en comparación con otras resinas. Esto puede limitar su eficiencia en aplicaciones que requieren procesos rápidos.

A pesar de estas limitaciones, estas resinas son valiosas en situaciones donde la selectividad y la especificidad son críticas. Son especialmente útiles cuando se necesita una alta afinidad para capturar iones metálicos específicos en soluciones. Por ejemplo, en aplicaciones de purificación de agua y eliminación de contaminantes específicos, estas resinas pueden ser más efectivas.

En última instancia, la elección de utilizar estas resinas dependerá de la naturaleza de los iones metálicos a eliminar, la especificidad requerida y las condiciones económicas y operativas del proceso industrial en cuestión (Bernal, 2019; Grágeda, 2006).

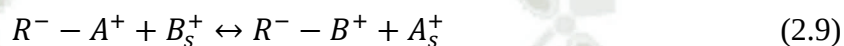
2.11. APLICACIONES DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO PARA SOLUCION DE NANOPARTICULADO DE PLATA

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido (Nevárez, 2010; Pérez et al., 2006). En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga de un fluido (Choi, 2002)

Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H^+) y/o el ion hidroxilo (OH^-) respectivamente (Grágeda, 2006; Manahan, 2007).

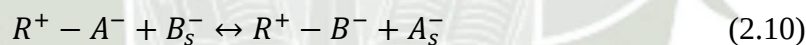
La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión; éste último factor está en función de la dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina.

Cuando el intercambiador iónico generalmente sólido posee en su estructura cargas negativas será capaz de retener e intercambiar iones cargados positivamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio catiónico (Ec. 2.9).



Donde R^- representa al intercambiador catiónico, A^+ al catión intercambiable del sólido y B_s^+ al catión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al catión como monovalente, pero puede tener cualquier carga (Grágeda, 2006; Manahan, 2007).

Cuando el intercambiador iónico generalmente sólido posee en su estructura cargas positivas será capaz de retener e intercambiar iones cargados negativamente, llevándose a cabo la reacción de intercambio aniónico (Ec. 2.10).



Donde R^+ representa al intercambiador aniónico, A^- al anión intercambiable del sólido y B_s^- al anión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al anión como monovalente, pero puede tener cualquier carga (Grágeda, 2006; Manahan, 2007).

Los primeros productos empleados en la industria como intercambiadores iónicos fueron las zeolitas inorgánicas de origen natural, como los silicatos de aluminio; después se introdujeron los intercambiadores iónicos orgánicos, hechos a partir de productos naturales sulfonados como el carbón, la lignita y la turba; sin embargo, en la actualidad se utilizan resinas sintéticas en su mayoría de poliestireno-divinilbenceno conocidas como resinas de intercambio iónico (Pérez et al., 2006).



CAPITULO III



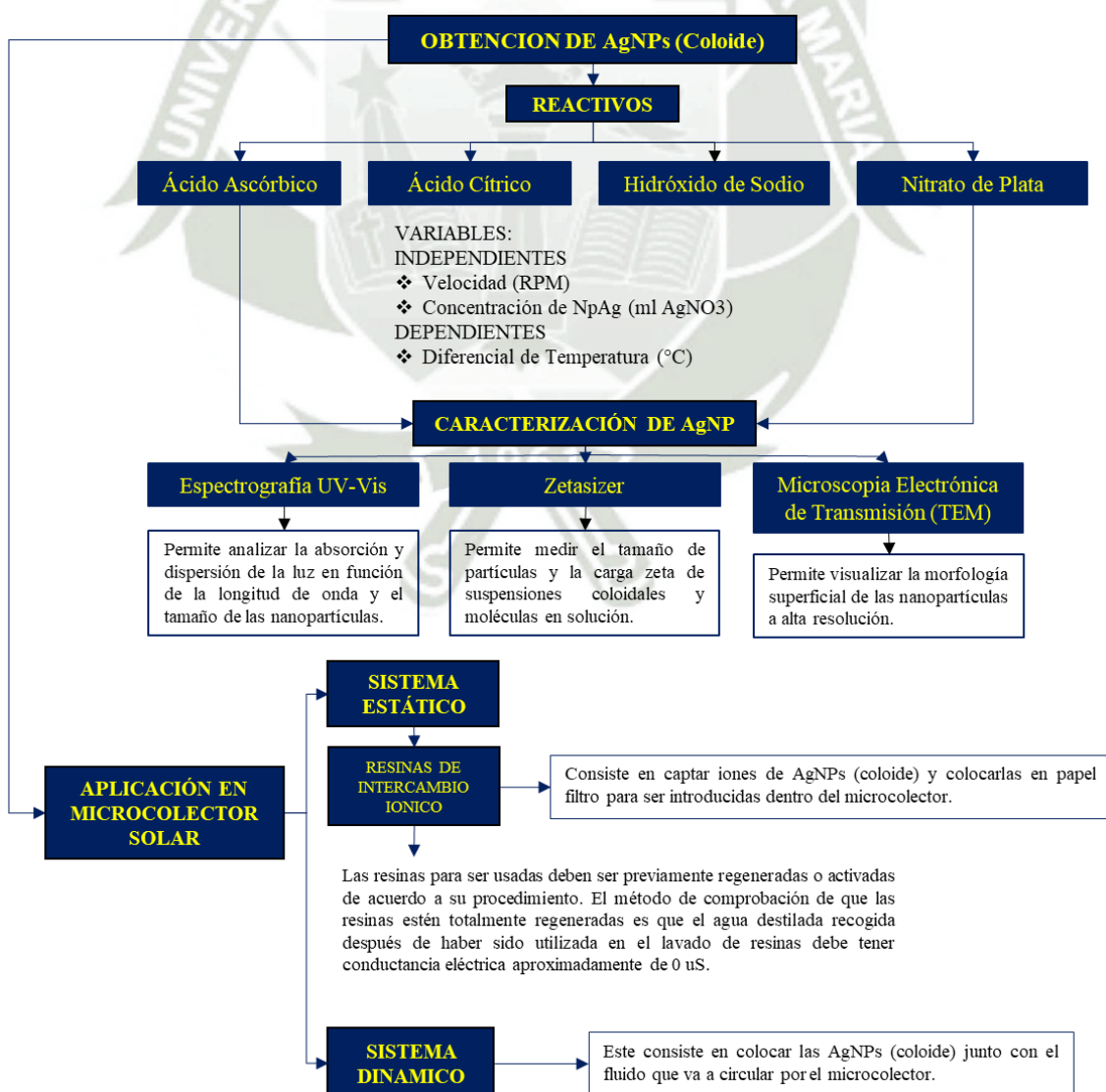
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el método de obtención de nanopartículas de plata por métodos químicos, técnica especializada para obtener partículas de plata a escala nano. Además, para caracterizar el nanoparticulado resultante, se utiliza en este trabajo el método de espectrografía UV-visible, zetasizer y microscopia electrónica de transmisión. Lo que se pretende evaluar con la caracterización del nanoparticulado es el tamaño de estas, así como la composición de nanopartículas de plata, que determinan la composición porcentual en las nanopartículas.

Se desarrolló un mapa general que nos ayudara a seguir la secuencia dada en este trabajo, tal como se ve en la Figura 3.1.

Figura 3. 1.
Metodología del proyecto de tesis



Finalmente, se verá la aplicación de estas nanopartículas obtenidas en un microcolector solar bajo dos sistemas, estático con ayuda de resinas captadores de iones nanoplatea como dinámico por medio de la formación de nanofluidos. Dentro de esta aplicación, se evaluará el diferencial de temperatura entrante y saliente para ver y evaluar el efecto plasmónico generado a través del uso de nanopartículas de plata.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. Materiales y Reactivos

- Ácido Cítrico ($C_6H_8O_7$ $2,781 \times 10^{-3}$ M)
- Ácido Ascórbico ($C_6H_8O_6$ $4,635 \times 10^{-4}$ M)
- Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1 M)
- Nitrato de Plata ($AgNO_3$ 0,1 M)
- Ácido Clorhídrico (HCl 0,1 M)
- Envases de vidrio de 500 ml
- Matraz Erlenmeyer para destilación
- Embudo de porcelana Buchner
- Papel filtro marca Whatman
- Embudo de vidrio
- Vasos de precipitados de 50, 100 y 250 ml
- Pipetas graduadas de 1 y 10 ml
- Bombillas de succión
- Probeta graduada de 100 ml
- Tubos de ensayo graduados
- Agitadores de vidrio
- Caja de Petri
- Vidrio de reloj
- Gradillas
- Soporte Universal

3.2.2. Materiales y equipos

- Superficie Calefactora, marca IKA modelo C-Mag HP4.
- Termómetro digital casero para laboratorio, tipo lapicero.

- Balanza Analítica, marca RADWAG modelo AS 220.R2.
- Bomba de vacío de paletas rotativas 7,0 CFM, marca Supercool modelo 0.25 HP.
- Medidor de sobremesa (pH, Conductividad), marca Oakton modelo PC2700.
- Espectrofotómetro UV-Vis, marca ThermoScientific modelo Genesys 150.
- Zetasizer Nano-ZS, marca Malvern modelo ZEN 3600.
- Microscopio electrónico de transmisión, marca JEOL modelo JEM-2010.
- Resina Aniónica Grado Ind. Monoplus M600, marca Lewatit.
- Resina Catiónica Grado Ind. Monoplus S108, marca Lewatit.
- Microcolector Solar bajo diseño propio a base de material teflón sólido.
- Termistor PT100 3x30mm de 2 cables marca WZP.
- Microcontrolador, marca ARDUINO modelo UNO.
- Módulo Transmisor MAX31865 para sensores de temperatura RTD PT100.
- Cables de conexión para circuitos electrónicos.
- Protoboard 830, marca WESTOR.
- Laptop portátil para toma de datos de temperatura con conexión entrada USB.
- Bomba Peristáltica, marca LongerPump modelo BT100-2J.
- Simulador Solar, marca SCIENCETECH modelo SciSun-300.

3.3. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION

Efectivamente, la naturaleza de la investigación es experimental, ya que se manipulan deliberadamente las variables independientes para estudiar su efecto en una variable dependiente. Esto permite establecer relaciones de causa-efecto, que son el objetivo de la investigación experimental.

El nivel de la investigación es explicativo, ya que se busca explicar las causas o factores que determinan un fenómeno. Esto se logra mediante la manipulación de variables y el análisis de los resultados obtenidos.

3.4. METODOS DE INVESTIGACION

El método experimental porque se manipularán deliberadamente una o más variables independientes para observar los efectos en una variable dependiente, controlando otros factores, en este caso, se manipuló deliberadamente las variables independientes (velocidad de flujo, concentración de AgNP) para estudiar su efecto en la variable dependiente (diferencial de temperatura). A la vez, se utiliza el método cuantitativo porque la investigación se centra en

la recopilación y análisis de datos numéricos para comprender fenómenos, establecer patrones y relaciones, y realizar inferencias generalizables sobre una población, es por ello que sobre un conjunto de datos numérico extenso se muestra valores específicos representativos.

3.4.1. Variables independientes

- X1: Velocidad de flujo (RPM)
- X2: Concentración de AgNP (ml AgNO₃)

3.4.2. Variables dependientes

- Y1: Diferencial de temperatura (°C)

Tabla 3. 1.
Variables independientes

VARIABLES	NIVELES			
Velocidad de flujo (RPM)	25	50	75	100
Concentración de AgNP (ml)	0,1	0,2	0,3	

3.4.3. Número de ensayos

La Tabla 3.2 presenta el total de ensayos a realizar, con sus respectivas codificaciones a fin de facilitar su interpretación.

Estas codificaciones van a variar en la parte de resultados, específicamente en el análisis del efecto plasmónico en el punto 4.2., donde estos de ensayos se tomarán por grupos, es decir las codificaciones E1-025, E1-050, E1-075 y E1-100, son asignadas al GRUPO E1, para las codificaciones E2-025, E2-050, E2-075 y E2-100, son asignadas al GRUPO E2, finalmente E3-025, E3-050, E3-075 y E3-100, son asignadas al GRUPO E3.

Tabla 3. 2.
Codificación de ensayos

N°	Codificación	Velocidad de flujo (RPM)	Concentración de AgNP (ml)
1	E1-025	25	0,1
2	E1-050	50	0,1
3	E1-075	75	0,1
4	E1-100	100	0,1
5	E2-025	25	0,2
6	E2-050	50	0,2
7	E2-075	75	0,2
8	E2-100	100	0,2
9	E3-025	25	0,3
10	E3-050	50	0,3
11	E3-075	75	0,3
12	E3-100	100	0,3

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACION DE DATOS

3.5.1. Síntesis de nanopartículas de plata

Las nanopartículas de plata fueron preparadas por el método de reducción química en presencia de la disminución de iones de plata a cero átomos de platavalentes, para que finalmente estos átomos de plata se auto ensamblen en nanoestructuras (1 a 100 nm). Según la lista de reactivos mencionados anteriormente, el nitrato de plata (AgNO_3) se utilizó como el precursor de plata, el ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) se utilizó como agente reductor y el ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) como agente estabilizador.

Para la elaboración de las soluciones, se manipuló los parámetros de reacción como la cantidad de precursor de plata AgNO_3 , además el pH fue una variable para investigar su influencia en el tamaño y forma de las nanopartículas de plata. La siguiente tabla 3.4. resume el proceso de síntesis de nanopartículas de plata para las soluciones que se elaboraron bajo la manipulación de los parámetros mencionados, mostrados en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3.

Soluciones elaboradas por variación de Nitrato de Plata y pH.

ID de Solución	Ác. Ascórbico (ml)	Ác. Cítrico (ml)	Nitrato de Plata (ml)	pH
SP01	10	10	0,1	10,5
SP02	10	10	0,2	5,5
SP03	10	10	0,2	6,0
SP04	10	10	0,2	8,0
SP05	10	10	0,2	9,5
SP06	10	10	0,2	10,0
SP07	10	10	0,2	10,5
SP08	10	10	0,3	10,5
SP09	10	10	0,4	6,0
SP10	10	10	0,4	10,5

Nota: Elaboración Propia. La fila sombreada en azul hace referencia a la solución con las cantidades estándar de sintetización.

Figura 3. 2.

Formación de nanopartículas de plata



Tabla 3. 4.
Metodología de Síntesis de nanopartículas de plata

<i>Etapas</i>	<i>Descripción</i>
Añadir ácido ascórbico	Medir $10 \pm 0,1$ ml de ácido ascórbico $C_6H_8O_6$ de molaridad $4,635 \times 10^{-4}$ M y añadirlo en un vaso de precipitados.
Añadir ácido cítrico	Medir $10 \pm 0,1$ ml de ácido cítrico $C_6H_8O_7$ de molaridad $2,781 \times 10^{-3}$ M y añadirlo en el mismo vaso de precipitados.
Añadir hidróxido de sodio	Agregar una cantidad de solución de hidróxido de sodio NaOH de molaridad 0,1 M hasta llegar al valor del pH requerido para la solución a preparar, tener en cuenta un error de medición de $\pm 0,1$ ml.
Agitar mezcla	Se procede a agitar la mezcla en una superficie calefactora a $30 \pm 1^\circ C$ durante 30 minutos.
Añadir solución de nitrato de plata	Finalizado el tiempo se añade la cantidad fijada de nitrato de plata $AgNO_3$ a una molaridad de 0,1 M.
Agitar mezcla	Finalmente, se deja continuar agitando a la misma temperatura ($30^\circ C$) por 15 minutos que debe ser el mismo tiempo donde se observe que la coloración deje de cambiar.
Almacenar	Almacenar en un recipiente de 25 ml como mínimo de capacidad en un ambiente seco donde no haya incidencia de la iluminación solar.

Nota: Diversos cambios de color pueden observarse durante la reacción. Así, por ejemplo, a los pocos minutos de reacción puede adquirir un color amarillo, que cambia a naranja y finalmente un rojo oscuro en pocos minutos. Tener en consideración que por lo menos los 2 o 3 últimos minutos de los 15 minutos de reacción una vez añadido el nitrato de plata la coloración deja de cambiar y se estabiliza. Estos colores son indicativos de formación de nanopartículas de plata, tal como se observa en la Figura 3.2.

Cálculos para preparación de soluciones

- Ácido Cítrico al $2,781 \times 10^{-3}$ M: Disolver 267,15 mg de ácido cítrico en 0,5 L de agua destilada, $[PM = 192,124 \text{ g/mol}]$

$$M = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{litros de solución}}$$

$$\frac{2,781 \times 10^{-3} \text{ moles}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 1,3905 \times 10^{-3} \text{ moles}$$

$$m = n \times PM$$

$$m = 1,3905 \times 10^{-3} \text{ moles} \times 192,124 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 267,15 \text{ mg}$$

- Ácido Ascórbico al $4,635 \times 10^{-4}$ M: Disolver 40,82 mg de ácido ascórbico en 0,5 L de agua destilada, $[PM = 176,12 \text{ g/mol}]$

$$\frac{4,635 \times 10^{-4} \text{ moles}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 2,3175 \times 10^{-4} \text{ moles}$$

$$m = 2,3175 \times 10^{-4} \text{ moles} \times 176,12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 40,82 \text{ mg}$$

- Hidróxido de Sodio al 0,1 M: Disolver 2,0 g en 0,5 L de agua destilada, $[PM = 39,997 \text{ g/mol}]$

$$\frac{0,1 \text{ moles}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 0,05 \text{ moles}$$

$$m = 0,05 \text{ moles} \times 39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 2,00 \text{ g}$$

- Nitrato de Plata 0,1 M: Disolver 8,49 g de nitrato de plata en 0,5 L de agua destilada, $[PM = 169,87 \text{ g/mol}]$

$$\frac{0,1 \text{ moles}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 0,05 \text{ moles}$$

$$m = 0,05 \text{ moles} \times 169,87 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 8,49 \text{ g}$$

De esta síntesis y con el soporte de las caracterizaciones posteriores, se identificó algunas variables importantes para el presente trabajo, como:

- ✓ pH: Mientras el pH es menor el diámetro de partícula de plata disminuye, sin embargo, el tamaño poblacional de la muestra deja de ser uniforme, formándose partículas en diámetros mayores a 100 nm.
- ✓ Concentración de AgNP: En cuanto a la concentración de nanopartículas de plata bajo la cantidad añadida de nitrato de plata AgNO_3 , mientras se agrega mayor cantidad de nitrato el diámetro de partícula aumenta, sin embargo, el tamaño poblacional de la muestra deja de ser uniforme, formándose partículas en diámetros mayores a 100 nm. Además, en el rango de aplicación de 0,1 – 0,3 ml de nitrato de plata el diámetro de partícula aún permanece en el rango nanométrico de 0 a 100 nm.
- ✓ Tiempo de reacción de nitrato de plata: Mientras el tiempo de reacción es menor el diámetro de partícula disminuye, sin embargo, el tamaño poblacional de la muestra deja de ser uniforme y aparecen partículas de diferentes diámetros inclusive más del 50% de la población resulta ser mayor a 100 nm de diámetro. Se evidencia que el tiempo óptimo de reacción es de 15 minutos.

3.6. CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA

Todas las muestras elaboradas pasaron por 3 medios de caracterización, Espectrografía UV-Vis, zetasizer y Microscopia Electrónica de Transmisión (TEM).

3.6.1. Espectroscopia UV-visible

La técnica de caracterización mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis) fue proporcionada por el espectrofotómetro UV-Vis Marca ThermoScientific, modelo Genesys 150, equipo perteneciente a uno de los laboratorios de investigación de la UCSM, se puede observar dicho equipo en la Figura 3.3. Este equipo proporciona información sobre el entorno de las especies metálicas presentes en el material, siempre que éstas presenten transiciones entre niveles moleculares separados por energías del orden de la región UV y/o visible de la radiación electromagnética.

Las capacidades de análisis regularmente dependen del estado físico del material, por ejemplo, para las medidas típicas para muestras sólidas se utiliza reflectancia especular y para

las medidas en muestras líquidas se utiliza comúnmente la transmitancia y absorbancia. El procedimiento para la caracterización por espectroscopia UV visible se observa en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5.

El procedimiento la caracterización de espectroscopia UV visible

<i>Etapas</i>	<i>Descripción</i>
Identificación de solución AgNP	Se debe reconocer la solución de nanopartícula de plata a caracterizar, es recomendable rotular la solución aclarando parámetros importantes de su preparación.
Disolver la solución	Se toma una pequeña cantidad de la muestra y se vierte en un tubo de ensayo, a continuación, se disuelve la solución con agua destilada siguiendo la siguiente proporción: <i>2 ml solución AgNP ----- 8 ml agua destilada</i> Por lo general, la cantidad mínima necesaria de muestra ya disuelta para caracterizar es de 10 ml.
Hacer uso del equipo	Se hace uso del equipo de espectroscopia siguiendo el procedimiento de este (inicialmente indicar el rango de longitud de onda a ver, hacer una muestra en blanco y luego con la solución disuelta). No olvidar guardar los resultados obtenidos.

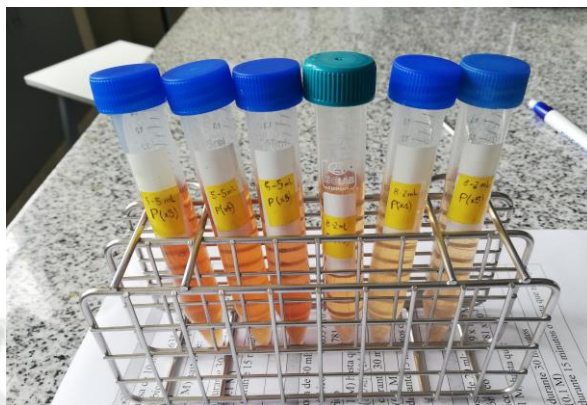
Figura 3. 3.

Equipo de espectrofotometría UV-Vis, marca ThermoScientific modelo Genesys 150



Figura 3.4.

Muestras en tubo de ensayo diluidas en agua destilada para espectrofotometría



3.6.2. Zetasizer

Este es un instrumento de medición que se utiliza para medir el tamaño de partículas y la carga eléctrica (potencial zeta) de las mismas en una solución. Esta técnica fue desarrollada por medio del ZetaSizer Nano-ZS, marca Malvern modelo ZEN 3600, equipo perteneciente a uno de los laboratorios de investigación de la UCSM, se puede observar dicho equipo en la Figura 3.5. Para ello se siguió el siguiente procedimiento, en la Tabla 3.6.

Tabla 3. 6.

Procedimiento para el uso de Zetasizer

<i>Etapas</i>	<i>Descripción</i>
Identificación de solución AgNP	Se debe reconocer la solución de nanopartícula de plata a caracterizar, es recomendable rotular la solución aclarando parámetros importantes de su preparación.
↓ Disolver la solución	Se toma una pequeña cantidad de la muestra y se vierte en una probeta, a continuación, se disuelve la solución con agua destilada siguiendo la siguiente proporción <i>2 ml solución AgNP ----- 8 ml agua destilada</i> Por lo general, la cantidad mínima necesaria de muestra ya disuelta para caracterizar es de 10 ml.
↓ Hacer uso del equipo	Se hace uso del zetasizer siguiendo el procedimiento de este (inicialmente hacer las configuraciones respectivas en la PC, proceder a realizar la muestra en dos partes). No olvidar guardar los resultados obtenidos.

Figura 3.5.

ZetaSizer Nano-ZS, marca Malvern modelo ZEN 3600



3.6.3. Microscopia electrónica de transmisión (TEM)

El microscopio electrónico de transmisión TEM por sus siglas en inglés (transmission electron microscope) se utilizó de la Universidad de Brasil, marca JEOL modelo JEM-2010 este se usó con el objeto de obtener la morfología de las nanopartículas de plata. La imagen es formada por el barrido del haz de electrones que incide sobre la muestra. Recolectando alguna señal de interacción entre el haz y la muestra, la señal es usada para el control de la intensidad del diámetro del haz de electrones con ayuda de un monitor de video, que escanea en sincronización con el haz. Un TEM típico se ve en la Figura 3.6. está compuesto por cada una de las partes visualizadas (Mastranzo, 2017).

Figura 3. 6.

Microscopio electrónico de transmisión TEM



Nota: (Mastranzo, 2017)

3.7. APLICACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA EN MICROCOLECTOR SOLAR

Las nanopartículas de plata elaboradas fueron aplicadas al microcolector para realizar el estudio del efecto plasmónico, asimismo esta aplicación se ha manejado bajo dos sistemas:

- Sistema Dinámico, en este caso el fluido que circulará por el microcolector forma una mezcla con una solución de AgNP bajo una proporción determinada formando lo que comúnmente es conocido como nanofluido.
- Sistema Estático, en este caso se hace uso de resinas de intercambio iónico tipo aniónicas (previamente regeneradas) para capturar los iones nanoplata procedente de las AgNP contenidas en las diferentes soluciones elaboradas, con ello se procede a formar pequeños empaques de estas resinas captadoras de AgNP, dichos empaques se sitúan dentro del microcolector en el área que será sometida al impacto de radiación del simulador solar.

3.7.1. Aplicación de AgNP en microcolector solar bajo Sistema Dinámico

En este sistema se genera un nanofluido con la solución AgNP a analizar y el fluido a circular establecido que en este caso se trata del agua destilada, para todos los casos a estudiar se maneja la misma proporción de mezcla: 2 ml de solución AgNP – 8 ml de agua destilada. Cabe mencionar que esta proporción es la misma que se siguió en los procedimientos de caracterización mencionados anteriormente.

Figura 3. 7.

Aplicación de AgNP en microcolector bajo Sistema Dinámico



3.7.2. Aplicación de AgNP en microcolector solar bajo Sistema Estático

A. Procedimiento de regeneración de resinas de intercambio iónico

De los antecedentes bibliográficos encontrados, se puede apreciar que para las resinas de intercambio iónico, tanto aniónicas como catiónicas; se debe tener la consideración por la regeneración previa a su aplicación, para ello cada una debe seguir un procedimiento muy similar para su correcta activación y así poder realizar su función de intercambio iónico.

Tabla 3. 7.
Procedimiento para la regeneración de resinas

<i>Etapas</i>	<i>Descripción</i>
Lavado de resinas	Se agrega cierta cantidad de resina de intercambio iónico a regenerar dentro de un embudo Buchner sobre un papel filtro, se procede a lavar con agua destilada y se filtra de manera natural sin hacer uso de la bomba de vacío, por medio del papel filtro se logran retener las resinas. (Se recomienda realizar hasta 3 enjuagues con agua destilada). Como se ve en la Figura 3.8.
Añadir solución de activación	Se debe añadir solución de activación para cada resina: → Solución HCl 1 M para resina catiónica → Solución NaOH 1,5 M para resina aniónica Para este caso no se debe utilizar la bomba de vacío, se debe dejar que las soluciones de activación se filtren hacia el matraz de manera natural.
Lavado y filtrado	Una vez aplicada la solución de activación para cada tipo de resina se prosigue lavando la resina nuevamente con agua destilada y filtrar haciendo uso de la bomba de vacío, se debe hacer la cantidad de lavados suficiente hasta que el valor de la conductividad eléctrica del agua filtrada sea muy cercana a 0 μ S como se ve en la Figura 3.11. Por lo experimentado caso se recomienda realizar hasta de 12 a 15 enjuagues con agua destilada.
Almacenamiento	Se procede a retirar la resina lavada contenida en el papel filtro y se debe llevar a un recipiente para ser almacenado. Es importante que la resina guarde cierta humedad para no perder su eficacia de intercambio de iones, para ello se debe almacenar con unas cuantas gotas de agua destilada.

Por otra parte, es importante comprobar la correcta regeneración de resinas, para ello se hace uso del equipo medidor de sobremesa, que más allá de medir el pH también indica el valor de la conductividad eléctrica en μS (microsiemens), como se vio en la Tabla 3.7 el valor de conductividad eléctrica del agua utilizada para lavar las resinas debe ser muy cercano a 0 μS .

Figura 3. 8.

Pesado y lavado de resina a regenerar



Nota: En la imagen izquierda se visualiza el pesado de resina catiónica y en la imagen derecha resina aniónica sobre papel filtro dentro de un embudo Buchner.

Figura 3. 9.

Mezcla de resina con su respectiva solución de activación



Nota: En la imagen, en el vaso izquierdo se tiene resina aniónica con solución NaOH 1,5M, en el vaso derecho se tiene resina catiónica con solución HCl 1M.

Figura 3. 10.
Lavado y filtrado de resina a regenerar



Figura 3. 11.
Medición de conductividad para comprobación de regeneración de resina

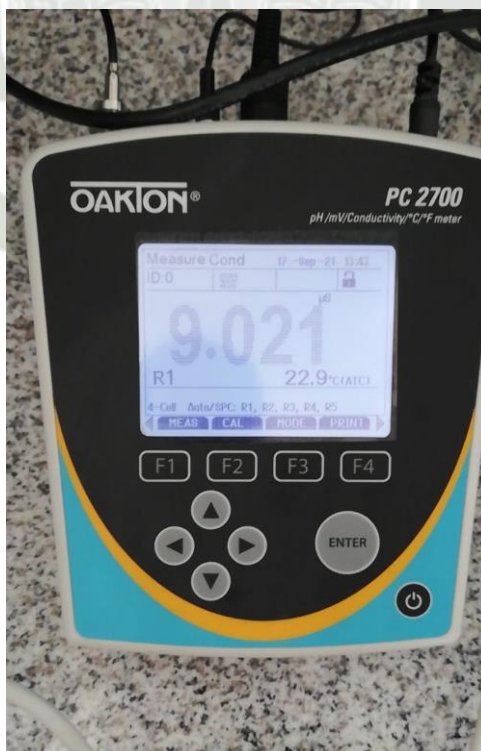


Figura 3. 12.

Almacenamiento de resina regenerada



Cálculos para preparación de soluciones

- Ácido Clorhídrico al 1 M: Disolver 18,23 g de ácido clorhídrico en 0,5 L de agua destilada. [$PM = 36,458 \text{ g/mol}$]

$$M = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{litros de solución}}$$

$$\frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 0,5 \text{ moles}$$

$$m = n \times PM$$

$$m = 0,5 \text{ moles} \times 36,458 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 18,23 \text{ g}$$

- Hidróxido de Sodio al 1,5 M: Disolver 30 g en 0,5 L de agua destilada, [$PM = 39,997 \text{ g/mol}$]

$$\frac{1,5 \text{ moles}}{1 \text{ L}} = \frac{n}{0,5 \text{ L}}$$

$$n = 0,75 \text{ moles}$$

$$m = 0,75 \text{ moles} \times 39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 30,00 \text{ g}$$

3.7.3. Aplicación de resinas en el microcolector solar

Inicialmente se realizaron pruebas haciendo reaccionar soluciones de AgNP con ambos tipos de resinas, se observó que con las resinas catiónicas no se evidenciaba ninguna reacción debido a que la solución AgNP y las mismas resinas no presentaban ningún cambio en su coloración además que las resinas aún mantenían un valor de conductividad casi nulo; en

cambio, con las resinas aniónicas se evidenció inicialmente que la solución AgNP pierde totalmente su coloración adquiriendo un valor de conductancia prácticamente nulo, y que las resinas cambiaban su tonalidad naranja a una tonalidad ploma como se podrá apreciar en la Figura 3.13. Tener en consideración que el tiempo en el que se llega a realizar toda la reacción entre la solución y la resina es de aproximadamente 12 horas, en las primeras horas se irá viendo como la solución va perdiendo gradualmente su tonalidad.

Figura 3. 13.

Reacción de resinas de intercambio iónico con soluciones AgNP



Nota: En la imagen izquierda se aprecia la mezcla de resina catiónica con solución AgNP, tanto la solución como la resina no denotan algún cambio en su coloración. En la imagen derecha se aprecia la mezcla de resina aniónica con solución AgNP, la solución pierde totalmente su coloración tornándose transparente mientras las resinas dejan su tonalidad naranja y se vuelve ploma.

Finalmente, de acuerdo con lo mencionado para el microcolector solar se hizo uso de resinas tipo aniónicas, éstas son añadidas a la solución de AgNP a analizar, una vez que logran captar los iones de nanoplatea son contenidas en un paquete a base de papel filtro para ser introducidas dentro del microcolector solar como se ve en la Figura 3.14., cabe resaltar que para la muestra base se hizo uso de resina aniónica sin haber entrado en reacción con alguna solución AgNP.

Figura 3. 14.

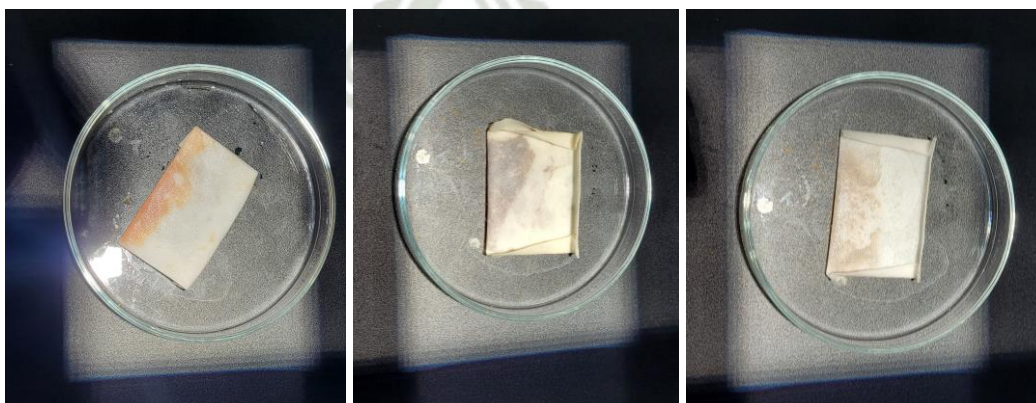
Aplicación de resina en el microcolector solar



Nota: Se visualiza todo el procedimiento que tiene que pasar la resina aniónica para su aplicación al microcolector solar, desde su estado inicial procede a ser regenerada, posteriormente se genera un paquete con la resina tal cual para ser la muestra base, después se procede a poner en reacción las resinas con las diferentes soluciones AgNP a analizar, se toma la resina portadora de los iones nanoplate para formar los respectivos paquetes.

Figura 3. 15.

Formación de empaques de resina aniónica para aplicación en microcolector solar



Nota: En la imagen izquierda se visualiza el paquete de lo que sería la muestra base (resina aniónica regenerada si AgNP), en la imagen central y derecha se visualizan paquetes de resina aniónica portadora de AgNP.

3.8. CONFIGURACIÓN DE CIRCUITO PARA ESTUDIO DE EFECTO PLASMÓNICO EN MICROCOLECTOR SOLAR

3.8.1. Diseño de Microcolector Solar

Para el diseño del microcolector solar se tuvo en consideración los siguientes criterios:

Material: Se requiere fabricar el microcolector con un material que por naturaleza no sea conductor del calor, para con ello evitar tergiversar los resultados del estudio del efecto plasmónico y finalmente mostrar el beneficio netamente de las AgNP.

Medidas: Es importante dimensionar el microcolector en concordancia al simulador solar a utilizar en el laboratorio, ya que el área donde se dará la transferencia de calor dentro del microcolector tiene que ser muy similar al área objetivo que ofrece la lámpara del simulador solar.

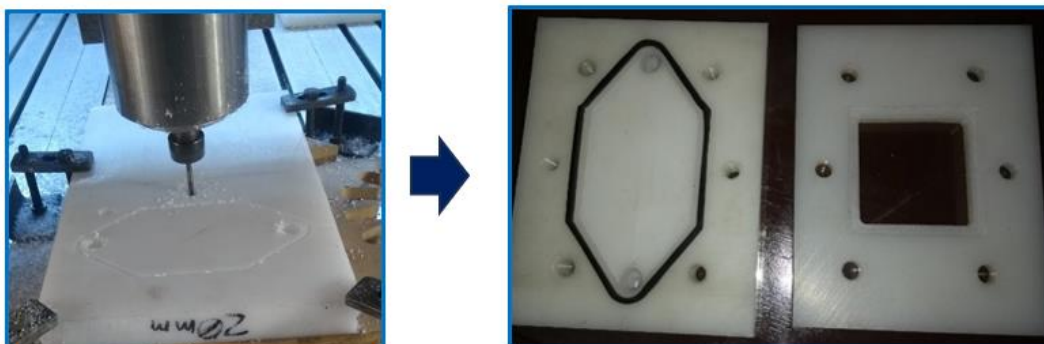
Hermeticidad: Para obtener resultados confiables el área donde se desarrollará la transferencia de calor debe estar lo más aislado posible para evitar tanto la entrada como salida de energía térmica.

Monitoreo: Se requiere que el microcolector disponga de un punto de toma de temperatura tanto al ingreso como a la salida de la zona de transferencia de calor, teniendo en consideración además el criterio anterior de hermeticidad se debe considerar que estos puntos deben estar dimensionados exactamente tal cual a la medida de los instrumentos a utilizar para la medida de temperatura.

En base a lo mencionado, como se observa en la Figura 3.16. se realizó el diseño de un microcolector a base de teflón sólido con una región de transferencia de calor de 50 cm x 50 cm.

Figura 3. 16.

Diseño de microcolector solar



Nota: En el Anexo 1 se muestra los planos elaborados para el diseño del microcolector.

3.8.2. Procedimiento para medición de diferencial de temperatura

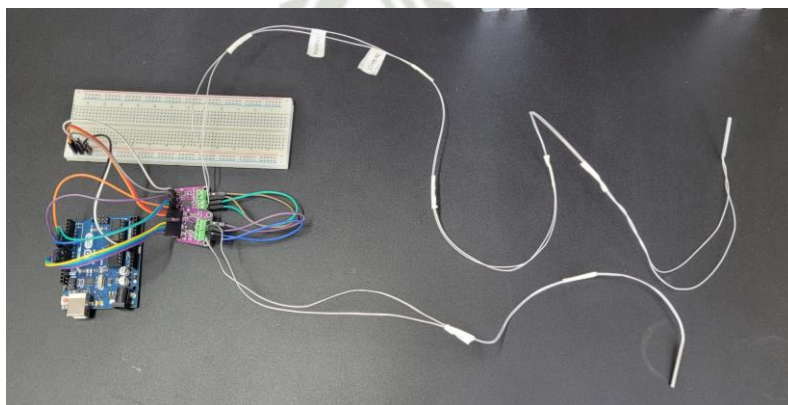
Se realizó la configuración para un sistema de medición precisa de temperatura, para ello se hizo uso de detectores de temperatura de resistencia (RTD) que consisten básicamente en un sensor que logra medir la temperatura de una región en específico, está compuesto por una resistencia que cambia de valor a medida que cambia el valor de la temperatura. Se hizo uso de dos termo resistores PT100 que son sensores compuestos por una resistencia en forma de pequeña lámina de platino con valor de 100 ohmios a una temperatura de 0°C.

No obstante, para lograr la precisión y la exactitud de estos sensores, es necesario utilizar un amplificador específicamente diseñado para detectar bajas resistencias, para ello se hace uso de transmisores MAX31865 de sensores RTD. Estos módulos transmisores tendrán la función de leer la resistencia de los sensores PT100 y convertir esas lecturas en una señal digital que puede ser interpretada por un microcontrolador, en este caso se hizo uso de un microcontrolador ARDUINO modelo UNO que finalmente por medio de la conexión de un cable USB Arduino la información tomada por los sensores es llevada digitalmente y en tiempo real a una computadora portátil.

Cabe indicar que se requirió de la realización de un código de programación en el software de ARDUINO para la correcta transmisión de información proveniente de los termo resistores PT100, en el Anexo 2 se muestra el código completo de ARDUINO que fue realizado con la ayuda de las librerías existentes en dicho software.

Figura 3. 17.

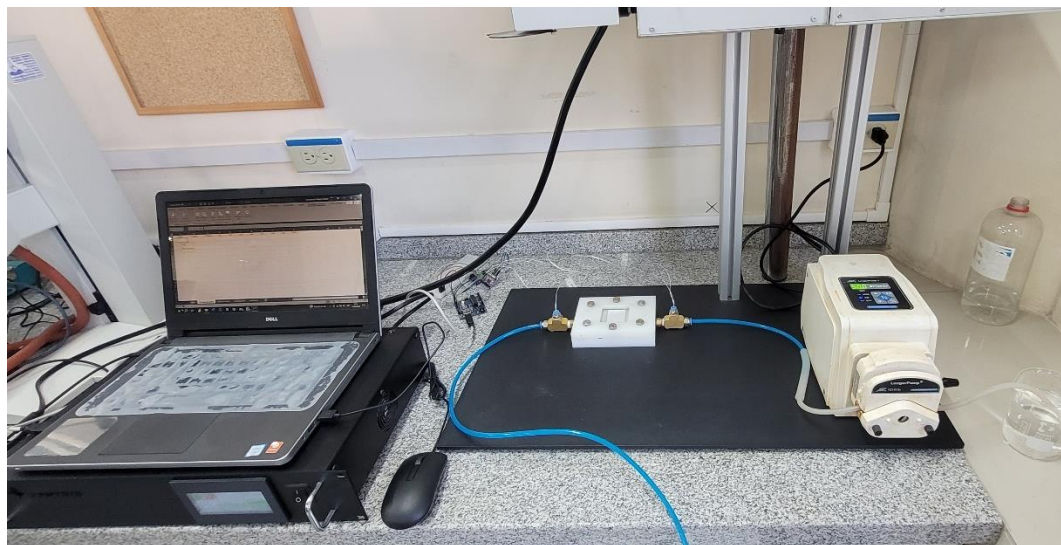
Circuito para medición de temperatura



Nota: En la imagen se puede apreciar en el lado izquierdo en color azul el microcontrolador ARDUINO modelo UNO, se encuentra conectado a un Protoboard y a ambos módulos transmisores MAX31865 que son las placas en color morado, finalmente estos se encuentran acoplados a los termo resistores RTD PT100.

Figura 3. 18.

Arreglo final de sistema de medición de temperatura



3.8.3. Regulación de velocidad de fluido en microcolector solar

Para poder tener control de la velocidad con la que circula el fluido dentro del circuito del microcolector solar se hizo uso de una bomba peristáltica con cabezal de bomba de precisión de laboratorio con rango de velocidad de 0,1 a 100 rpm como se ve en la Figura 3.19.

Figura 3. 19.

Bomba peristáltica para regulación de velocidad de flujo



3.8.4. Consideraciones para la realización de pruebas en microcolector solar

Para realizar la toma de datos que nos permitirán establecer los resultados, se tomaron las siguientes consideraciones:

- ✓ El circuito es abierto, esto quiere decir que el fluido que hace ingreso por la entrada del circuito no vuelve a ingresar, permanece y queda en la salida de este.
- ✓ De acuerdo con lo visto en el punto 3.9.3. para el circuito se tiene la posibilidad de regular la velocidad del fluido haciendo uso de la bomba peristáltica.
- ✓ Tanto para el sistema dinámico como estático, se realizó primeramente una muestra base o muestra en blanco, es decir, para el sistema dinámico se hizo circular agua destilada sin la adición de solución AgNP y para el sistema estático se hizo circular agua destilada sobre un paquete de resinas aniónicas sin iones nanoplate.
- ✓ La distancia entre el microcolector y la lámpara emisora del haz de luz del simulador es de 50 cm como se ve en la Figura 3.20, dicha distancia se mantuvo constante en la realización de todas las pruebas.
- ✓ Lo que se mide en el circuito es la diferencia o delta de temperatura, es decir la diferencia entre la temperatura de salida con la temperatura de entrada a la zona de transferencia de calor del microcolector.
- ✓ La toma de datos se realizó mediante dos termo resistores PT100 que tomaron valores de temperatura cada segundo. Cada ensayo tuvo una duración de 5 minutos, obteniendo así un total de 300 datos que finalmente son ponderados para establecer el valor de diferencial de temperatura.

Figura 3. 20.

Toma de lectura del diferencial de temperatura en circuito de microcolector solar





CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA (AgNPs)

La síntesis de nanopartículas de tamaño pequeño y uniforme sigue siendo un reto, por lo que este estudio tiene por objeto sintetizar nanopartículas pequeñas y uniformes.

Estas nanoestructuras presentan propiedades únicas debido a su gran relación superficie/volumen en comparación con los materiales a granel o las moléculas individuales en suspensión.

Las nanopartículas de plata se sintetizaron mediante una técnica química. A continuación, se determinaron las condiciones de reacción, incluidos el pH, cantidad de ácido cítrico, ascórbico y nitrato de plata para controlar el tamaño de las nanopartículas.

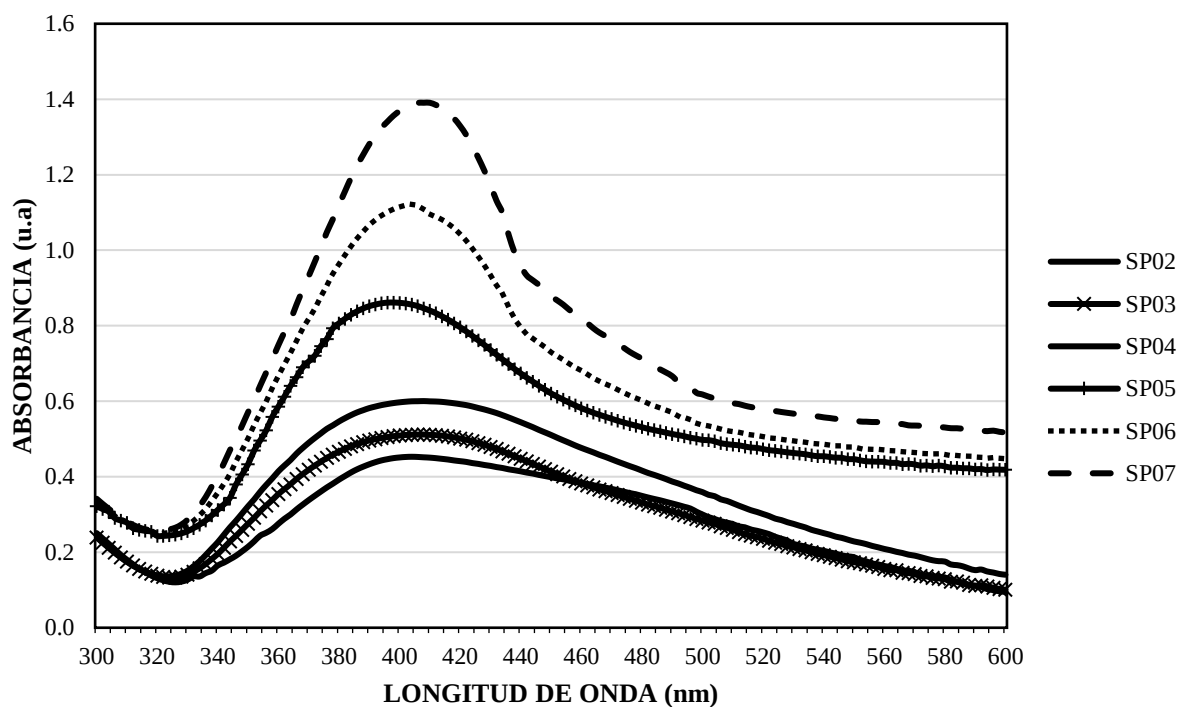
Este capítulo se divide en cuatro partes: En primer lugar, caracterizar las AgNPs obtenidas analizando los resultados del espectro ultravioleta-visible, en segundo mediante el uso de zetasizer y tercera mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) acompañado con espectroscopia de energía dispersiva (EDS).

4.1.1. Resultados de caracterización de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible

A. Efecto del pH

La Figura 4.1 muestra los espectros de absorción de las AgNPs en un rango de 300 a 600 nm. La onda que presenta la máxima intensidad de absorbancia alcanza un valor de 1,39 u.a. en la longitud de 408 nm, superando a las demás muestras. Estos datos corresponden a la muestra SP07, que tiene un pH de 10,5 y una concentración de 0,2 ml AgNO_3 . También se observa un desplazamiento hacia la derecha con longitudes de onda más largas, lo que indica un aumento del tamaño de la partícula. Este resultado es similar al obtenido por Sithole (2014), quien sintetizó nanopartículas de plata con ácido ascórbico, nitrato de plata y ácido cítrico. Al aumentar el pH de 6 a 10,5, el tamaño de las partículas aumentó de 31 nm a 73 nm.

Chen et al. (2015) también trabajó con los mismos rangos de longitud de onda para obtener AgNPs. Sin embargo, utilizó diferentes reactivos: citrato de sodio tribásico dihidratado, PVP, L-arginina y AgNO_3 . El resultado fue una absorbancia de 2,5 u.a. y un tamaño de partícula de 22,5 nm.

Figura 4. 1.
Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-Visible


La Tabla 4.1 muestra que la intensidad de absorbancia aumenta a medida que aumenta el pH. La muestra SP07 tiene el pH más alto y, por lo tanto, la mayor intensidad de absorbancia. Esto indica que SP07 es el mejor resultado, esta intensidad de absorbancia nos hace referencia a una cuantificación sobre la cantidad de luz que absorbe la muestra tratada.

Tabla 4. 1.
Resumen del efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible

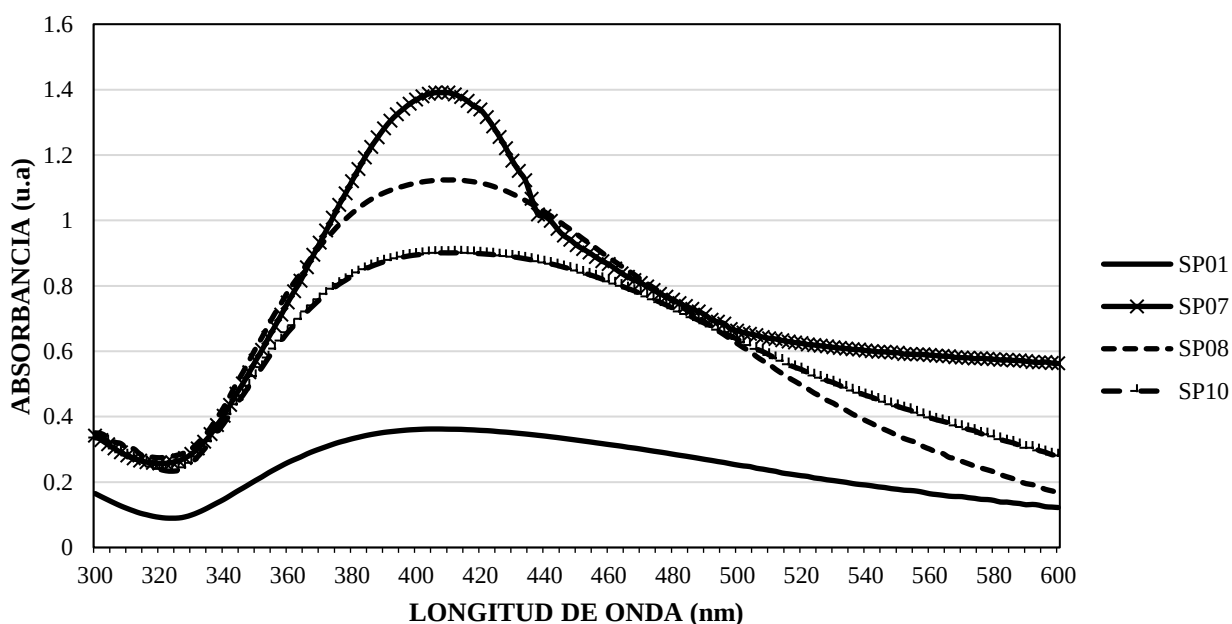
ID solución	pH	Conc. Ag (ml AgNO ₃)	λ máx. (nm)	Intensidad Absorbancia (u.a)
SP02	5,50	0,2	404	0,4528
SP03	6,00	0,2	408	0,5117
SP04	8,00	0,2	408	0,6004
SP05	9,50	0,2	398	0,8615
SP06	10,00	0,2	404	1,1214
SP07	10,50	0,2	408	1,3907

B. Efecto de concentración de plata

La Figura 4.2 muestra las absorbancias de las AgNPs que están en un rango de 300-600 nm. Se observa que la muestra SP07 presenta la mayor intensidad de absorbancia, con un valor de 1,3907 u.a, a una longitud de onda de 408 nm y una concentración de 0,2 ml AgNO_3 a comparación de las demás muestras.

Figura 4. 2.

Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible



El desplazamiento hacia la derecha de las curvas de dispersión con longitudes de onda más largas indica un aumento del tamaño medio de las partículas. En general, los datos de la Figura 4.2 y Tabla 4.2. indican que la muestra SP07 es la muestra más prometedora para la producción de nanopartículas de plata, ya que este valor de intensidad que logra alcanzar nos hace referencia a que cuantitativamente esta muestra logra absorber una mayor cantidad de luz en comparación a las demás.

Tabla 4. 2.

Resumen del efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Espectroscopia UV-visible.

ID Solución	Conc. Ag (ml AgNO ₃)	pH	λ máx. (nm)	Intensidad Absorbancia (u.a)
SP01	0,1	10,50	406	0,3623
SP07	0,2	10,50	408	1,3907
SP08	0,3	10,50	412	1,1238
SP10	0,4	10,50	414	0,9012

4.1.2. Resultados de caracterización de AgNPs usando Zetasizer

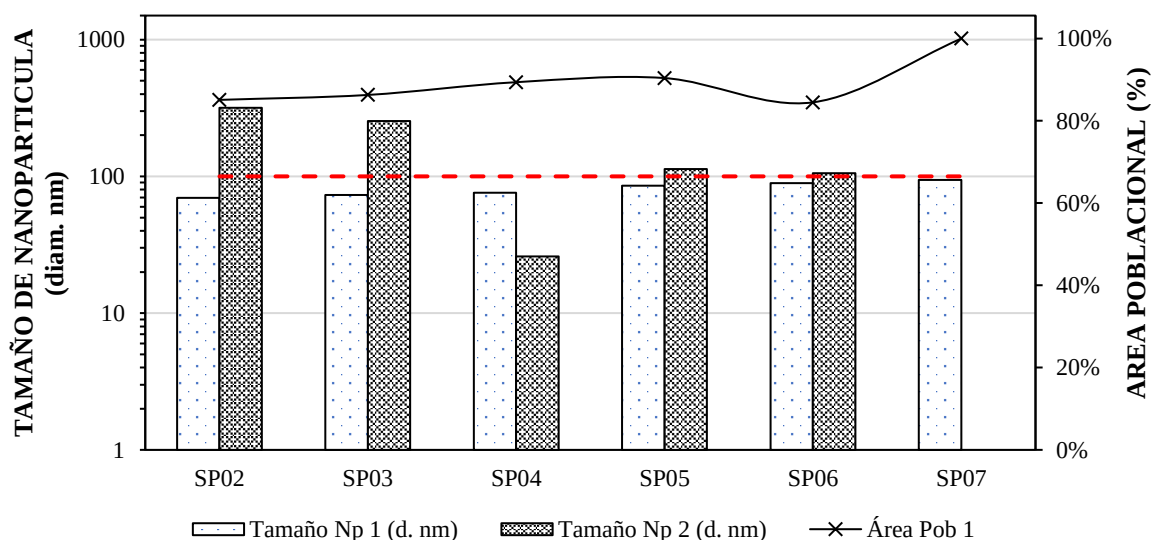
A. Efecto del pH

La Figura 4.3 muestra la influencia del pH en el tamaño y el área poblacional de las nanopartículas de plata. A medida que aumenta el pH, el tamaño de las nanopartículas también aumenta. Este aumento se debe a que las nanopartículas de plata más grandes (en un rango de 1-100nm) son más estables en condiciones más alcalinas.

La muestra SP07 tiene el mejor tamaño y área poblacional más uniforme de todas las muestras. Presenta un tamaño de nanopartícula de 94,02 nm y un área poblacional del 100%. Las demás muestras también tienen un área poblacional mayor al 50%. Sin embargo, existe el riesgo de que estas muestras contengan nanopartículas de tamaño fuera del rango de 1-100 nm.

Figura 4. 3.

Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Zetasizer



La Tabla 4.3 muestra la influencia del pH en el tamaño de las nanopartículas de plata. A medida que aumenta el pH, el tamaño de las nanopartículas también aumenta. La muestra SP07, con un pH de 10,5, presenta el tamaño de nanopartícula más grande de todas las muestras, con un valor de 94,02 nm. El área poblacional de esta muestra también es del 100 %, lo que indica que todas las nanopartículas tienen el mismo tamaño.

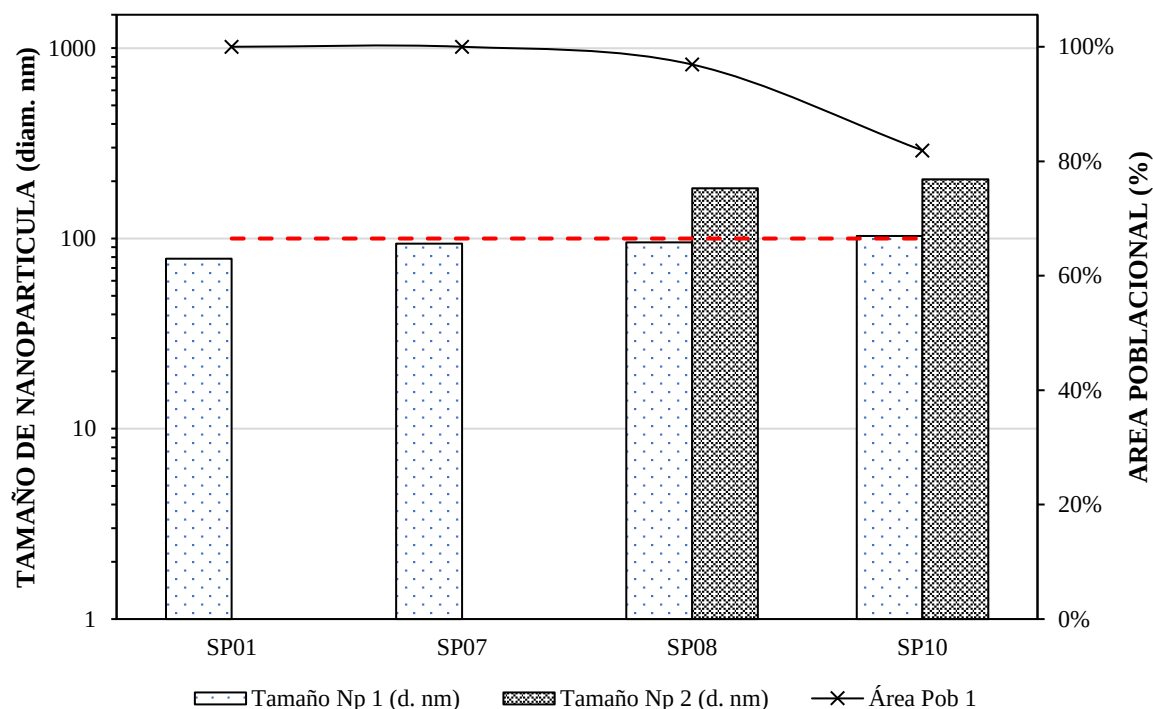
Se debe tener en cuenta que en todas las muestras se utilizó la misma cantidad de nitrato de plata, por lo que es al pH de 10,5 que se consigue la reducción completa de Ag^{+1} a Ag^0 de acuerdo con la síntesis química realizada. La uniformidad en la muestra hace referencia a que se tienen centros de nucleación muy similares, generando la posibilidad de contar con partículas de la misma forma y dimensión.

Tabla 4. 3.
Resumen del efecto del pH en la obtención de AgNPs usando Zetasizer

ID solución	pH	Conc. Ag (ml AgNO_3)	Tamaño Np 1 (d. nm)	Área Pob 1	Tamaño Np 2 (d. nm)	Área Pob 2
SP02	5,5	0,2	69,59	85,10%	317,29	14,90%
SP03	6,0	0,2	73,04	86,30%	254,36	13,70%
SP04	8,0	0,2	75,93	89,40%	25,98	10,60%
SP05	9,5	0,2	85,42	90,40%	113,35	9,60%
SP06	10,0	0,2	89,05	84,50%	105,73	11,20%
SP07	10,5	0,2	94,02	100,00%	0,00	0,00%

B. Concentración de Plata

La Figura 4.4 muestra la influencia de la concentración de nitrato de plata en el tamaño y área poblacional de las nanopartículas, mostrando que a mayor concentración se obtiene mayor tamaño pero con área poblacional menos uniforme. Las muestras SP01 y SP07, con concentraciones de 0,1 y 0,2 ml, respectivamente, presentan un área poblacional del 100 % y tamaños de partícula de 78,37 y 94,02 nm, respectivamente. La muestra SP10, con una concentración de 0,4 ml, supera el diámetro de nanopartículas de plata (1-100 nm), por lo que no se consideró en el diseño de ensayos posteriores.

Figura 4. 4.
Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Zetasizer


La Tabla 4.4 muestra que el diámetro de las nanopartículas es directamente proporcional a la concentración de nitrato de plata. A mayor concentración, mayor diámetro de las nanopartículas, asimismo respecto al área poblacional se ve que al aumentar la concentración, la población deja de ser uniforme ocasionado la aparición de una o más poblaciones de diferentes tamaños. Esto se fundamenta desde el punto de vista que al incrementar mayor cantidad de plata en la muestra, se incrementa la posibilidad de formar distintos tipos de nucleación que ocasionen diferentes tamaños de partículas no llegando a tener la certeza de que la población en su totalidad esté en la escala nanométrica.

Así como la muestra SP10, que con una concentración de 0,4 ml, supera el máximo permitido de rango por superar los 100 nm. Es por ello que para el estudio del efecto plasmónico se establece como rango adecuado de estudio respecto a la variación de concentración tomar los valores entre 0,1 y 0,3 ml de AgNO_3 .

Tabla 4. 4.
Resumen del efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando Zetasizer

ID solución	Conc. Ag (ml AgNO ₃)	pH	Tamaño Np 1 (d. nm)	Área Pob 1	Tamaño Np 2 (d. nm)	Área Pob 2
SP01	0,1	10,50	78,37	100,00%	0,00	0,00%
SP07	0,2	10,50	94,02	100,00%	0,00	0,00%
SP08	0,3	10,50	95,31	96,90%	183,57	3,10%
SP10	0,4	10,50	103,21	81,90%	204,82	12,00%

4.1.3. Resultados de caracterización de AgNPs en Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

A. Efecto del pH

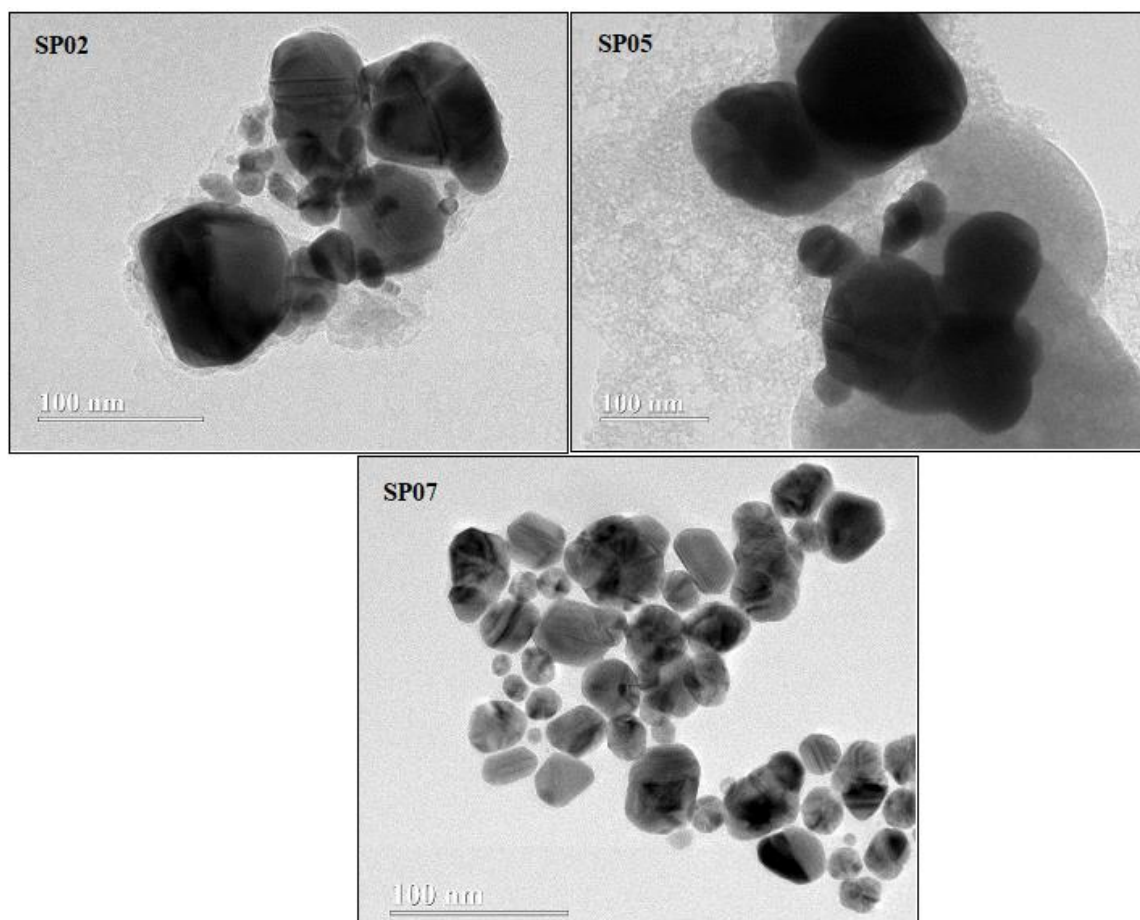
La Figura 4.5 muestra la morfología de las nanopartículas de plata de diferentes muestras. Las nanopartículas son esféricas o casi esféricas, lo que se debe al pH alcalino y a la presencia de un citrato como agente dispersante. Este último promueve la formación de nanopartículas de plata esféricas monodispersas.

Los estudios de Chen et al. (2015), Qin et al. (2010) y Sahoo et al. (2009) coinciden en que el pH alcalino (8,5-9) produce nanopartículas monodispersas más pequeñas a un ritmo más rápido que el pH ácido.

Las muestras SP02, SP05 y SP07 representan la influencia del pH. Las micrografías muestran que, a mayor pH, mayor es el diámetro de las nanopartículas de plata, tal como se observa la Figura 4.5. Se debe tener en cuenta que en todas las muestras se utilizó la misma cantidad de nitrato de plata, por lo que es al pH de 10,5 que se consigue la reducción completa de Ag⁺¹ a Ag⁰ de acuerdo con la síntesis química realizada. La uniformidad en la muestra hace referencia a que se tienen centros de nucleación muy similares, generando la posibilidad de contar con partículas de la misma forma y dimensión.

Figura 4. 5.

Efecto del pH en la obtención de AgNPs usando TEM



Nota: Las muestras presentan, diferentes pH, tal es el caso de la muestra SP02 presenta un pH de 5,5, mientras que la muestra SP05 tiene un pH de 9,5 y finalmente la muestra SP07 presenta un pH de 10,5. Todas las muestras mantienen constante la concentración de plata en 0,2 ml AgNO_3 .

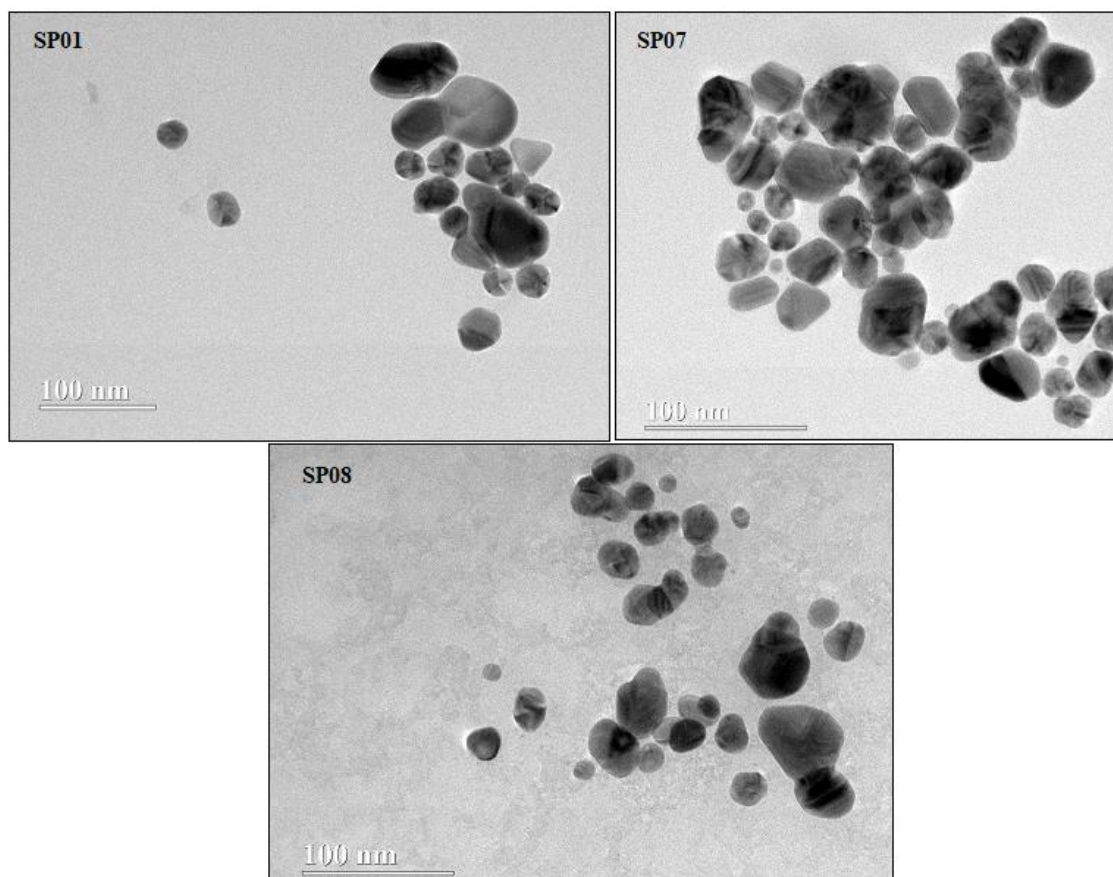
B. Efecto de la concentración

La influencia de la concentración de nitrato de plata en la morfología de las nanopartículas de plata presenta formas circulares regulares e irregulares, tal es el caso de las muestras SP01, SP07 y SP08. A mayor concentración, mayor diámetro de las nanopartículas, tal como se muestra en la Figura 4.6.

Esto se basa en la idea de que aumentar la cantidad de plata en la muestra aumenta la probabilidad de formar diferentes tipos de nucleación, lo que resulta en partículas de diferentes tamaños, y con ello no tener la certeza que la población total esté en el rango de tamaño nanométrico.

Figura 4. 6.

Efecto de la concentración en la obtención de AgNPs usando TEM



Nota: Las muestras presentan, diferentes concentraciones, tal es el caso de la muestra SP01 presenta una concentración de 0,1 ml de nitrato de plata, mientras que la muestra SP07 tiene una concentración de 0,2 ml de nitrato de plata y finalmente la muestra SP08 presenta una concentración de 0,3 ml de nitrato de plata. Todas las muestras mantienen constante el pH en 10,5.

Análisis de AgNPs usando Espectroscopia de Dispersión de Energía EDS

Este se midió con el objeto de determinar la composición elemental de una muestra. El EDS además es utilizado para medir la pureza y calidad de las nanopartículas de plata. Además, por medio de la relación de composición entre plata y cobre es posible comparar cuantitativamente las muestras analizadas.

Los espectros de EDS según la Figura 4.7 y 4.8 muestran una fuerte señal en la región de plata, con una banda de absorción óptica típica con un pico de 3 eV. También se observan señales de cobre (Cu) y silicio (Si). La presencia de cobre se debe a las rejillas de cobre recubiertas con una película de carbono que se utilizaron en el análisis. La presencia de silicio se debe al detector o a otras partes del microscopio que pueden haber sido emitidas por los rayos.

Sin embargo, existen otros factores que pueden afectar los resultados de los espectros de EDS, como:

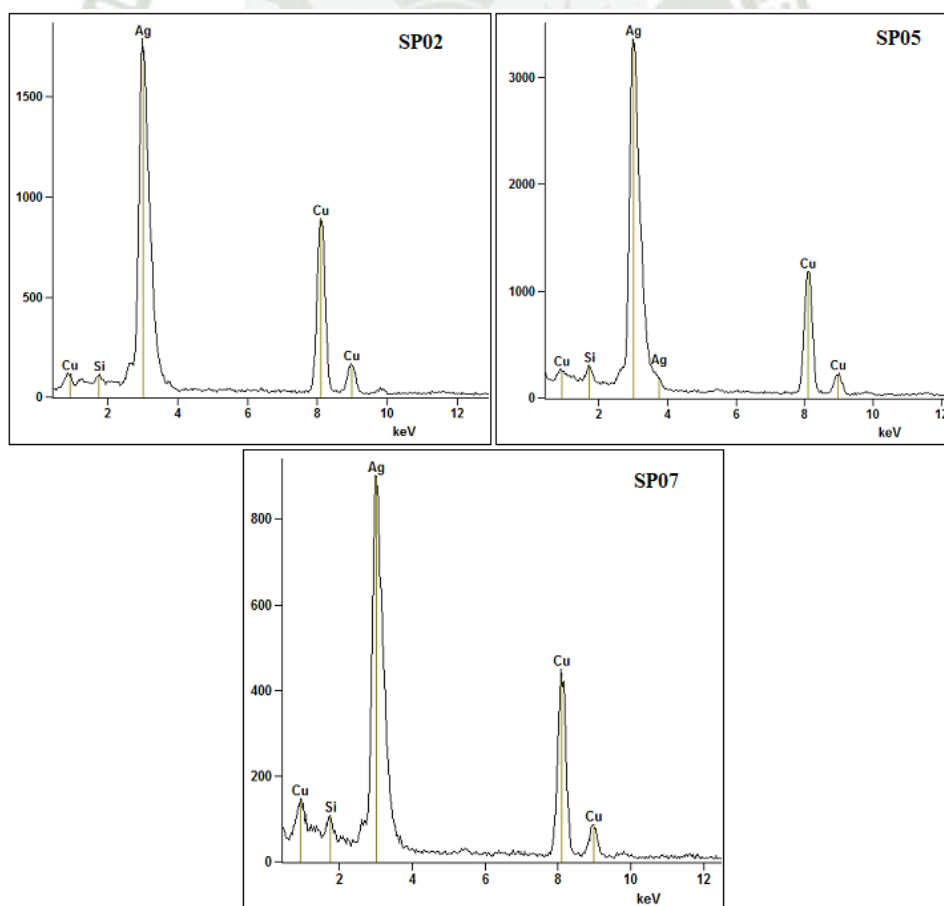
- Mala manipulación al momento de preservar las nanopartículas
- Envases no lavados correctamente
- Impurezas en los equipos utilizados

En investigaciones como Chen et al. (2015) y Sithole (2014) mostraron la presencia de plata con algunas impurezas propios de la preparación o soporte de las muestras.

A. Efecto del pH

En la Figura 4.7 confirman la presencia de nanopartículas de plata metálica en todas las muestras, para la muestra SP02 presenta un pH de 5,5, mientras que la muestra SP05 tiene un pH de 9,5 y finalmente la muestra SP07 presenta un pH de 10,5.

Figura 4. 7.
EDS de AgNPs según el pH



Nota: Las muestras presentan, diferentes pH, tal es el caso de la muestra SP02 presenta un pH de 5,5, mientras que la muestra SP05 tiene un pH de 9,5 y finalmente la muestra SP07 presenta un pH de 10,5. Todas las muestras mantienen constante la concentración de plata.

También se estudia la relación entre plata y cobre para comparar cuantitativamente estas 03 soluciones. De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 4.5 se observa que de las 03 muestras la que consigue elaborar una mayor cantidad de nanoparticulado es la muestra SP07 con un valor de pH de 10,5.

Tabla 4. 5.

Análisis de la relación Ag/Cu por el efecto de pH en la obtención de AgNPs

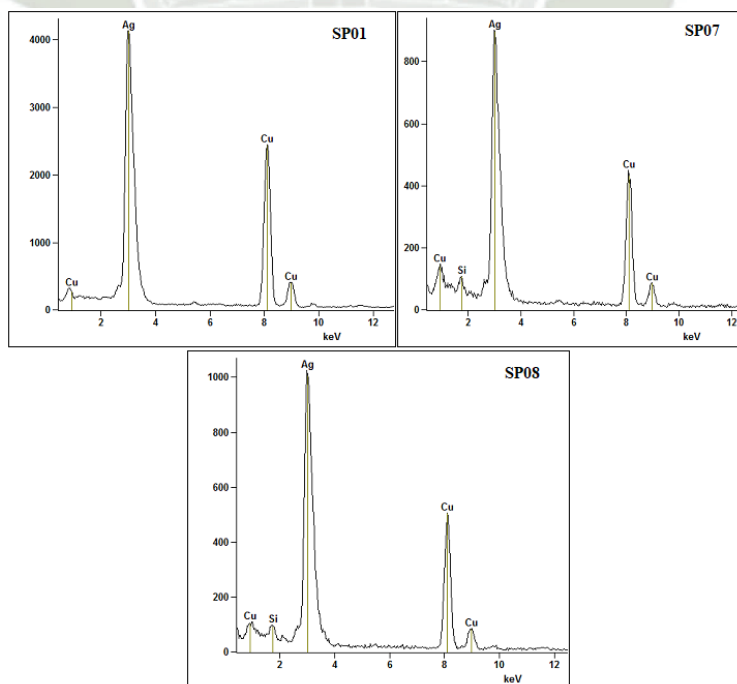
ID solución	pH	Conc. Ag (ml AgNO ₃)	CPS Ag	CPS Cu	Relación Ag/Cu
SP02	5,5	0,2	1875	875	2,14
SP05	9,5	0,2	3250	1400	2,32
SP07	10,5	0,2	980	420	2,33

B. Efecto de la concentración

La Figura 4.8 presenta una señal a 3 eV la presencia de plata metálica en todas las muestras, para la muestra SP01 con una concentración de 0,1 ml de nitrato de plata, mientras que la muestra SP07 y SP08 tienen una concentración de 0,2 y 0,3 ml de nitrato respectivamente.

Figura 4. 8.

EDS de AgNPs según la concentración



Nota: Las muestras presentan, diferentes concentraciones, tal es el caso de la muestra SP01 presenta una concentración de 0,1 ml de AgNO₃, SP07 0,2 ml AgNO₃ y SP08 con 0,3 ml AgNO₃.

También se estudia la relación entre plata y cobre para comparar cuantitativamente estas 03 soluciones. De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 4.6 se observa que de las 03 muestras la que consigue elaborar una mayor cantidad de nanoparticulado es la muestra SP07 con un valor de concentración de 0,2 ml de AgNO_3 .

Tabla 4. 6.

Análisis de la relación Ag/Cu por el efecto de pH en la obtención de AgNPs

ID solución	pH	Conc. Ag (ml AgNO_3)	CPS Ag	CPS Cu	Relación Ag/Cu
SP01	10,5	0,1	4200	2400	1,75
SP07	10,5	0,2	980	420	2,33
SP08	10,5	0,3	1100	480	2,29

4.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL EFECTO PLASMÓNICO DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA

Para realizar la evaluación del diferencial de temperatura de las nanopartículas de plata, se debe tener ciertas consideraciones, tales como:

- ✓ El circuito es abierto, esto quiere decir que el fluido que hace ingreso por la entrada del circuito no vuelve a ingresar, permanece y queda en la salida de este. Además, se tiene la posibilidad de regular la velocidad del fluido haciendo uso de una bomba peristáltica.
- ✓ Tanto para el sistema dinámico como estático, se realizó primeramente una muestra base o muestra en blanco, es decir, para el sistema dinámico se hizo circular agua destilada sin la adición de solución AgNP y para el sistema estático se hizo circular agua destilada sobre un paquete de resinas aniónicas sin iones nanoplata.
- ✓ Lo que se mide en el circuito es la diferencia o delta de temperatura, es decir la diferencia entre la temperatura de salida con la temperatura de entrada a la zona de transferencia de calor del microcolector.
- ✓ La toma de datos se realizó mediante dos termo resistores PT100 que tomaron valores de temperatura cada segundo. Cada ensayo tuvo una duración de 5 minutos, obteniendo así un total de 300 datos que finalmente son ponderados para establecer el valor de diferencial de temperatura.

Para la medición del delta de temperatura se realizará por medio de dos sistemas: dinámico y estático, el primero consiste en colocar las nanopartículas de plata en solución con agua

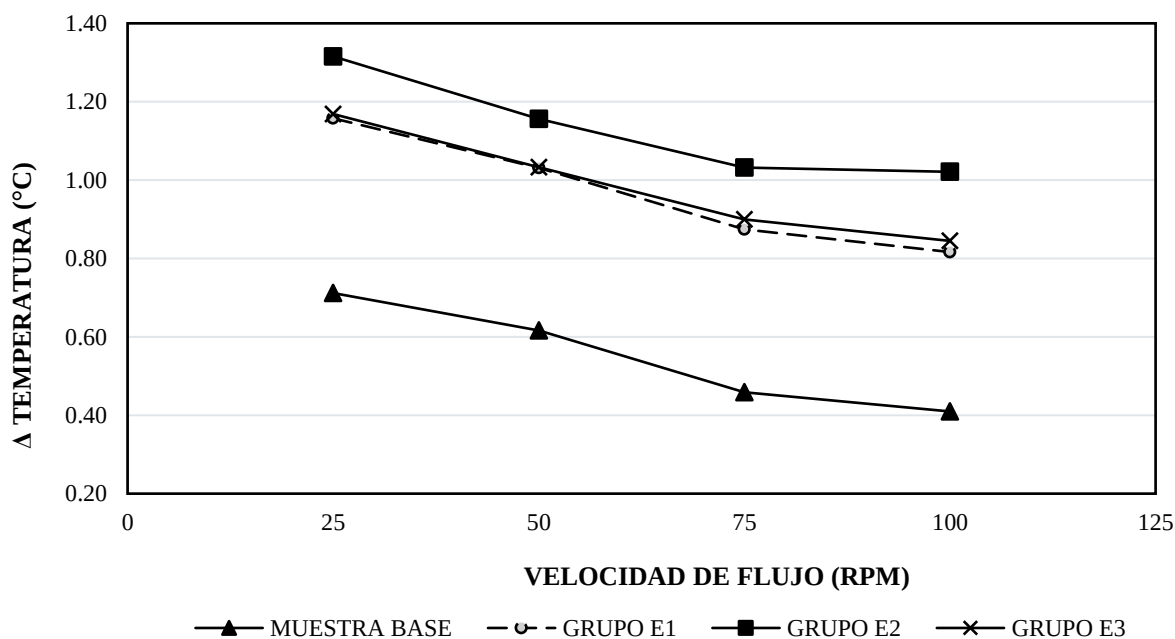
destilada formando un nanofluido y hacer fluirlo por el microcolector, el segundo consiste en colocar resinas aniónicas regeneradas impregnadas o recubiertas por nanopartículas de plata empaquetadas en papel filtro y a través de él fluir agua destilada por el microcolector.

4.2.1. Evaluación del Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Dinámico

La Figura 4.9 muestra el diferencial de temperatura frente a la velocidad de flujo de los grupos E1, E2 y E3 como de la muestra base. Estas muestras fueron evaluadas con una intensidad luminosa de 1 sol. Los resultados muestran que el diferencial de temperatura aumenta cuando la velocidad de flujo disminuye. Esto se debe a que, a mayor tiempo de permanencia del nanofluido en la zona de transferencia de calor dentro del microcolector, mayor es el tiempo que tiene para absorber la intensidad luminosa y calentarse.

El grupo E2 presenta el mayor diferencial de temperatura, con un valor de aproximadamente 1,316 °C a una velocidad de flujo de 25 RPM. Este grupo está representado por las muestras E2-025, E2-050, E2-075 y E2-100, que tienen una concentración de nitrato de plata de 0,2 ml y velocidades de flujo de 25, 50, 75 y 100 RPM respectivamente.

Figura 4. 9.
Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Dinámico



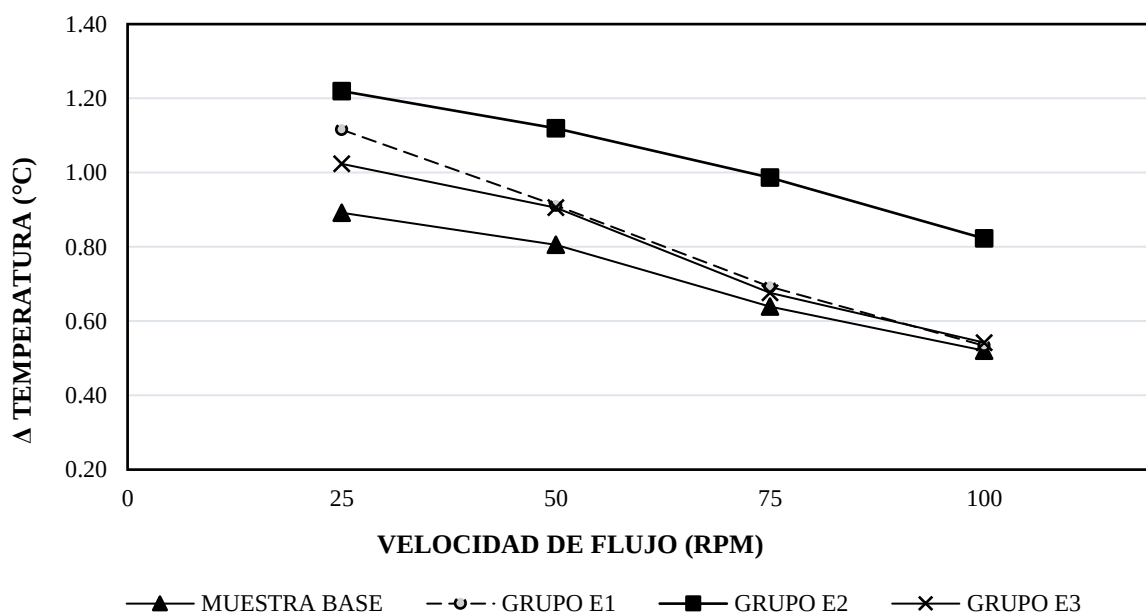
4.2.2. Evaluación de Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Estático

La Figura 4.10 muestra un sistema estático con resinas aniónicas captadoras de iones nanoplate. Los grupos E1, E2 y E3 como la muestra base, muestran que el diferencial de temperatura aumenta cuando la velocidad de flujo disminuye. El grupo E2 presenta el mayor diferencial de temperatura, con un valor de aproximadamente 1,220 °C a una velocidad de flujo de 25 RPM. Este grupo está representado por las muestras E2-025, E2-050, E2-075 y E2-100, que tienen una concentración de nitrato de plata de 0,2 ml y velocidades de flujo de 25, 50, 75 y 100 RPM, respectivamente.

Sin embargo, este valor es inferior al del sistema dinámico a la misma velocidad de flujo. En conclusión, el sistema dinámico presenta un mayor diferencial de temperatura a una velocidad de flujo de 25 RPM.

Figura 4. 10.

Diferencial de Temperatura en AgNPs en Sistema Estático



4.2.3. Análisis de la Intensidad Luminosa

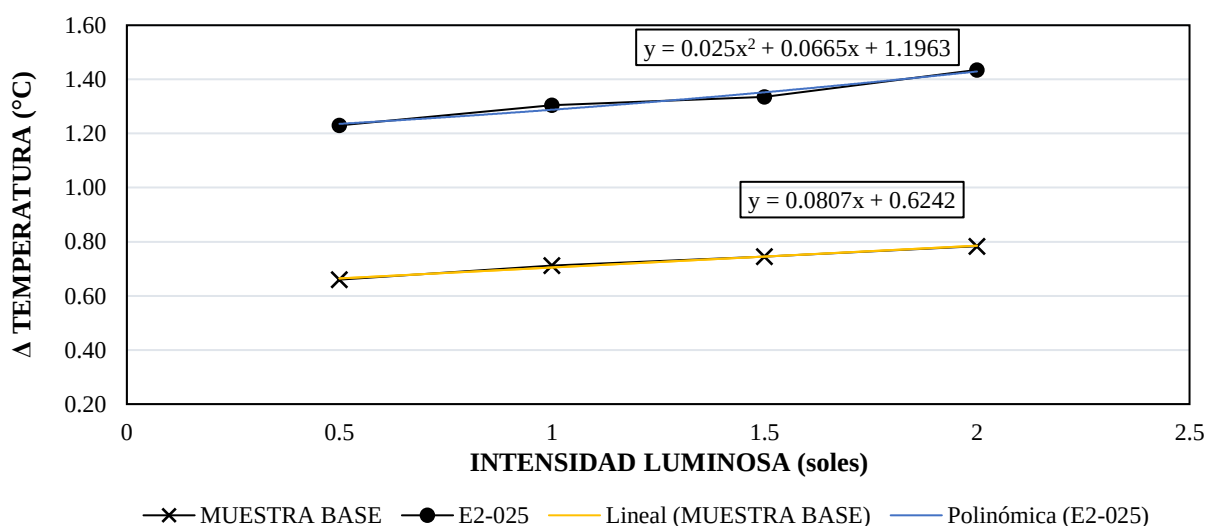
Basándonos en los resultados de las Figuras 4.9 y 4.10, se seleccionó el sistema dinámico y la muestra E2-025 para estudiar su diferencial de temperatura a diferentes intensidades luminosas. Estas muestras presentaron los mejores resultados en comparación con las demás.

Para realizar la evaluación, se variaron las intensidades luminosas de 0,5, 1, 1,5 y 2 soles. Además, se tomó una muestra base sin nanopartículas de plata (AgNPs) para compararla con una muestra con AgNPs.

La Figura 4.11 muestra que, primeramente en la muestra base el diferencial de temperatura aumenta proporcionalmente a la intensidad luminosa. Esto significa que, a medida que aumenta la intensidad luminosa, también aumenta el diferencial de temperatura de manera lineal. En cambio, considerando la aplicación de AgNPs la evaluación del diferencial de temperatura variando la intensidad luminosa muestra una regresión no lineal por causa del efecto plasmónico, ya que de no aparecer este efecto, el comportamiento entre las variables mencionadas sería totalmente lineal como lo es en la muestra base.

Figura 4. 11.

Análisis de la Intensidad Luminosa



CONCLUSIONES

PRIMERO: Mediante Espectroscopia UV-Vis se determinó la intensidad de absorbancia de las muestras donde se sintetizaron nanopartículas de plata. Los resultados mostraron que al variar parámetros como el pH o la concentración de plata afecta el valor máximo de intensidad de absorbancia en la muestra. Se consigue con la muestra SP07 una intensidad de absorbancia de 1,39 u.a. en la longitud de 408 nm, teniendo en cuenta que este valor de intensidad que logra alcanzar esta muestra nos hace referencia a que cuantitativamente esta logra absorber una mayor cantidad de luz en comparación a las demás muestras analizadas.

SEGUNDO: Mediante Zetasizer se determinó el tamaño de las nanopartículas de plata. Los resultados mostraron que tanto el pH como la concentración de nanopartículas de plata pueden modificar su estructura y tamaño. En el caso del pH, a medida que aumenta, también aumenta el tamaño de las nanopartículas, siempre y cuando la dispersión poblacional sea uniforme. La muestra SP07, presentó un tamaño de 94,02 nm con un área poblacional uniforme al 100 %. Este resultado se considera óptimo de las demás muestras, primeramente porque consigue la reducción completa de Ag^{+1} a Ag^0 de acuerdo con la síntesis química realizada y además que por la uniformidad en la muestra se ve que posee centros de nucleación muy similares.

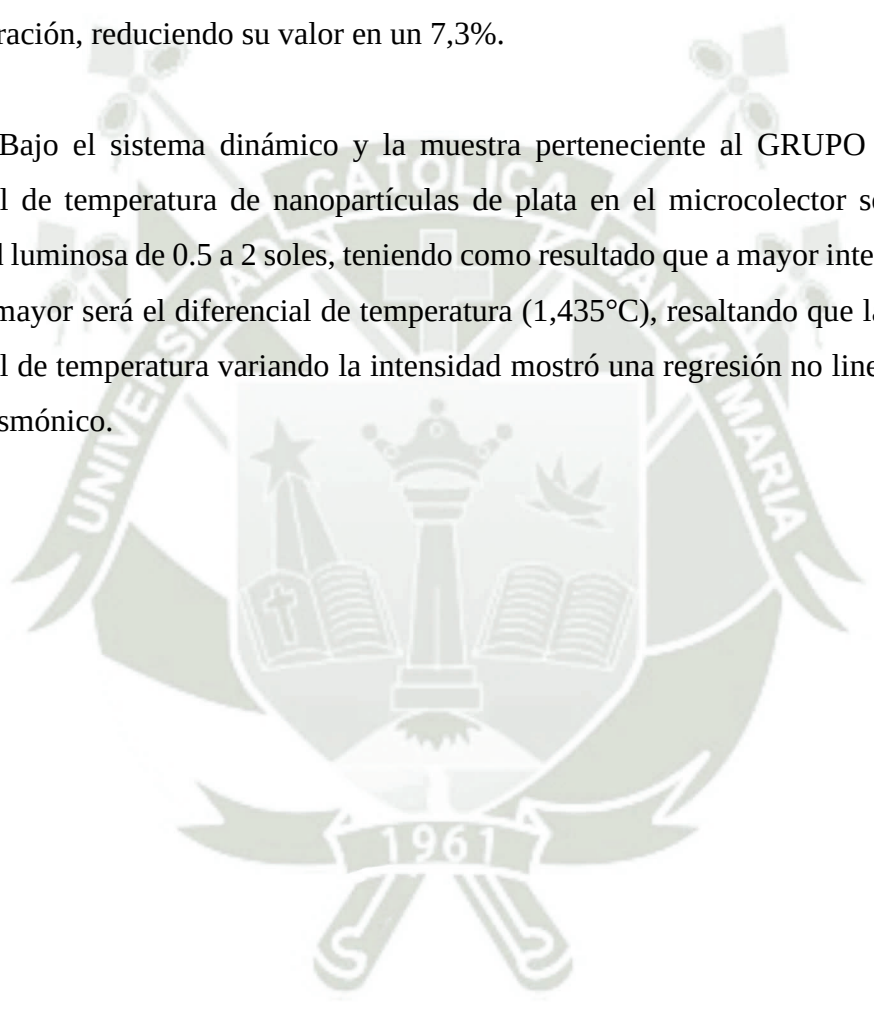
TERCERO: La caracterización morfológica de las nanopartículas de plata mediante TEM reveló estructuras esféricas y cuasi esféricas. Esto se debe a que el pH alcalino y la presencia de citrato como agente dispersante promueven la formación de nanopartículas de plata esféricas monodispersas. Además, la concentración de nanopartículas de plata también juega un papel importante. A medida que aumenta la concentración, también aumenta el diámetro de partícula disminuyendo la uniformidad de su población. Esto se basa en la idea de que aumentar la cantidad de plata en la muestra aumenta la probabilidad de formar diferentes tipos de nucleación, lo que resulta en partículas de diferentes tamaños, y con ello no tener la certeza que la población total esté en el rango de tamaño nanométrico.

CUARTO: La evaluación del diferencial de temperatura de las nanopartículas de plata en el microcolector solar bajo sistema dinámico mostró que la muestra del GRUPO E2 (E2-025) presentó un máximo diferencial de temperatura de 1,316 °C a una velocidad de flujo de 25 RPM. Estos resultados demuestran que, a menor velocidad de flujo, mayor es el diferencial de

temperatura, ya que se maximiza el tiempo de permanencia del nanofluido en la zona de transferencia de calor dentro del microcolector absorbiendo mayor cantidad de energía térmica.

QUINTO: La evaluación del diferencial de temperatura de las nanopartículas de plata en el microcolector solar bajo sistema estático mostró que la muestra del GRUPO E2 (E2-025) tuvo un máximo diferencial de temperatura de $1,220^{\circ}\text{C}$ con una velocidad de flujo de 25 RPM. Cabe resaltar que este valor es inferior al del sistema dinámico bajo las mismas condiciones de flujo y concentración, reduciendo su valor en un 7,3%.

SEXTO: Bajo el sistema dinámico y la muestra perteneciente al GRUPO E2 se midió el diferencial de temperatura de nanopartículas de plata en el microcolector solar variando la intensidad luminosa de 0.5 a 2 soles, teniendo como resultado que a mayor intensidad luminosa (2 soles) mayor será el diferencial de temperatura ($1,435^{\circ}\text{C}$), resaltando que la evaluación del diferencial de temperatura variando la intensidad mostró una regresión no lineal por causa del efecto plasmónico.



RECOMENDACIONES

- En la aplicación del microcolector solar bajo sistema dinámico se recomienda usar un sistema de filtrado y limpiado fuera del sistema con el objeto de que el nanofluido libere las nanopartículas de plata añadidas, como propuesta preliminar sería hacer uso de resinas aniónicas regeneradas que podrían captar las nanopartículas como se mostró en el sistema estático, pero sería bueno dar una revisión de alternativas.
- Este trabajo se realizó a nivel de laboratorio usando cantidades controladas (mililitros) de reactivos. Para investigaciones futuras, se recomienda escalar el trabajo a un nivel industrial para evaluar la viabilidad del sistema.
- Seleccionar un método de síntesis adecuado. Existen diversos métodos para la síntesis de AgNPs, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Para la aplicación en colectores solares, se recomienda utilizar un método que permita obtener AgNPs con un tamaño uniforme y una buena dispersión, además de evitar procedimiento nocivos o dañinos al medio ambiente. Los métodos mayormente recomendados en la actualidad son los métodos biológicos por ser amigables para el medio ambiente.
- Las condiciones de síntesis, como la temperatura, el pH y la concentración de los reactivos, tienen un impacto importante en las propiedades de las AgNPs. Por lo tanto, es importante controlar estas condiciones cuidadosamente para obtener AgNPs con las propiedades deseadas, para ello también es necesario realizar la medición con equipos lo más precisos posibles.
- Para la caracterización de nanopartículas de plata, si bien es cierto la importancia de obtener información como el tamaño, forma, área poblacional, intensidad de absorbancia de cada muestra, es un dato también valioso el contar con la cantidad de nanoparticulado generado en cada muestra, y visto independientemente, porque se ha visto que es posible sin conocer el dato preciso de cada uno comparar y reconocer cual de las muestras posee mayor cantidad, sería más certero el tener un valor numérico en cada muestra.

REFERENCIAS

- A. R.F. Haglund. (1998). Ion implantation as a tool in the synthesis of practical third-order nonlinear optical materials. Elsevier.
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509398007369>
- Ahmed, M., & Azam, M. (2016). Causal nexus between energy consumption and economic growth for high, middle and low income countries using frequency domain analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 653–678.
- <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.174>
- Bhalla, V., & Tyagi, H. (2018). Parameters influencing the performance of nanoparticles-laden fluid-based solar thermal collectors: A review on optical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 12–42.
- <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.12.007>
- Bodansky, D. (2016). The Paris Climate Change Agreement: A New Hope? *American Journal of International Law*, 110(2), 288–319.
- <https://doi.org/10.5305/AMERJINTELAW.110.2.0288>
- C. Cardoso Patricia. (2016). Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud.
- Camacho B., A. S. (2012). acoPlamiento de Plasmones localizados en nanosistemas. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(138), 15–24.
- http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Camino. (2017). Effect of the substrate on the plasmon resonance of gold nanoparticles.
- Chen, M., He, Y., & Zhu, J. (2019). Quantifying and Comparing the Near-Field Enhancement, Photothermal Conversion, and Local Heating Performance of Plasmonic

SiO₂@Au Core-Shell Nanoparticles. *Plasmonics*, 14(4), 1019–1027.

<https://doi.org/10.1007/S11468-018-0889-X/METRICS>

Chen, M., He, Y., Zhu, J., Shuai, Y., Jiang, B., & Huang, Y. (2015). An experimental investigation on sunlight absorption characteristics of silver nanofluids. *Solar Energy*, 115, 85–94. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.01.031>

Choi, D. W. (2002). Mejorar el tratamiento del agua de la planta. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2002/july-2002/special-report-plant-utilities/improve-plant-water-treatment>

Choi, S. U. S., Li, S., & Eastman, J. A. (1999). Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121(2), 280–289. <https://doi.org/10.1115/1.2825978>

De Ciencia, F., Sepúlveda, J. A., Profesor, H., Felipe, G. :, Urbina, H., & Físico, I. (2017). Estudio computacional de plasmones localizados en nanopartículas de plata. 20017.

Díaz Acosta, E. M., (2019). Nanopartículas de plata: síntesis y funcionalización. Una breve revisión. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 12(22), 0–0. <https://doi.org/10.22201/CEIICH.24485691E.2019.22.60758>

Enrique Rocha Arredondo, L., Amparo Rodríguez Cobos César Eduardo García Ortiz San Luis Potosí, D., & México, S. (2018). Efectos lineales y no-lineales en sistemas plasmónicos.

Esso, L. J., & Kehoe, Y. (2016a). Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries. *Energy*, 114, 492–497. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.08.010>

Esso, L. J., & Kehoe, Y. (2016b). Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries. *Energy*, 114, 492–497. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.08.010>

- Eustis, S., & El-Sayed, M. A. (2006). Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: Noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes. *Chemical Society Reviews*, 35(3), 209–217. <https://doi.org/10.1039/B514191E>
- Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., & Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1695–1721. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.03.012>
- Frías, A. U. (2008). Estudio de nanopartículas en guías de onda fabricadas por implantación de iones metálicos en cuarzo fundido.
- García, F., & Martin, L. (2008). Plasmones superficiales. *Investigación y Ciencia*, 1–11.
- Goel, N., Taylor, R. A., & Otanicar, T. (2020). A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors. *Renewable Energy*, 145, 903–913. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.06.097>
- Gorji, T. B., & Ranjbar, A. A. (2017). A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 10–32. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.015>
- Grágeda, Z. M. (2006). Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos.
- Horn, M. (2006). El estado actual del uso de la energía solar en el Peru: situacion y perspectivas de la energia solar en el Peru. *Peru; EconóMico*, 29(11). <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&sw=w&issn=10180621&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA163213732&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>

- Hussein, A. K. (2016). Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors – Recent advances and overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 767–792. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.04.050>
- Bernal Gudiño Alejandra. (2019). Intercambio iónico en sistemas de alta eficiencia. <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-politecnico-nacional/bioseparaciones-fluido-fluido/9-intercambio-ionico-en-sistemas-de-alta-eficiencia/20747664>
- International energy. (1995). International energy. <https://doi.org/10.2172/87026>
- International Energy Agency. (2017). World Energy Outlook 2017. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>
- International Organization for Standardization. (2015). ISO/TS 80004-1:2015, Nanotechnologies — Vocabulary — Part 1: Core terms. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-1:ed-2:v1:en>
- Irwin, P., Martin, J., Nguyen, L. H., He, Y., Gehring, A., & Chen, C. Y. (2010). Antimicrobial activity of spherical silver nanoparticles prepared using a biocompatible macromolecular capping agent: Evidence for induction of a greatly prolonged bacterial lag phase. *Journal of Nanobiotechnology*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/1477-3155-8-34/FIGURES/5>
- Jiang, X. C., Chen, W. M., Chen, C. Y., Xiong, S. X., & Yu, A. B. (2011). Role of Temperature in the Growth of Silver Nanoparticles Through a Synergetic Reduction Approach. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S11671-010-9780-1/FIGURES/7>
- Johan Sebastián Duque. (2017). Resonancia del plasmon de superficie en nanopartículas metálicas sintetizadas por ablación láser. https://www.researchgate.net/publication/314114976_Resonancia_del_plasmon_de_superficie_en_nanoparticulas_metalicas_sintetizadas_por_ablacion_laser

John A.Duffie, W. A. B. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes-Third Edition. 936.

<http://www.amazon.com/Solar-Engineering-Thermal-Processes-Duffie/dp/0470873663>

Juárez Morales, Juan Carlos. (2012). Estudio de procesos resonantes en arreglos

bidimensionales de nanopartículas.

<https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/291>

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy:

Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 894–

900. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.094>

Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and

Combustion Science, 30(3), 231–295. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2004.02.001>

Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. Renewable

and Sustainable Energy Reviews, 62, 1092–1105.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.022>

Kasaeian, A., Eshghi, A. T., & Sameti, M. (2015). A review on the applications of nanofluids

in solar energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 584–598.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.11.020>

Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (2002). Mechanisms of heat

flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). International Journal of Heat

and Mass Transfer, 45(4), 855–863. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)

Kumar, S., Chander, N., Gupta, V. K., & Kukreja, R. (2021). Progress, challenges and future

prospects of plasmonic nanofluid based direct absorption solar collectors – A state-of-

the-art review. Solar Energy, 227, 365–425.

<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.09.008>

- Lee, B. J., Park, K., Walsh, T., & Xu, L. (2012). Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 134(2). <https://doi.org/10.1115/1.4005756/455679>
- Lewis, N. S. (2007). Toward Cost-Effective Solar Energy Use. *Science*, 315(5813), 798–801. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1137014>
- Li, Y., Xie, H., Yu, W., & Li, J. (2011). Investigation on Heat Transfer Performances of Nanofluids in Solar Collector. *Materials Science Forum*, 694, 33–36. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.694.33>
- Löf, G. O. G., Duffie, J. A., & Smith, C. O. (1966). World distribution of solar radiation. *Solar Energy*, 10(1), 27–37. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(66\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(66)90069-7)
- Lv, W., Phelan, P. E., Swaminathan, R., Otanicar, T. P., & Taylor, R. A. (2013). Multifunctional core-shell nanoparticle suspensions for efficient absorption. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 135(2). <https://doi.org/10.1115/1.4007845/379587>
- Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S. (2013). A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 582–594. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.10.037>
- Mallah, A. R., Kazi, S. N., Zubir, M. N. M., & Badarudin, A. (2018). Blended morphologies of plasmonic nanofluids for direct absorption applications. *Applied Energy*, 229, 505–521. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.07.113>
- Mallah, A. R., Mohd Zubir, M. N., Alawi, O. A., Salim Newaz, K. M., & Mohamad Badry, A. B. (2019). Plasmonic nanofluids for high photothermal conversion efficiency in direct absorption solar collectors: Fundamentals and applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 201, 110084. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2019.110084>

- Manahan, S. E. (2007). Introducción a la química ambiental.
- Manno, D., Buccolieri, A., Carbone, G. G., Calcagnile, L., & Serra, A. (2020). Plasmonic Light Trapping in Titania–Silver Dots Thin Films. *Physica Status Solidi (b)*, 257(9), 2070035. <https://doi.org/10.1002/PSSB.202070035>
- Marco Polo Hernández Díaz. (2013). Síntesis de Nanopartículas de Plata Biologicamente Asistida con Opuntia SP. y su Incorporación en Membranas Poliméricas Nanofibrosas. <https://docplayer.es/49140131-Sintesis-de-nanopartículas-de-plata-biologicamente-asistida-con-opuntia-sp-y-su-incorporacion-en-membranas-polimericas-nanofibrosas.html>
- Marín Rengifo, K. W. (2021). Plasmones localizados en grupos de nanopartículas. Universidad Nacional de Trujillo. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2996433>
- McDonald, G. E. (1975). Spectral reflectance properties of black chrome for use as a solar selective coating. *Solar Energy*, 17(2), 119–122. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90067-5)
- Mirko Grágeda Zegarra, M. G. Z. (2006). Desarrollos Actuales en Tratamientos Deriles por Métodos Electroquímicos. <https://pdfcoffee.com/electroquimica-casera-pdf-free.html>
- Mohtasham, J. (2015). Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289–1297. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.774>
- Molina, M. (2016). Propiedades plasmónicas de nanopartículas de plata para aplicaciones en energía solar. http://www.docfm.cuvalles.udg.mx/sites/default/files/tesis_yoshua_aguilar_orientacion_nanociencias.pdf
- Monge, M. (2009). Nanopartículas de plata : métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. 33–41.

- Monge Oroz, M. (2009). Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. *Anales de Química de La RSEQ*, ISSN 1575-3417, ISSN-e 2792-5250, No. 1, 2009, Págs. 33-41, 1, 33–41.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2931286&info=resumen&idioma=ENG>
- Mosquera, E., Rosas, N., Debut, A., & Guerrero, V. H. (2015). Síntesis y caracterización de nanopartículas de dióxido de titanio obtenidas por el método de sol-gel. *Revista Politécnica*, 36(3), 7–7.
https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/525
- Muhammad, B. (2019). Energy consumption, CO2 emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries. *Energy*, 179, 232–245. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.03.126>
- Naresh Marturi. (2013). Diagrama esquemático del microscopio electrónico de transmisión. https://www.researchgate.net/figure/Transmission-electron-microscope-schematic-diagram_fig5_281534044
- Nevárez Rivadeneira, M. E. (2010). Optimización del Proceso de Regeneración de Resinas de Intercambio Iónico para ser Utilizadas en el Desmineralizador de Agua de la Refinería Estatal Esmeraldas. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/253>
- Nozik, A. J. (2003). Photoelectrochemistry: Applications to Solar Energy Conversion. <https://doi.org/10.1146/Annurev.Pc.29.100178.001201>, 29(1), 189–222.
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PC.29.100178.001201>
- Ohler, A., & Fetters, I. (2014). The causal relationship between renewable electricity generation and GDP growth: A study of energy sources. *Energy Economics*, 43, 125–139. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.02.009>

- Osorio Anaya, A. M., Manrique Fajardo, J. J., Cornejo Sánchez, Ó., Osorio Anaya, A. M.,
Manrique Fajardo, J. J., & Cornejo Sánchez, Ó. (2019). Estudio teórico del plasmón en
nanoesferas de oro. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 85(4), 432–439.
<https://doi.org/10.37761/RSQP.V85I4.257>
- Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., & Taylor, R. A. (2010a).
Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable and Sustainable
Energy*, 2(3). <https://doi.org/10.1063/1.3429737/284730>
- Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., & Taylor, R. A. (2010b).
Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable and Sustainable
Energy*, 2(3). <https://doi.org/10.1063/1.3429737/284730>
- Pamela Mastranzo Ortega. (2017). Elementos ópticos de difracción no lineal basados en
nanoestructurasNon - lineal d iffractive optical elements based on nanostructures.
[https://1library.co/document/yr26j77z-elementos-opticos-difraccion-basados-
nanoestructurasnon-iffraction-elements-nanostructures.html](https://1library.co/document/yr26j77z-elementos-opticos-difraccion-basados-nanoestructurasnon-iffraction-elements-nanostructures.html)
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in
environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3),
1513–1524. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.037>
- Pérez, D., Sierra, I., & Fajardo, M. (2006). Preparación de materiales adsorbentes de Hg (II)
con fines analíticos y aplicaciones medioambientales. *Ciencias Experimentales y
Tecnología*, 21–22.
- Pérez Quintanilla, D., Sierra Alonso, I., & Fajardo González, M. (2006). Preparación de
materiales adsorbentes de Hg (II) con fines analíticos y aplicaciones medioambientales.
- Pino-Vallejo, M., Vásconez Basantes, F., Pazmiño Montero, M., & Andrade Orozco, P.
(2021). Effectiveness of filter beds in the reduction of sulphates and calcium carbonate in

water for human consumption. *Perfiles*, 1(26), 83–89.

<https://doi.org/10.47187/PERF.V1I26.139>

Qin, Y., Ji, X., Jing, J., Liu, H., Wu, H., & Yang, W. (2010). Size control over spherical silver nanoparticles by ascorbic acid reduction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 372(1–3), 172–176.

<https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2010.10.013>

Raj, P., & Subudhi, S. (2018). A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 54–74.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.10.012>

Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 2016 534:7609, 534(7609), 631–639.

<https://doi.org/10.1038/nature18307>

Sahoo, P. K., Kalyan Kamal, S. S., Jagadeesh Kumar, T., Sreedhar, B., Singh, A. K., & Srivastava, S. K. (2009). Synthesis of Silver Nanoparticles using Facile Wet Chemical Route. *Defence Science Journal*, 59(4), 447–455. <https://doi.org/10.14429/DSJ.59.1545>

Sanchez, F. (2014). Ingeniería Eléctrica: Circuito equivalente del transformador.

<http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com/2014/12/circuito-equivalente-transformador.html>

Sánchez, M., Tutor, M., Álvarez, J., Facultad, R., & Ciencias, D. E. (2017). Nanoparticulas de Plata: Ppreparacion, Caracterizacion y Propiedades Con Aplicacion en Inocuidad de los Alimentos.

Sarsam, W. S., Kazi, S. N., & Badarudin, A. (2015). A review of studies on using nanofluids in flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, 122, 1245–1265.

<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.10.032>

- Shvets, G., & Tsukerman, I. (2011). Plasmonics and Plasmonic Metamaterials Analysis and Applications. *Plasmonics and Plasmonic Metamaterials: Analysis And Applications*, 4, 1–448. <https://doi.org/10.1142/8183>
- Singh, R. L., & Singh, P. K. (2017). Global Environmental Problems. Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future, 13–41. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4_2
- Sithole, Z. (2014). Synthesis of silver nanoparticles and investigating their antimicrobial effects. University of the Western Cape.
- Sithole, Z. N. (2014). Synthesis of silver nanoparticles and investigating their antimicrobial effects.
- Srinivas, S., Kamal, K., Bojja, S., Sahoo, P. K., Kalyan Kamal, S. S., Jagadeesh Kumar, T., Sreedhar, B., Singh, A. K., & Srivastava, S. K. (2009). Synthesis of Silver Nanoparticles using Facile Wet Chemical Route. *Researchgate.Net* PK Sahoo, SS Kamal, TJ Kumar, B Sreedhar, AK Singh, SK Srivastava *Defence Science Journal*, 2009•researchgate.Net, 59(4), 447–455. <https://doi.org/10.14429/dsj.59.1545>
- Stanley E. Manahan. (2007). Introducción a la química ambiental. <https://books.google.com.pe/books?id=5NR8DIk1n68C&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- SUS Choi, D. S. H. W.-A. F. (1995). Developments and applications of Non-Newtonian flows. https://scholar.google.cl/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Developments+and+applications+of+Non-Newtonian+flows.+ASME+FED.1995%3B+66%3A+99-105.&btnG=
- Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Walker, C. A., Nguyen, M., Trimble, S., & Prasher, R. (2011). Applicability of nanofluids in high flux solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(2). <https://doi.org/10.1063/1.3571565/284586>

- Tugcu, C. T., Ozturk, I., & Aslan, A. (2012). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries. *Energy Economics*, 34(6), 1942–1950. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2012.08.021>
- Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2009a). Predicted efficiency of a Low-temperature Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 131(4), 0410041–0410047. <https://doi.org/10.1115/1.3197562/447662>
- Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2009b). Predicted efficiency of a Low-temperature Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 131(4), 0410041–0410047. <https://doi.org/10.1115/1.3197562/447662>
- UNDP. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
- Videla, F. A. (2011). Desarrollo de técnicas de espectroscopía de scattering óptico y de resonancia plasmónica para la determinación de tamaño de micro y nanopartículas. <https://doi.org/10.35537/10915/18185>
- Wang, L., Hasanzadeh Kafshgari, M., & Meunier, M. (2020). Optical Properties and Applications of Plasmonic-Metal Nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 30(51), 2005400. <https://doi.org/10.1002/ADFM.202005400>
- Wang, Q., Yang, L., Zhao, N., Xu, G., Song, J., Jin, X., Li, X., & Liu, S. (2023). A review of applications of plasmonic and conventional nanofluids in solar heat collection. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119476. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119476>

Willets, K. A., & Van Duyne, R. P. (2007). Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing. *Annual Review of Physical Chemistry*, 58, 267–297.

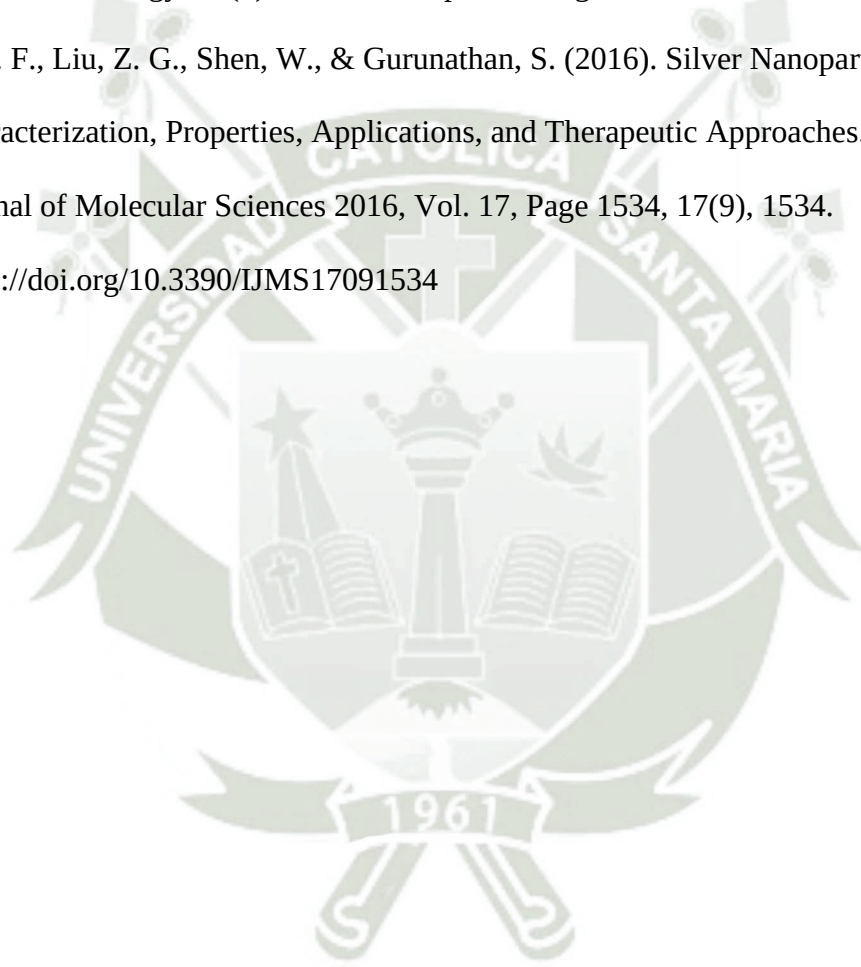
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PHYSCHEM.58.032806.104607>

Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., & Zinadini, S. (2012). An experimental investigation on the effect of Al₂O₃–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors.

Renewable Energy, 39(1), 293–298. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.08.056>

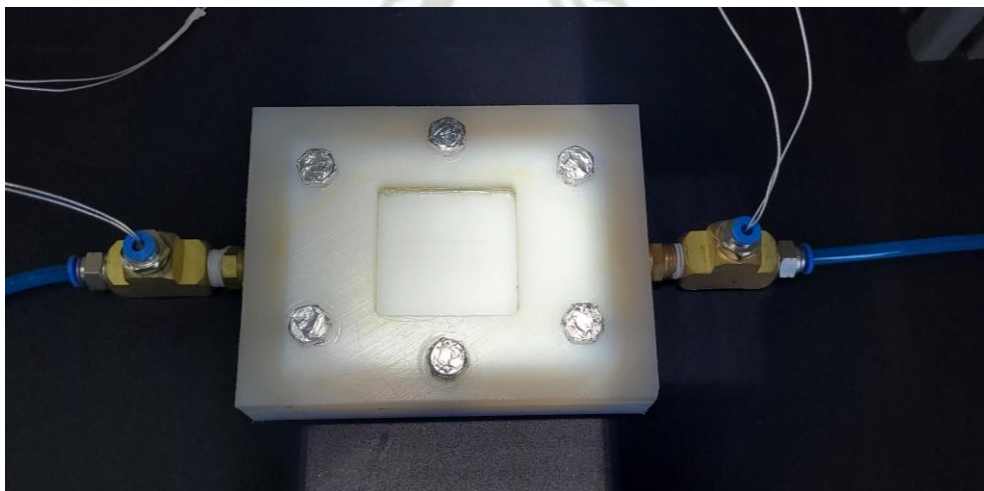
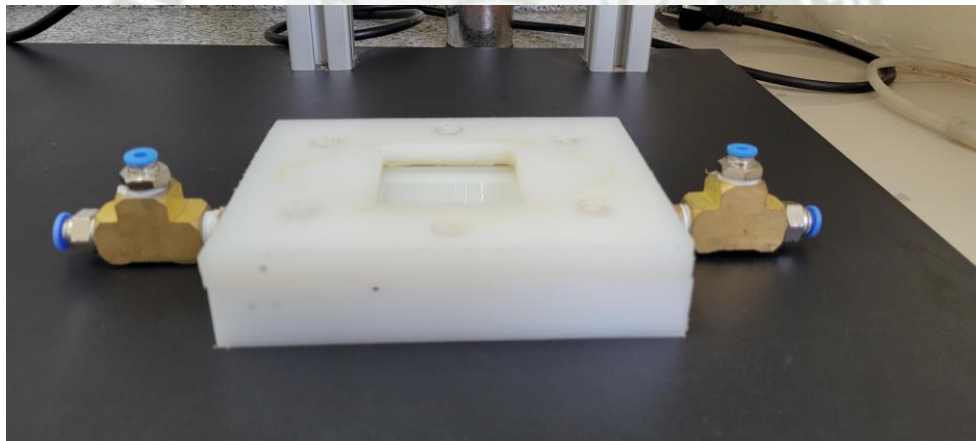
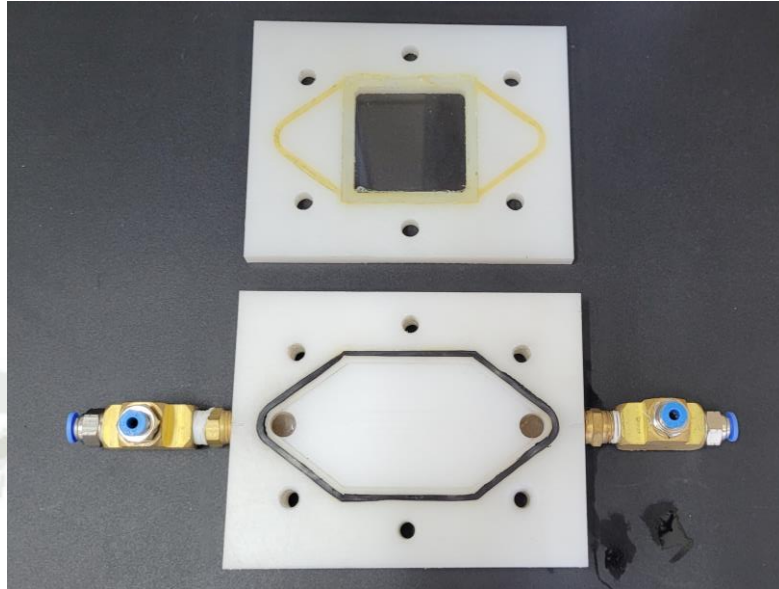
Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *International Journal of Molecular Sciences* 2016, Vol. 17, Page 1534, 17(9), 1534.

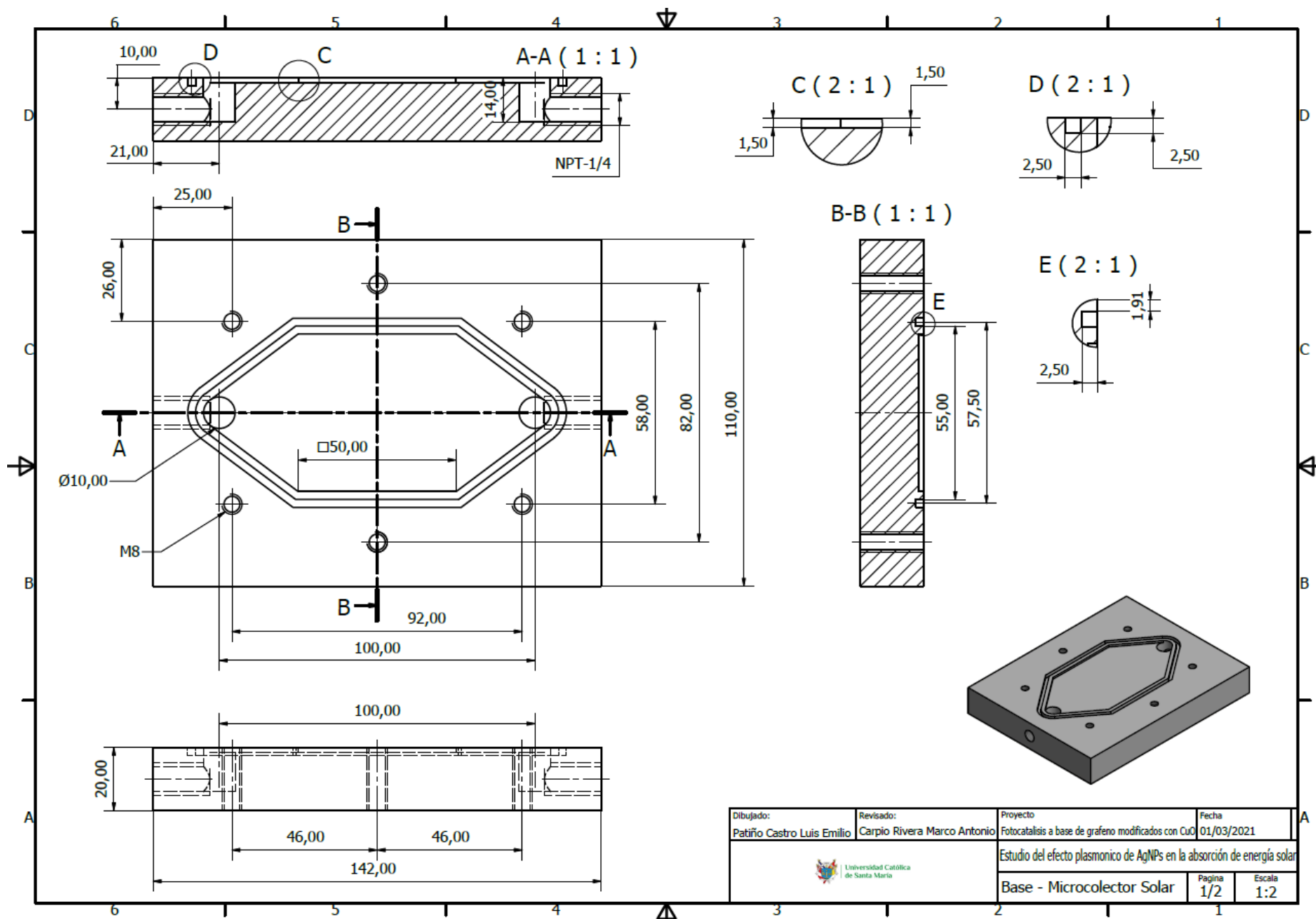
<https://doi.org/10.3390/IJMS17091534>

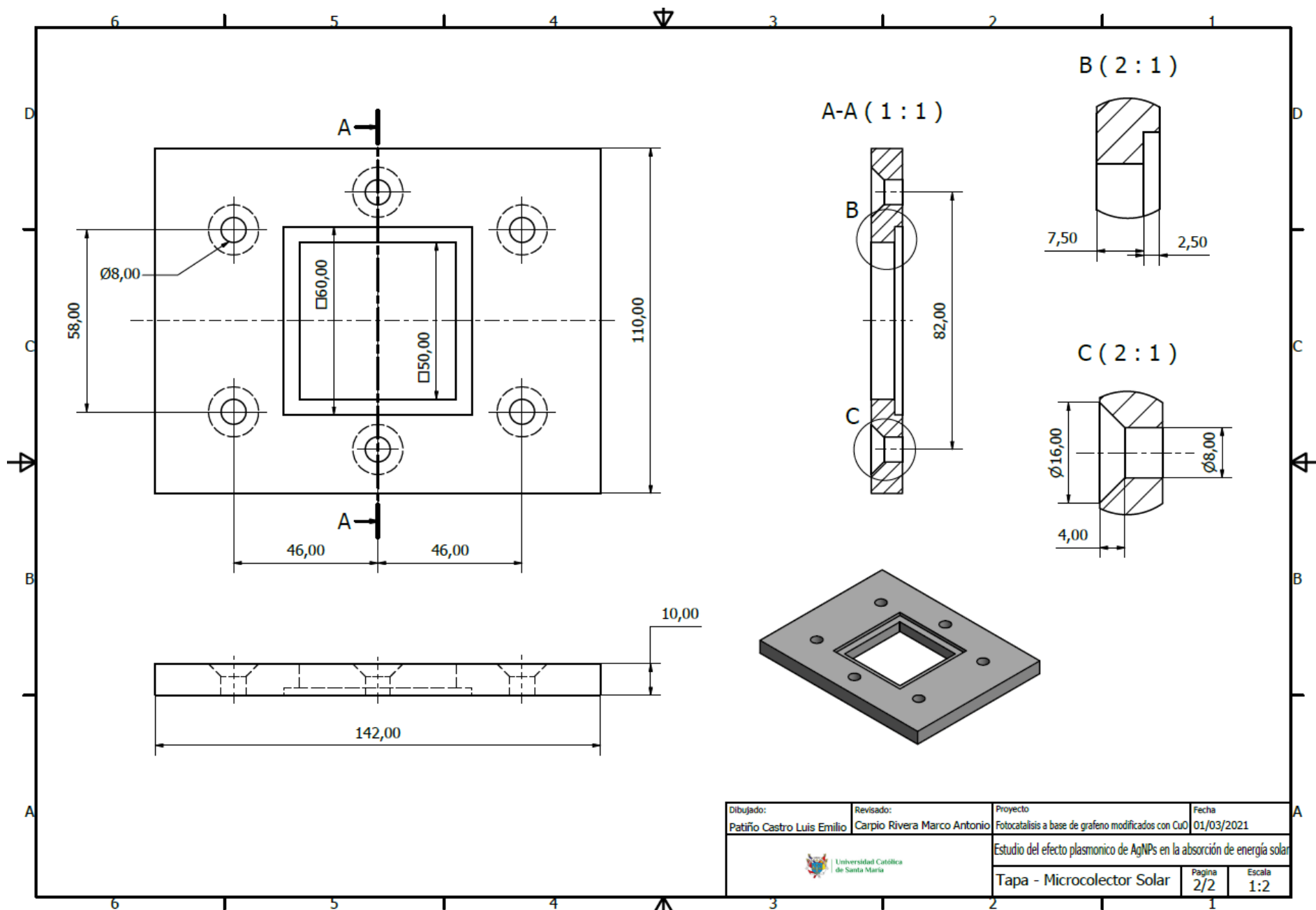


ANEXOS

Anexo 1. Prototipo y planos de Microcolector Solar







Anexo 2. Programación Circuito Medición Temperatura

```
#include <Adafruit_MAX31865.h>

// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 thermo1 = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
Adafruit_MAX31865 thermo2 = Adafruit_MAX31865(5, 6, 7, 8);
// use hardware SPI, just pass in the CS pin
//Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10);

// The value of the Rref resistor. Use 430.0 for PT100 and 4300.0 for PT1000
#define RREF 430.0
// The 'nominal' 0-degrees-C resistance of the sensor
// 100.0 for PT100, 1000.0 for PT1000
#define RNOMINAL1 100.0
#define RNOMINAL2 100.0

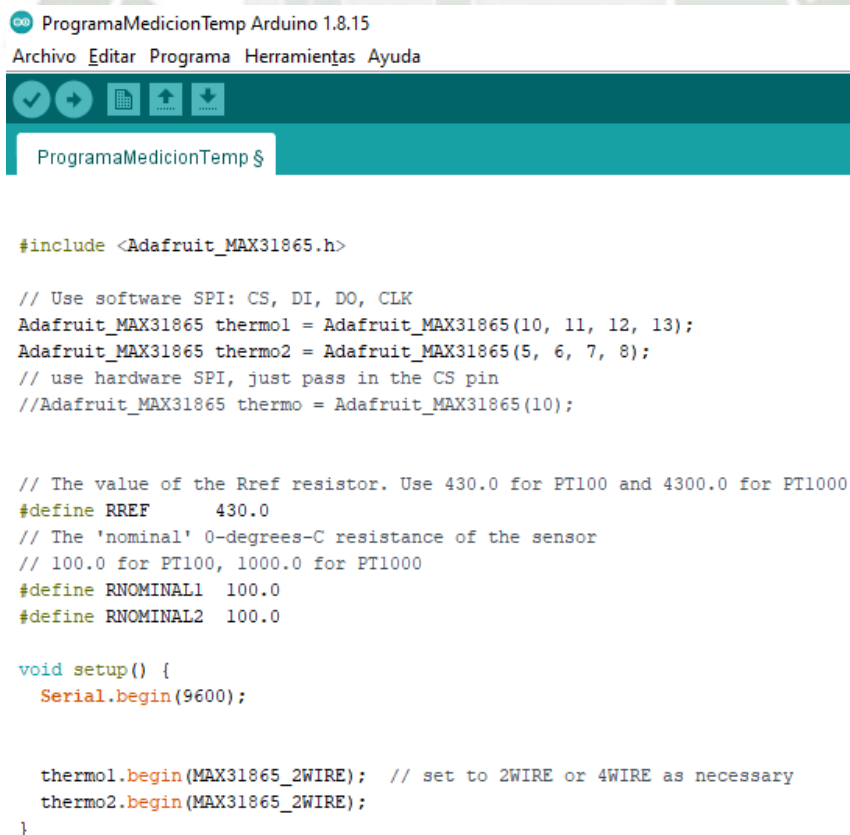
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  thermo1.begin(MAX31865_2WIRE); // set to 2WIRE or 4WIRE as necessary
  thermo2.begin(MAX31865_2WIRE);
}

void loop() {
  uint16_t rtd1 = thermo1.readRTD();
  uint16_t rtd2 = thermo2.readRTD();
  //Serial.print("RTD1 value: "); Serial.println(rtd1);
  //Serial.print("RTD2 value: "); Serial.println(rtd2);
  float ratio1 = rtd1;
  ratio1 /= 32768;
  float ratio2 = rtd2;
  ratio2 /= 32768;
  //Serial.print("Ratio1 = "); Serial.println(ratio1,8);
  //Serial.print("Ratio2 = "); Serial.println(ratio2,8);
  //Serial.print("Resistance1 = "); Serial.println(RREF*ratio1,8);
  //Serial.print("Resistance2 = "); Serial.println(RREF*ratio2,8);
  Serial.print(thermo1.temperature(RNOMINAL1, RREF));
  Serial.print(",");
  Serial.println(thermo2.temperature(RNOMINAL2, RREF));

  // Check and print any faults
  // uint8_t fault = thermo.readFault();
  // if (fault) {
  //   Serial.print("Fault 0x"); Serial.println(fault, HEX);
  }
```

```
// if (fault & MAX31865_FAULT_HIGHTHRESH) {
//   Serial.println("RTD High Threshold");
// }
// if (fault & MAX31865_FAULT_LOWTHRESH) {
//   Serial.println("RTD Low Threshold");
// }
// if (fault & MAX31865_FAULT_REFINLOW) {
//   Serial.println("REFIN- > 0.85 x Bias");
// }
// if (fault & MAX31865_FAULT_REFINHIGH) {
//   Serial.println("REFIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open");
// }
// if (fault & MAX31865_FAULT_RTDINLOW) {
//   Serial.println("RTDIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open");
// }
// if (fault & MAX31865_FAULT_OVUV) {
//   Serial.println("Under/Over voltage");
// }
// thermo.clearFault();
// }
delay(1000);
}
```



```
ProgramaMedicionTemp Arduino 1.8.15
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

#include <Adafruit_MAX31865.h>

// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 thermo1 = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
Adafruit_MAX31865 thermo2 = Adafruit_MAX31865(5, 6, 7, 8);
// use hardware SPI, just pass in the CS pin
//Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10);

// The value of the Ref resistor. Use 430.0 for PT100 and 4300.0 for PT1000
#define RREF 430.0
// The 'nominal' 0-degrees-C resistance of the sensor
// 100.0 for PT100, 1000.0 for PT1000
#define RNOMINAL1 100.0
#define RNOMINAL2 100.0

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  thermo1.begin(MAX31865_2WIRE); // set to 2WIRE or 4WIRE as necessary
  thermo2.begin(MAX31865_2WIRE);
}
```

Autoguardado ☒ Result 14-Oct • Última modificación: Ahora mismo

Archivo Inicio Insertar Dibujar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Automatizar Programador Ay

Conectar un dispositivo Importar archivo de datos Orígenes de datos

Iniciar datos Detener datos Transmisión de datos

Grabar datos Detener grabación Capturar pantalla Grabación de datos

Restablecer datos Avanzado

L15

Entrada de datos (desde Arduino Uno (COM3))

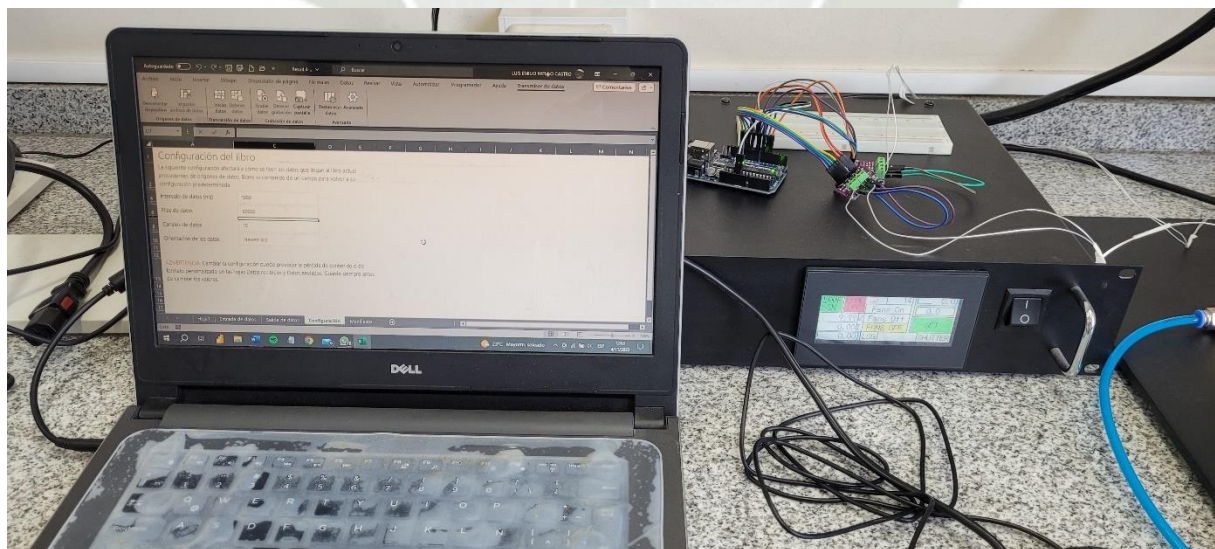
Los datos procedentes del origen de datos actual aparecerán abajo según se reciban.

Datos actuales

TIME	Temp Salida	Temp Entrada	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10
16:42:51.07	25.36	24.42								

Información histórica

TIME	Temp Salida	Temp Entrada	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10
16:42:51.07	25.36	24.42								
16:42:49.76	25.4	24.48								
16:42:48.45	25.4	24.35								
16:42:47.15	25.4	24.48								
16:42:45.84	25.4	24.42								
16:42:44.53	25.43	24.45								
16:42:43.22	25.4	24.42								



SciSun Solar Simulators

OVERVIEW & SPECIFICATIONS

Sciencetech's line of SciSun solar simulators are easy to use, economically priced, and technically superior. The SciSun line is designed to affordably provide a solution for researchers who require a relatively small field of illumination. They can produce an irradiance of up to **2 Suns** and feature Class AAA specifications.

The SciSun series provides a flexible output orientation that can be adapted to different requirements. The standard configuration is downward-facing; however, a horizontal output can be achieved easily.



Specifications

Model	SciSun-300	SciSun-150
	160-9101	160-9103
Target Area	50 × 50 mm	
Solar Simulator Class	AAA (Spatial non-Uniformity, Spectral Match ² , Temporal Instability ³)	
Irradiance at Target (AM1.5G 1 Sun=100mW/cm ²)	Up to 2 Sun ²	Up to 1 Sun ²
Lamp Wattage (watts)	300	150
Lamp Type	Xenon Short Arc , Ozone free	
Working Distance (mm)	380 ± 15	
Manual Shutter	Included	
Manual Variable Attenuator	Included	
Dimensions (L×W×H)	535 × 183 × 188 mm	
Weight without PS (kg)	8.5 + 8 (stand)	
Power Supply Model	601-300	601-150
Power Requirements	110-240V, 50Hz/60Hz , 450W	110-240V, 50Hz/60Hz , 250W
Stability / Ripple / Regulation	0.05% / < 1% / 0.02% current variation for 5V line charge	

Standard Included Components

Arc Lamp Housing with integrated igniter
Xenon arc lamp
Filter holder
Beam turner
Continuous beam angle variations from 0-360 degrees
Quality Control Report
Touchscreen power supply interface
Power supply control software
Manual variable attenuator
Height adjustable stand

SciSun Solar Simulators

STANDARD FEATURES

Touchscreen Power Supply - 601

Each SciSun series solar simulator comes with a 601-series power supply.



601-series power supply

Standard features included with Sciencetech's 601-series power supplies:

- Touchscreen interface
- Shutter and exposure control (if electronic shutter is supplied)
- Single connection for lamp power, cooling, and communication
- Lamp starts and timer log
- Fan cooling safety interlock
- RS232 software GUI included

Filter Box Assembly

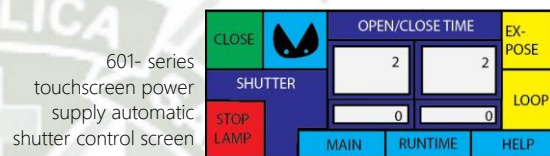
This system has a modular optics assembly which can hold a range of filters in Sciencetech's standard FT style filter holder. The most popular options are AM filters; however a range of other filter options are available such as bandpass filters and neutral density filters.

Variable Aperture

Sciencetech's SciSun solar simulators include a variable aperture component, which allows variation of the output irradiance level without adjusting the power supply. The range of attenuation is continuously variable from 10% to 100%. Uniformity is best maintained at specific output levels. Non-uniformity versus output level for the VAR-ATTN-M may vary between models.



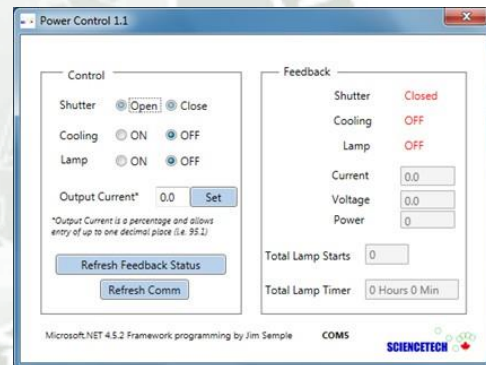
601-series touchscreen power supply main control screen



601-series touchscreen power supply automatic shutter control screen

Software Included

SciSun Solar Simulators come with SciLampPower Control.



Software GUI for power supply control

Spectral Filter Options

AM1.5G-FT-3: Includes AM1.5G Filter—Class A

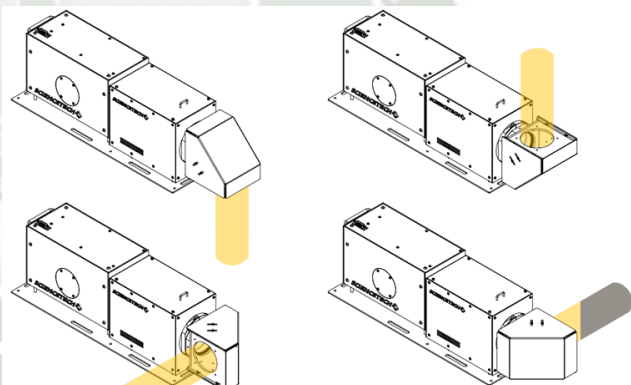
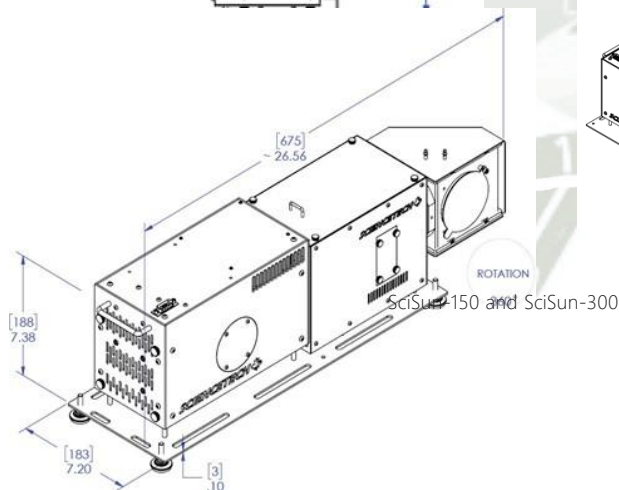
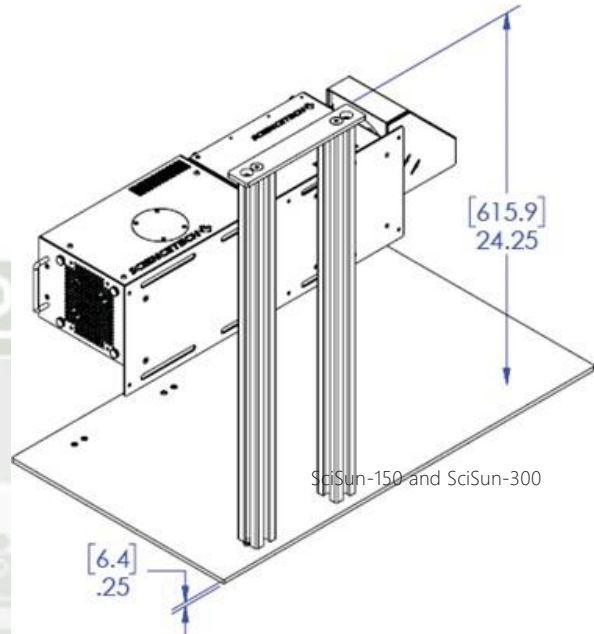
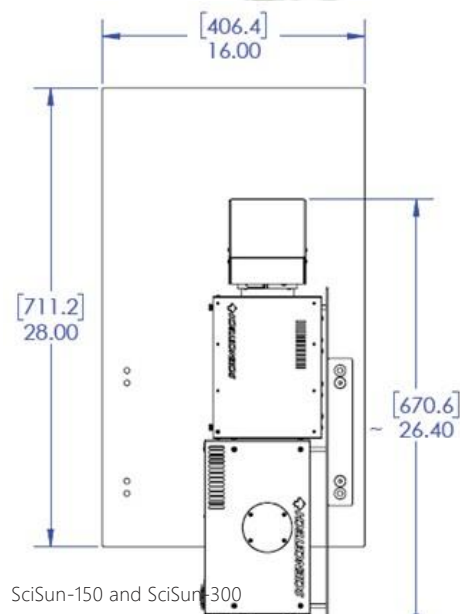
AM1.0D-FT-3: Includes AM1.0D Filter—Class A

AM1.5D-FT-3: Includes AM1.5D Filter—Class A

SciSun Solar Simulators

DIMENSIONS

Dimensions are in [mm] and inches.



360° beam output orientation options available.