

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones
con orientación en Instrumentación y Control**

**Síntesis de Nanoestructuras de Óxidos Metálicos utilizando
Energía Solar Concentrada**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Claudia Daniella Villa Miranda

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por
Claudia Daniella Villa Miranda

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez
Codirector de tesis

Dr. Hugo Alejandro Borbón Núñez
Codirector de tesis

Dr. Daniel Saucedo Carvajal

Dra. Ivett Zavala Guillén

Dra. Ana Karina Cuentas Gallegos



Dra. María del Carmen Maya Sánchez
Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Claudia Daniella Villa Miranda** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Instrumentación y Control.

Síntesis de Nanoestructuras de Óxidos Metálicos utilizando Energía Solar Concentrada

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez
Codirector de tesis

Dr. Hugo Alejandro Borbón Núñez
Codirector de tesis

La aplicación de nanomateriales en diversas áreas como electrónica, agricultura, medicina, desalinización y tratamiento de agua, entre otras, ha crecido notablemente en las últimas décadas debido a sus propiedades únicas en comparación con los materiales a escala macroscópica. Los nanomateriales más utilizados hasta el momento son los óxidos metálicos, entre los cuales figura el óxido de zinc, un semiconductor relativamente económico, estable en ambientes hostiles y con propiedades ópticas y eléctricas adecuadas para diversos procesos industriales. Tanto para el óxido de zinc como para la mayoría de los nanomateriales, el proceso de síntesis se caracteriza por consumir cantidades elevadas de energía, normalmente proveniente de combustibles fósiles, y por tener una producción limitada. En respuesta a ello se ha venido realizando un esfuerzo para desarrollar métodos de síntesis donde se aproveche alguna fuente de energía renovable. Por lo tanto, en este trabajo de tesis se propuso un método novedoso para sintetizar nanoestructuras de óxido de zinc utilizando energía solar concentrada. Se construyó un concentrador parabólico compuesto que fungió como reactor y donde se logró sintetizar nanoflores de óxido de zinc con la estructura cristalina de wurtzita por el método de auto-acoplamiento, en solución acuosa, en un intervalo de temperatura entre 50 y 70°C aproximadamente. También se sintetizó óxido de zinc de manera convencional en el laboratorio a 50, 60 y 70°C para fines comparativos. Se demostró la reproducibilidad de la síntesis solar mostrando estructuras tipo flor con un diámetro promedio de 2 μm , constituidas por láminas que varían en el rango de 27 a 52 nm. Dicha morfología fue distinta a las obtenidas en el laboratorio y tuvo mayor grado de cristalinidad. Asimismo, mediante la síntesis solar se logró incrementar la producción 15 veces en comparación al proceso convencional y por cada miligramo de nanomaterial sintetizado con energía solar se lograron reducciones entre 58% y 63%, aproximadamente, en energía eléctrica y emisiones de dióxido de carbono.

Palabras clave: nanomateriales, óxido de zinc, energía solar concentrada, concentrador parabólico compuesto, ahorro de energía.

Abstract of the thesis presented by **Claudia Daniella Villa Miranda** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Instrumentation and Control.

Synthesis of Metal Oxide Nanostructures Using Concentrated Solar Energy

Abstract approved by:

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez
Codirector de tesis

Dr. Hugo Alejandro Borbón Núñez
Codirector de tesis

The implementation of nanomaterials in numerous areas such as electronics, agriculture, medicine, desalination and water treatment, among others, has grown considerably in recent decades due to their unique properties compared to materials at macroscopic scale. Currently, the most widely used nanomaterials are metal oxides, including zinc oxide, a relatively inexpensive semiconductor which is stable in hostile environments and has optical and electrical properties that make it apt for various industrial processes. As for most nanomaterials, the synthesis of zinc oxide is also characterized by the consumption of large amounts of energy, usually obtained from fossil fuels, and by having limited productivity. In order to address this situation, efforts have been made to develop alternative methods of synthesis which involve the use of renewable energy sources. Therefore, in this work a novel method of synthesis to produce zinc oxide nanostructures using concentrated solar energy is proposed. A compound parabolic solar concentrator was built and used as reactor to produce zinc oxide nanoflowers with the Wurtzite crystalline structure through the self-coupling method in aqueous solution and in a temperature range between 50 to 70°C approximately. For comparison purposes, zinc oxide was also synthesized at 50, 60, and 70°C through a conventional method in laboratory conditions. The reproducibility of the solar synthesis was demonstrated, showing flower-like structures with an average diameter of 2 μm made of sheets that varied in the range from 27 to 52 nm. This morphology was different from that of the nanostructures obtained in the laboratory and had a higher degree of crystallinity. The solar synthesis method improved the production of zinc oxide by 15 times over the conventional process. In addition, for each milligram of nanomaterial synthesized with solar energy, reductions between 58% and 63%, approximately, were accomplished in the consumption of electrical energy and emissions of carbon dioxide.

Keywords: nanomaterials, zinc oxide, concentrated solar energy, compound parabolic concentrator, energy saving.

Dedicatoria

Para Mamá

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por aportarme el conocimiento e infraestructura para obtener el grado de Maestro en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme apoyo económico durante mis estudios.

A mis codirectores de tesis, Dr. Francisco Javier Carranza Chávez y Dr. Hugo Alejandro Borbón Núñez por su apoyo y paciencia. Gracias por darme la confianza y libertad de realizar este proyecto, llevo conmigo las lecciones académicas y personales.

Al Dr. Daniel Saucedo Carvajal, por haberme brindado sus conocimientos y soporte a lo largo de estos años. Por darme la oportunidad de trabajar en un área que me apasiona, gracias por su amistad y ser un maestro en todo el espectro.

A mis sinodales, Dra. Ivett Zavala Guillén y Dra. Ana Karina Cuentas Gallegos, gracias por ser parte de mi formación académica. Admiro su pasión por la ciencia y el conocimiento.

A Dios, por darme vida y propósito.

A mi prometido Abraham, mi mayor apoyo en esta odisea. Por haber sido compañero y cómplice. Te amo.

A mis padres, mi abuela y padrino, por estar orgullosos de mí sin importar la estación. A mi hermano, por ser una fuente de diversión e inspiración. Los amo.

A mis hermanas Florencia y Andrea, por ser mis más grandes fanáticas. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no puedo.

A mis compañeros de posgrado, por las risas y memorias.

Al equipo técnico de Física Aplicada; Anela y Fabián por su tiempo y apoyo, a Daniel y Francisco por su disposición, además de guiarme en áreas desconocidas del diseño mecánico.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Generalidades	1
1.1.2 Energía solar.....	4
1.1.3 Síntesis solar de nanomateriales.....	7
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivos	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2. Marco teórico.....	13
2.1 Descripción geométrica del concentrador solar CPC.....	13
2.2 Análisis óptico y térmico de un CPC.....	16
2.2.1 Eficiencia óptica.....	16
2.2.2 Radiación solar absorbida	17
2.2.3 Eficiencia térmica	21
2.3 Nanoestructuras de ZnO	24
Capítulo 3. Metodología.....	29
3.1 Procedimiento de síntesis convencional de las nanoestructuras de ZnO.....	29
3.2 Técnicas de caracterización de las nanoestructuras de ZnO	31
3.2.1 Espectroscopia Ultravioleta Visible	31
3.2.2 Difracción de Rayos-X.....	31

3.2.3	3.2.3 Espectroscopia Raman	32
3.2.4	Microscopia Electrónica de Barrido	33
3.3	Diseño y construcción del concentrador solar CPC.....	34
3.4	Procedimiento de síntesis solar de las nanoestructuras de ZnO	39
3.5	Matriz experimental.....	41
Capítulo 4. Resultados Experimentales		42
4.1	Caracterización de las nanoestructuras de ZnO sintetizadas convencionalmente.....	42
4.1.1	Difracción de rayos X (XRD).....	42
4.1.2	Espectroscopia Raman	43
4.1.3	Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	43
4.1.4	Espectroscopia UV-Visible.....	44
4.1.5	Espectroscopia de fotoluminiscencia	44
4.2	Caracterización del concentrador solar CPC	46
4.3	Caracterización de las nanoestructuras de ZnO sintetizadas con energía solar	50
4.4	Caracterización de las nanoestructuras solares.....	52
4.4.1	Espectroscopia UV-Visible.....	52
4.4.2	Difracción de rayos-X	52
4.4.3	Espectroscopia Raman	53
4.4.4	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	54
4.4.5	Fotoluminiscencia	55
Capítulo 5. Discusión.....		56
5.1	Análisis de nanoestructuras sintetizadas en laboratorio	56
5.2	Análisis de nanoestructuras sintetizadas con energía solar	57
5.3	Análisis del consumo energético y ahorro de emisiones de CO ₂	58
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro		60
6.1	Conclusiones.....	60
6.2	Recomendaciones para trabajo futuro	61
Literatura citada		63

Lista de figuras

Página

Figura 1. Tendencia del número de patentes publicadas en el periodo correspondiente a 2009-2021 (IRENA,2021).	3
Figura 2. Mapa de la radiación global horizontal promedio en México (Solargis, 2020).	3
Figura 3. Posibles configuraciones de colectores solares (a) colector de placa plana, (b) CPC, (c) PTC, (d) LFR y (e) campo de heliostatos.	6
Figura 4. Esquema de un concentrador solar CPC (Norton, n.d.).	7
Figura 5. (a) diseño del horno solar Heliotron (Barbe et al., 2022) (b) fotografía del horno solar Heliotron (Negrea et al., 2012).	9
Figura 6. Diseño del horno solar presentado por Ceballos et al (Ceballos-Mendivil et al., 2015b).	10
Figura 7. Diagrama del sistema de síntesis solar propuesto por Carvajal-Campos et al (Carvajal-Campos et al., 2019a).	10
Figura 8. Diagrama de la síntesis de Fe ₃ O ₄ propuesto por Jadhav et al (Jadhav et al., 2018).	10
Figura 9. Sección transversal del CPC con absorbedor circular.	13
Figura 10. Curva involuta y tubo absorbedor.	14
Figura 11. Variación de C con respecto al truncamiento.	15
Figura 12. Trazado de rayos en la mitad del CPC diseñado.	17
Figura 13. Distribución de la radiación incidente sobre el tubo absorbedor del CPC.	17
Figura 14. CPC con ángulo de inclinación β hacia el sur en el hemisferio norte.	19
Figura 15. Esquema de la trayectoria aparente del Sol en el plano horizontal.	19
Figura 16. Ángulo hora ω_h	20
Figura 17. Mecanismos de transferencia de calor en el CPC.	22
Figura 18. Circuito térmico del CPC.	23
Figura 19. Estructuras químicas del óxido de zinc (a) sal de roca, (b) blenda de zinc y (c) wurtzita. Las esferas grises y negras representan átomos de zinc y oxígeno respectivamente.	26
Figura 20. (a) Estructura cristalina de ZnO en fase wurtzita, (b) celda unitaria de wurtzita, (c) coordinación tetraédrica del ZnO (A K Bhunia, P K Jha, D Rout, 2016).	26
Figura 21. Modos vibracionales resents en el ZnO (Klingshirn et al., 2010).	26

Figura 22. Representación de la teoría de bandas en ZnO.	27
Figura 23. Procedimiento de síntesis convencional de ZnO.	30
Figura 24. Arreglo experimental utilizado en la síntesis convencional de ZnO: a) R1 denota la disolución de Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O y R2 el goteo de la disolución de NaOH, (b) periodo de reposo de 8 h a temperatura ambiente.	30
Figura 25. Espectrofotómetro AVANTES-2048 utilizado para realizar pruebas de transmisividad: (a) fuente de luz, (b) fibra óptica y porta-muestras.	31
Figura 26. Difractómetro Philips X'pert MPD.	32
Figura 27. Espectroscopio Raman marca AVANTES: (a) Fuente láser (b) microscopio.	33
Figura 28. Microscopio electrónico de barrido utilizado para conocer la morfología del ZnO sintetizado: (a) microscopio, (b) Equipo de pulverización catódica utilizado.	33
Figura 29. Perfil del concentrador CPC evaluado a diferentes valores de θ_a (a) y r (b).	34
Figura 30. Sección transversal del CPC diseñado.	36
Figura 31. Vista isométrica del concentrador solar CPC y sus componentes: sensor de temperatura RTD (1), medidor de flujo (2), válvulas de paso (3 y 5), bomba (4), perfiles de PVC (6), tubo absorbedor de acero inoxidable (7) y lámina reflectora (8). Las flechas indican el sentido del flujo. Las dimensiones están en mm.	36
Figura 32. (a) Proceso de doblado de lámina (b) perfiles y lámina ensamblada.	37
Figura 33. Vista frontal (a) y posterior (b) del concentrador solar CPC, y sus componentes: sensor de temperatura RTD (1), medidor de flujo (2), válvulas de paso (3, 5, 9), bomba (4), perfiles de PVC (6), tubo absorbedor de acero inoxidable (7) y lámina reflectora.	38
Figura 34. Vista lateral del concentrador solar CPC.	38
Figura 35. Piranómetro Kipp & Zonen modelo CMP 21.	39
Figura 36. Procedimiento de síntesis solar de ZnO.	40
Figura 37. (a) Inicio de la síntesis: R1 es la solución de Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O, R2 es la solución de NaOH y R3 es el agua destilada. (b) Producto recolectado: S1 denota la solución de ZnO sintetizado.	40
Figura 38. Patrón de difracción de rayos X de nanoestructuras de ZnO obtenidas a partir de la síntesis convencional en laboratorio. L1 corresponde a la síntesis a 50°C, L2 a la síntesis a 60°C y L3 a la síntesis a 70°C (Wang et al., 2011).	42
Figura 39. Espectro Raman para nanoestructuras de ZnO sintetizadas de manera convencional. L1 corresponde a la síntesis a 50°C, L2 a la síntesis a 60°C y L3 a la síntesis a 70°C.	43
Figura 40. Imágenes de nanoestructuras de ZnO (a) Nanoestructuras sintetizadas a 50°C (b) Nanoestructuras sintetizadas a 60°C (c) Imagen de nanoestructuras de ZnO sintetizadas a 70°C.	44

Figura 41. Espectro de transmitancia para ZnO sintetizado a tres diferentes temperaturas.	45
Figura 42. Espectro de fotoluminiscencia para ZnO sintetizado a tres diferentes.	45
Figura 43. Radiación global horizontal (RGH) acumulada y temperatura ambiente (T_{amb}) medidas durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.	47
Figura 44. Temperatura externa de la superficie del absorbedor (T_{tubo}) registrada durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.	47
Figura 45. Temperatura del fluido (T_{fluido}) monitoreada durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.	48
Figura 46. Temperaturas de los tubos absorbedores este ($T_{s,este}$) y oeste ($T_{s,oeste}$), y diferencia de temperatura ΔT_s	49
Figura 47. RGH y T_{amb} registrados durante los tres días de síntesis solar etiquetados como S1, S2 y S3 en la Tabla 5.	50
Figura 48. Valores de T_{fluido} medidos durante los tres días de síntesis solar etiquetados como S1, S2 y S3 en la Tabla 5.	51
Figura 49. Espectro de reflectancia del ZnO sintetizado con energía solar.	52
Figura 50. Difractograma de las nanoestructuras ZnO (S1, S2 y S3) sintetizadas con energía solar.	53
Figura 51. Espectro Raman para ZnO sintetizado con energía solar.	54
Figura 52. Imágenes de SEM de nanoestructuras de ZnO solar.	54
Figura 53. Fotoluminiscencia emitida por ZnO solar.	55

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. Tipos de colectores y concentradores solares (S. A. Kalogirou, 2009).....	5
Tabla 2. Ecuaciones de transferencia de calor (Hsieh, 1981) (Incropera Frank P., 2000).	22
Tabla 6. Matriz experimental.....	41
Tabla 7. Características y propiedades presentadas por las nanoestructuras sintetizadas.	58
Tabla 8. Consumo energético específico y emisiones de CO ₂ correspondientes para tres de las síntesis.	59
Tabla 9. Ahorros de energía, de emisiones de CO ₂ y económico.	59

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Generalidades

La investigación y comercialización de nanomateriales ha tenido un alza en los últimos años debido a las propiedades particulares que exhiben con respecto a materiales en escala macroscópica (Murty et al., 2013). La nanotecnología se basa en manipular átomos y moléculas de distintos elementos químicos con el fin de obtener materiales con dimensiones menores a los 100 nm. Esta rama ingenieril posibilita crear diferentes arreglos geométricos y químicos, accediendo a una amplia gama de materiales con propiedades novedosas. Debido a sus singularidades, la aplicación de nanomateriales es extensa, y son comúnmente utilizados en áreas como electrónica, agricultura, medicina, telecomunicaciones, almacenamiento de energía, desalinización de agua de mar y tratamiento de aguas residuales (Carranza et al., 2021; Serrano et al., 2009; Siddiquee et al., 2019; Ceballos-Mendivil et al., 2015a).

Existen múltiples tipos de nanomateriales, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo con diferentes características como: dimensión, método de síntesis, propiedades y composición química. De acuerdo con ésta última se puede dividir a los nanomateriales en orgánicos e inorgánicos (Chien et al., 2011a). Dentro de la primera subdivisión se encuentran los nanomateriales a base de carbono, mientras que en la segunda se encuentran los derivados de metales, óxidos metálicos y materiales híbridos. Particularmente los óxidos metálicos tienen un papel importante dentro de la ciencia de materiales, puesto que son altamente utilizados debido al vasto número de geometrías estructurales que pueden adoptar. Asimismo, pueden exhibir comportamientos de carácter metálico, semiconductor o incluso dieléctrico. Además, una ventaja importante que tienen sobre otros nanomateriales es el costo de la síntesis, el cual puede ser significativamente menor (Pudukudy & Yaakob, 2015).

Entre los óxidos metálicos más utilizados se encuentra el óxido de zinc (ZnO), un semiconductor importante para diversas aplicaciones debido a su relación costo-beneficio y con el cual se eligió trabajar en esta tesis. El ZnO posee propiedades ópticas y eléctricas distintivas, entre las que destacan un amplio ancho de banda prohibida (3.3 eV), alta energía de enlace excitónica (60 meV) y una absorptividad mayor

al 90% en el espectro ultravioleta (Tay et al., 2010). Debido al valor de su ancho de banda prohibida, las nanoestructuras de ZnO pueden trabajar en ambientes químicos hostiles y de temperaturas altas. En la actualidad se ha probado exitosamente en diferentes áreas como sensores de gas, celdas solares, transistores, en procesos fotocatalíticos y destilación solar (Borbón-Nuñez, 2010) (Tay et al., 2010) (Carranza et al., 2021).

Otra característica atractiva del ZnO es que puede adoptar diferentes morfologías a escala nanométrica, tales como nanocables, nanohélices, nanoflores, nanohojuelas, entre otros, siendo el método de síntesis el principal factor que influye en la morfología adoptada por el ZnO. Los métodos de síntesis más utilizados para el crecimiento de ZnO son: hidrotérmal, vapor-sólido, depósito químico de vapor, depósito físico de vapor, microondas y sol-gel (Klingshirn et al., 2010). Sin embargo, los parámetros de síntesis, el alto costo energético y procesos de síntesis no escalables son las principales barreras para abastecer el sector tecnológico de nanomateriales de forma industrial. En respuesta a ello, en los últimos años se ha realizado un esfuerzo para migrar de los métodos de síntesis convencionales a metodologías más amigables con el medio ambiente, denominadas síntesis verdes (Yao et al., 2013).

Una de las áreas en las que se involucran las síntesis verdes es la disminución del consumo energético y la aplicación de fuentes renovables. En consecuencia, existe un gran interés en mejorar los procesos de manufactura, transformando el uso de energía y utilizando técnicas eficientes. La aplicación de energías renovables permite abastecer la demanda energética de dichos procesos, disminuyendo el impacto ambiental y el costo económico. Existe un espectro de recursos renovables de los cuales es posible obtener energía como: bioenergía, energía geotérmica, uso de hidrógeno, energía mareomotriz, energía solar y eólica. En la Figura 1 se exhiben el número de patentes publicadas correspondientes a las diferentes fuentes de energía renovable. Es de notar el incremento considerable del número de trabajos propuestos desde 2009 hasta la actualidad (IRENA, 2021).

La tendencia en la investigación se mantiene a lo largo de los años, en primer lugar, se encuentran las patentes de investigación en energía solar fotovoltaica, seguido por energía eólica y en tercer lugar la energía solar térmica. Dichos datos concuerdan con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) destacando que la aplicación de energía solar es la rama con mayor investigación. Debido a que la adaptación de sistemas de energía renovable es estrechamente dependiente de la zona geográfica, la aplicación se mantiene a disposición de los recursos, limitando el uso de fuentes renovables; por consecuencia, la energía solar es la tecnología con mayor interés siendo la

fuentes con mayor disponibilidad. Sin embargo, México es uno de los países con mayor diversidad de recursos y con una capacidad energética significativa, específicamente en energía solar.

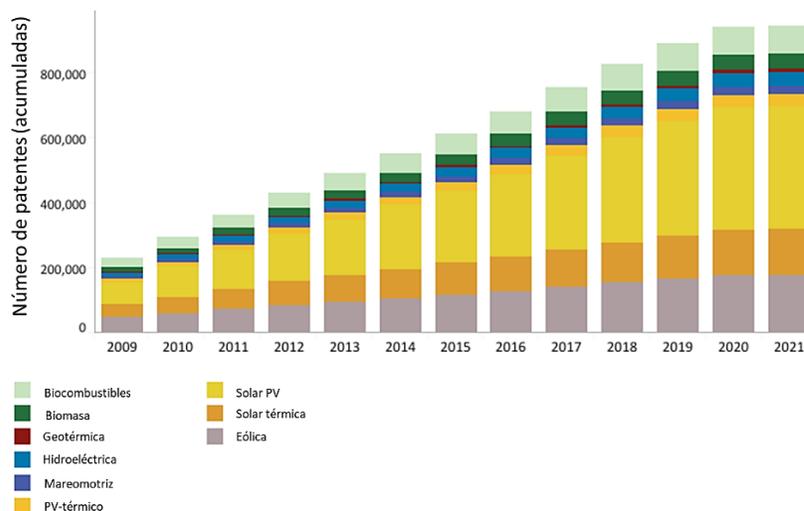


Figura 1. Tendencia del número de patentes publicadas en el periodo correspondiente a 2009-2021 (IRENA, 2021).

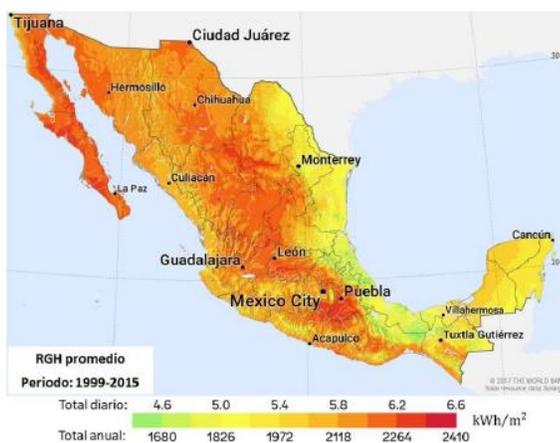


Figura 2. Mapa de la radiación global horizontal promedio en México (Solargis, 2020).

México se encuentra dentro de la conocida “franja solar”, la cual es una sección del globo terráqueo entre los 30° de latitud norte y sur respecto al ecuador, donde se registran niveles anuales de radiación global horizontal (RGH, por sus siglas en inglés) mayores a los 1900 kWh/m² (Solargis, 2020). La zona norte de nuestro país es una de las áreas con mayor radiación incidente por lo que se considera una región óptima

para la aplicación de dispositivos que aprovechen la radiación solar como los colectores solares. En la Figura 2 se proporciona un mapa de la radiación solar disponible en el país, donde se puede observar que los estados con mayor RGH promedio son Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Sonora, Sinaloa y Baja California (Solargis, 2020).

1.1.2 Energía solar

La radiación solar es radiación electromagnética emitida por el sol, debido a su naturaleza es posible aprovecharla y transformarla en diferentes formas de energía útil. Existen dos sectores tecnológicos para el aprovechamiento de energía solar; energía fotovoltaica (PV, por sus siglas en inglés) y energía térmica. La tecnología más común y conocida en la actualidad es la aplicación de sistemas PV, estos arreglos absorben la energía proveniente del sol por medio de celdas fotovoltaicas, creando un flujo de cargas y en consecuencia la obtención de electricidad. Los sistemas de energía térmica funcionan absorbiendo o concentrando de manera directa la radiación para la generación de calor (Duffie & Beckman, 2013). Los sistemas más eficientes son los concentradores solares, que utilizan espejos para reflejar y concentrar la luz solar hacia receptores (también conocidos como absorbedores) que colectan la energía y la convierten en calor.

La energía térmica generada puede ser usada para producir electricidad o aprovechar directamente el calor para distintos procesos industriales. Dentro de los dispositivos solares térmicos más comunes se encuentran los colectores de placa plana, que convierten la radiación solar en energía térmica y posteriormente la transfieren a un fluido (usualmente agua o aire). Sin embargo, como se observa en la Tabla 1 este tipo de colector es considerado un sistema de baja temperatura, por lo cual se utiliza comúnmente dentro del sector residencial para aplicaciones como calentamiento de agua y refrigeración (aire acondicionado) (Duffie & Beckman, 2013). Para aplicaciones a nivel industrial la demanda de calor es superior a los 80°C, sobrepasando la capacidad de los colectores de placa plana, por lo que se han desarrollado dispositivos concentradores de radiación solar que alcanzan mayores temperaturas.

Los concentradores solares son dispositivos generadores de calor que concentran la radiación solar incidente sobre un área reducida llamada absorbedor. La temperatura de trabajo varía desde los 60°C hasta los 2000°C, dependiendo del diseño del sistema como se observa en la Tabla 1. El fundamento de los concentradores solares está basado en disminuir el área donde ocurre la pérdida de calor. Esto se puede realizar interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (el Sol) y la superficie

absorbedora de energía. En este sentido, un absorbedor pequeño tendrá menores pérdidas de calor comparado con un colector plano aún teniendo la misma temperatura de operación (Duffie & Beckman, 2013). Existen diversos diseños de concentradores solares, los cuales pueden ser reflectores o refractores, mientras que los absorbedores pueden ser planos, cóncavos o convexos.

Tabla 1. Tipos de colectores y concentradores solares (S. A. Kalogirou, 2009).

Tipo de colector	Temperatura de trabajo (°C)	Movimiento
Colector de placa plana	30 – 80	Estacionario
Concentrador parabólico compuesto	60 – 240	Estacionario
Concentrador de tiro parabólico	60 – 400	Seguimiento solar en un eje
Reflector lineal Fresnel	60 – 250	Seguimiento solar en un eje
Concentrador de disco parabólico	100 – 1500	Seguimiento solar en dos ejes
Concentrador de campo de heliostatos	150 – 2000	Seguimiento solar en dos ejes

La geometría utilizada en los concentradores es estrechamente dependiente de la aplicación (Rabl et al., 1979). La temperatura objetivo, la radiación disponible y la ubicación geográfica son los principales factores que intervienen en el desempeño de los concentradores, por lo tanto, son las variables que se tienen que considerar al diseñar el sistema. Existen diferentes tecnologías en el campo de los concentradores solares (Pranesh et al., 2019). Dentro de los sistemas más utilizados se encuentran los concentradores parabólicos compuestos (CPC, por sus siglas en inglés), concentradores de tiro parabólico (PTC, por sus siglas en inglés), reflector lineal Fresnel (LFR, por sus siglas en inglés), concentrador de disco parabólico (PDC, por sus siglas en inglés) y los heliostatos (Duffie & Beckman, 2013).

En la Figura 3 se observan distintos arreglos propios de los colectores mencionados anteriormente. En la Figura 3 (a) se representa al colector de placa plana, el cual absorbe la radiación solar de manera directa y posteriormente transfiere el calor por conducción a los tubos. En la Figura 3 (b) se destaca el diseño del CPC, éste refleja la radiación incidente hacia el receptor ubicado en la base del concentrador a partir de las reflexiones realizadas por los reflectores parabólicos. El diseño de la Figura 3 (c) es representativo del PTC, éste refleja la radiación perpendicular incidente hacia el foco de la parábola donde se encuentra el absorbedor. El diagrama de la Figura 3 (d) pertenece al LFR, éste constituye un arreglo de reflectores unitarios siguiendo el principio del PTC, por último, se observa el campo de heliostatos en la Figura 3 (e),

éste es un arreglo de reflectores planos los cuales reflejan la radiación hacia una torre central (absorbedor).

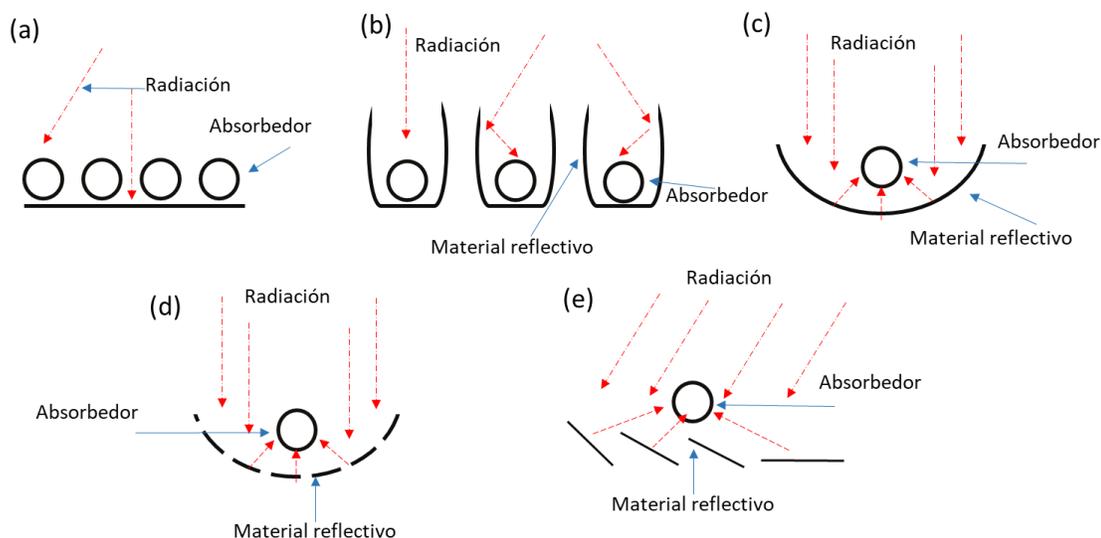


Figura 3. Posibles configuraciones de colectores solares (a) colector de placa plana, (b) CPC, (c) PTC, (d) LFR y (e) campo de heliostatos.

A partir de la información descrita en la Tabla 1 y de la Figura 3 se puede observar que el diseño e implementación de concentradores como PTC, LFR y heliostatos tienen un grado mayor de complejidad para su aplicación en comparación a los colectores de placa plana y CPC. Uno de los principales obstáculos es el requerimiento de un sistema de seguimiento solar, sea en un solo eje o dos, lo que incrementa la inversión en materiales y diseño. Además, por la naturaleza de estos sistemas, es necesario disponer de grandes extensiones de terreno plano con alta incidencia de radiación solar directa lo que limita su implementación a segmentos geográficos específicos.

En este trabajo de tesis se eligió trabajar con un colector CPC porque al ser estacionario resulta más económico que otros concentradores y también es capaz de aprovechar tanto la radiación directa como la radiación difusa, la cual es significativa en la zona costera de Ensenada, Baja California (Solargis, 2020), donde se llevaron a cabo los experimentos. En la literatura se puede encontrar una diversidad de diseños de CPCs, de acuerdo con la aplicación específica para la cual se quiere utilizar (Hsieh, 1981). En la Figura 4 se muestra el esquema de un CPC con sus componentes principales: reflector, tubo receptor y tubo de vidrio. Su funcionamiento es simple: la radiación solar incide sobre la superficie reflectora, ésta refleja la radiación hacia el punto focal de la parábola donde se encuentra el tubo receptor, y, por último, el tubo de vidrio reduce la pérdida de calor hacia el ambiente.

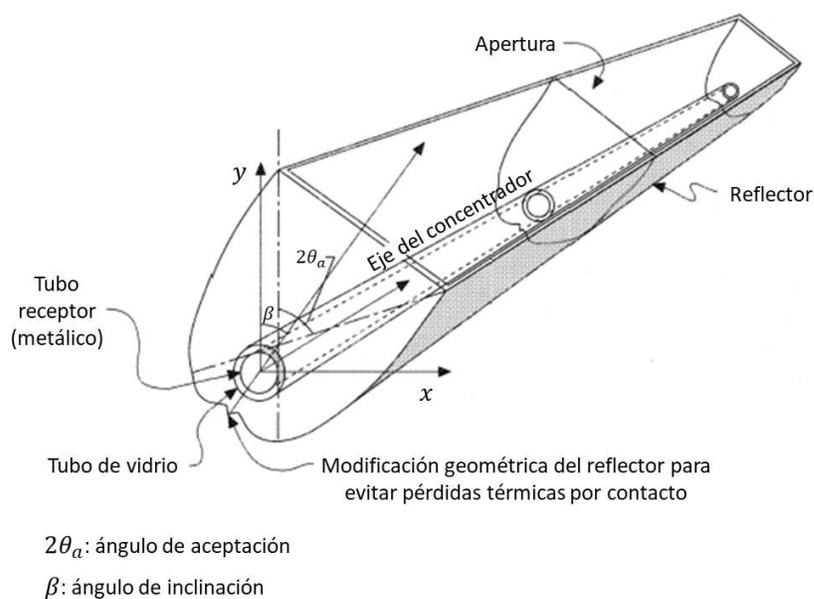


Figura 4. Esquema de un concentrador solar CPC (Norton, 2013).

1.1.3 Síntesis solar de nanomateriales

La síntesis química por auto ensamblaje es una de las metodologías convencionales que posee alta viabilidad para ser implementada con energía solar de forma escalable, debido a que su rango de temperatura de síntesis oscila de 50°C a 100°C (Murty et al., 2013). Estas temperaturas son fácilmente alcanzables con colectores solares de acuerdo con la literatura consultada, como se muestra en la Tabla 1 (S. A. Kalogirou, 2009). En relación con lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se buscó evaluar el potencial de sintetizar nanoestructuras de ZnO a partir del calor producido por un concentrador parabólico compuesto mediante un método de síntesis químico.

En los últimos años se ha observado una tendencia a desarrollar métodos de síntesis más amigables con el medio ambiente, menor impacto ambiental y bajo consumo energético. Una alternativa dentro de estos métodos es la aplicación de energía solar concentrada. El primer intento reportado sobre el aprovechamiento de la radiación solar para sintetizar nanoestructuras fue llevado a cabo por Chien et al. (Chien et al., 2011b), quienes lograron obtener nano-decaedros de oro (Au) a partir de una sal metálica (HAuCl₄) en una solución acuosa. La reacción tomó un tiempo de 5 h y no se requirió ningún dispositivo de concentración de la radiación solar, simplemente se colocó la solución bajo la radiación solar incidente. Esta clase de metodología no se considera apta para cualquier zona geográfica, pues la intensidad de la radiación incidente varía de un lugar a otro. En cambio, si se utiliza un dispositivo concentrador, se asegura que se alcance la energía requerida por el proceso.

El primer experimento que utilizó energía solar concentrada fue el propuesto por Flamant (Flamant et al., 1999), quienes lograron diseñar y construir un horno solar para sintetizar microestructuras por la técnica de vaporización física, también conocida como PVD por su nombre en inglés. Esta técnica se basa en incidir un haz de luz sobre un objetivo provocando la erosión del material para obtener partículas de menor tamaño. El dispositivo construido, llamado Heliotron, se ilustra en la Figura 5. El Heliotron cuenta con un disco parabólico que concentra la energía reflejada por un heliostato, donde el flujo de energía tiene una potencia de 1 kW e incide sobre la muestra a erosionar en un área de 12 mm².

El dispositivo Heliotron ha sido utilizado en múltiples ocasiones para la síntesis de diferentes tipos de nanomateriales. En 1998 Flamant et al (Flamant et al., 1999) demostraron la capacidad de sintetizar nanotubos de carbón a partir de una mezcla en polvo de carbón y un catalizador. Laplaze et al (D Laplaze et al., 1996) utilizaron esta misma metodología para sintetizar fullerenos manipulando variables como flujo y presión. Posteriormente Negrea (Negrea et al., 2012) reportó la obtención de nanopulvos de ZnO y óxido de titanio (TiO₂). El último trabajo reportado en la literatura utilizando este sistema fue realizado por Barbe et al. (Barbe et al., 2022), quienes lograron simular de manera teórica y validaron de manera experimental la síntesis de óxido de molibdeno (MoO₃) y disulfuro de molibdeno (MoS₂).

En otro trabajo sobre el aprovechamiento de energía solar concentrada para fabricar nanomateriales, Ceballos-Mendivil et al. (Ceballos-Mendivil et al., 2015b), sintetizaron carburo de silicio (SiC) por medio de la reducción carbotérmica de una resina orgánica en presencia de silicio. La reducción se llevó a cabo dentro de un horno solar a 1500°C durante 2 h. Dicho horno está constituido por un arreglo de concentradores y un heliostato, capaz de alcanzar temperaturas mayores a los 1800°C (Figura 6). Utilizando el mismo sistema (Figura 7) Carvajal-Campos et al. (Carvajal-Campos et al., 2019b), obtuvieron carburo de tántalo (TaC) a 1200°C con un tiempo de reacción de 30 min. En ambos trabajos se menciona la dificultad de obtener el carburo metálico puro debido que fue inevitable la formación de óxidos metálicos como óxido de silicio (SiO₂) y óxido de tántalo (Ta₂O₅), respectivamente (Figuras 6 y 7).

La investigación con mayor afinidad al trabajo que se plantea desarrollar en esta tesis es la realizada por Jadhav et al. (Jadhav et al., 2018), quienes utilizaron una lente tipo Fresnel para concentrar la radiación solar sobre un reactor de vidrio, donde aprovecharon la energía térmica generada, logrando obtener nanopartículas de óxido de hierro (Fe₃O₄) (Figura 8). La reacción se basó en la oxidación fotoquímica del Fe (II) a Fe (III) con una duración de 1.5 h. La temperatura de la solución se mantuvo en el intervalo 70-80°C. A pesar de que los autores lograron obtener de manera exitosa el producto deseado, el diseño y

construcción de una lente tipo Fresnel conlleva un costo económico considerable como se mencionó anteriormente, lo cual representa un obstáculo para escalar la producción.

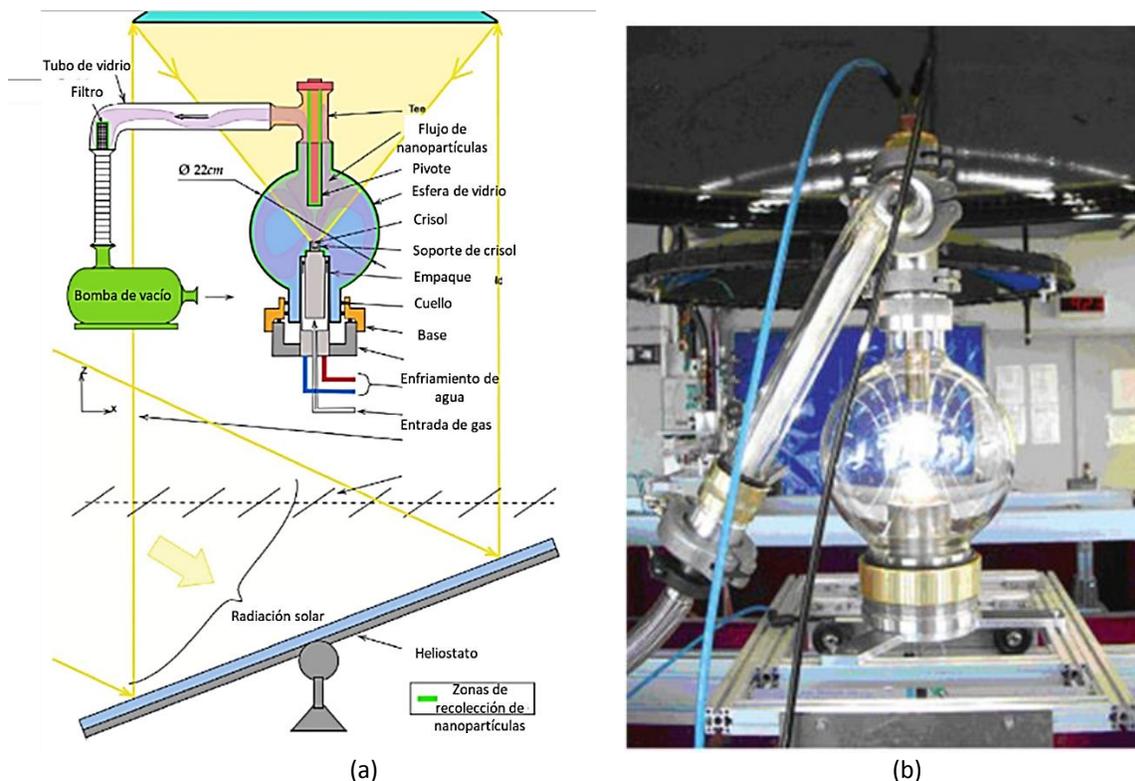


Figura 5. (a) diseño del horno solar Heliotron (Barbe et al., 2022) (b) fotografía del horno solar Heliotron (Negrea et al., 2012).

Cabe señalar que no fue posible encontrar trabajos adicionales en la literatura que emplearan una metodología parecida, lo que indica que el aprovechamiento de la energía solar para sintetizar nanomateriales de manera química es un área pobremente explorada a pesar de las ventajas ecológicas y económicas que plantea, ya que es un recurso renovable, gratuito y que no contamina. Además, en los trabajos citados prevalece la dificultad para escalar la síntesis de nanomateriales a una escala de producción mayor. En respuesta a esto, con el trabajo aquí planteado se pretende avanzar las investigaciones en este tema al evaluar la factibilidad de sintetizar nanoestructuras de ZnO mediante un concentrador solar CPC.

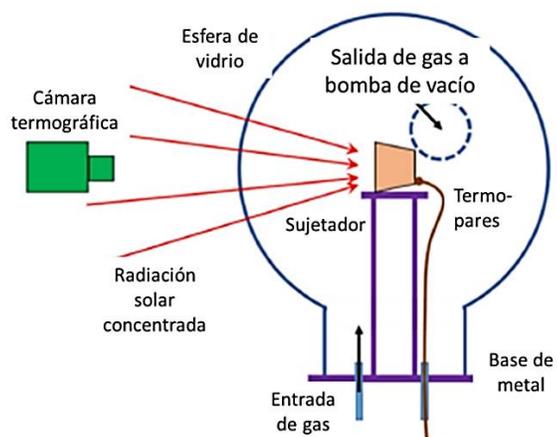


Figura 6. Diseño del horno solar presentado por Ceballos et al (Ceballos-Mendivil et al., 2015b).

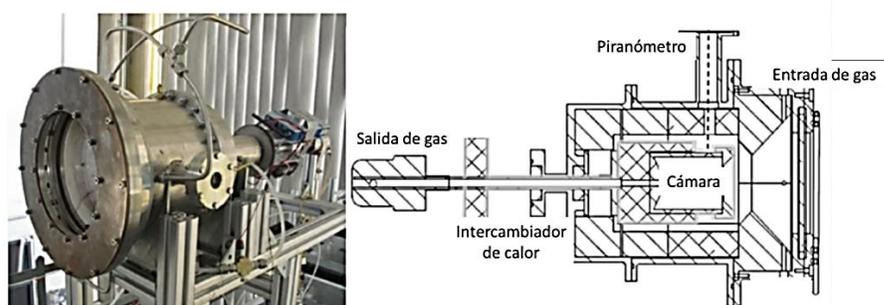


Figura 7. Diagrama del sistema de síntesis solar propuesto por Carvajal-Campos et al (Carvajal-Campos et al., 2019a).

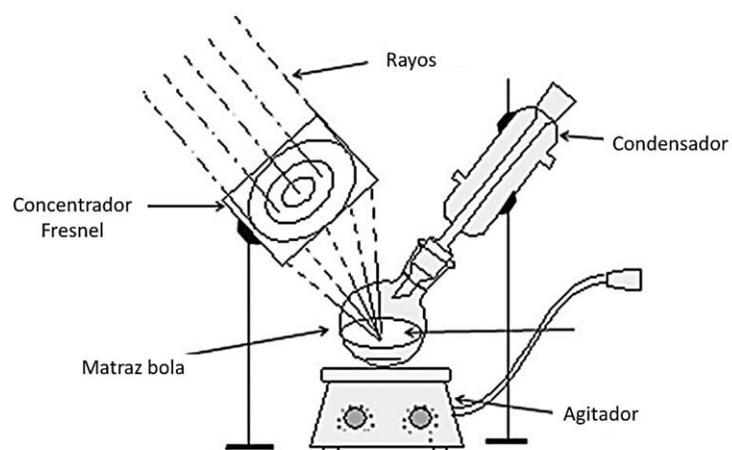


Figura 8. Diagrama de la síntesis de Fe_3O_4 propuesto por Jadhav et al (Jadhav et al., 2018).

1.2 Justificación

De acuerdo con las metas propuestas para el 2030 de desarrollo sustentable de las Naciones Unidas, la innovación y el desarrollo de tecnologías no sólo deben ser funcionales y económicamente viables, sino también seguras y sustentables con el propósito de asegurar el acoplamiento, regulación y aceptación por parte de los consumidores (Gottardo et al., 2021). El principio de la “nanotecnología sustentable” consiste en maximizar la funcionalidad y el desarrollo económico a la par que se minimizan los impactos adversos al medio ambiente y a la salud humana. Acorde a estas metas y principios es evidente que el desarrollo de síntesis verdes de nanomateriales es de vital importancia, sin embargo, los antecedentes presentados señalan que los estudios en el tema, específicamente donde se aprovecha la energía solar para sintetizar nanoestructuras, son significativamente escasos. La utilización de una fuente renovable como suministro de energía promueve la disminución de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), además de minimizar el costo de operación al evitar el uso de energía eléctrica convencional. Esto contribuiría también de forma notable a la escalabilidad en la producción de nanomateriales, ya que el alto consumo energético es uno de los principales obstáculos para tal fin (Basiuk & Basiuk, 2015).

1.3 Hipótesis

La utilización del concentrador parabólico compuesto permitirá abastecer la demanda energética para la síntesis de nanoestructuras de óxido de zinc. Se espera que el fluido en el sistema alcance temperaturas mayores a los 50°C por tiempo suficiente para realizar la síntesis bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Ensenada, Baja California.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad de sintetizar nanoestructuras de óxido de zinc potencialmente aplicables en los sectores de agua y energía mediante el uso de un concentrador solar parabólico compuesto.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir el concentrador solar CPC que se empleará en los experimentos.
- Sintetizar las nanoestructuras de ZnO en condiciones de laboratorio mediante el crecimiento en solución.
- Sintetizar las nanoestructuras de ZnO aprovechando directamente la radiación solar concentrada en el CPC.
- Caracterizar química y morfológicamente las nanoestructuras sintetizadas por ambos métodos para verificar la obtención de óxidos metálicos.
- Evaluar el consumo energético para ambos modelos de síntesis de nanomateriales.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Descripción geométrica del concentrador solar CPC

Como se mencionó en la Sección 1.1.2 en este trabajo de tesis se eligió trabajar con un concentrador solar parabólico compuesto (CPC) debido a su capacidad de aprovechar tanto la radiación directa como la difusa, ya que ésta es significativa en la zona costera de Ensenada. A diferencia del sistema mostrado en la Figura 4, la configuración con la que se trabajó en esta tesis no tiene un tubo de vidrio concéntrico sobre el absorbedor, pues se colocó una cubierta transparente que también ayuda a disminuir las pérdidas de calor por convección con el aire del ambiente. En la Figura 9 se proporciona un esquema de la sección transversal del CPC sin tubo de vidrio. Este sistema es capaz de reflejar hacia el absorbedor toda la radiación difusa y directa incidente sobre el área de apertura dentro del ángulo de aceptación $2\theta_a$, es decir, $-\theta_a \leq \theta_{inc} \leq \theta_a$, donde θ_{inc} es el ángulo de incidencia (Rabl, 1976b).

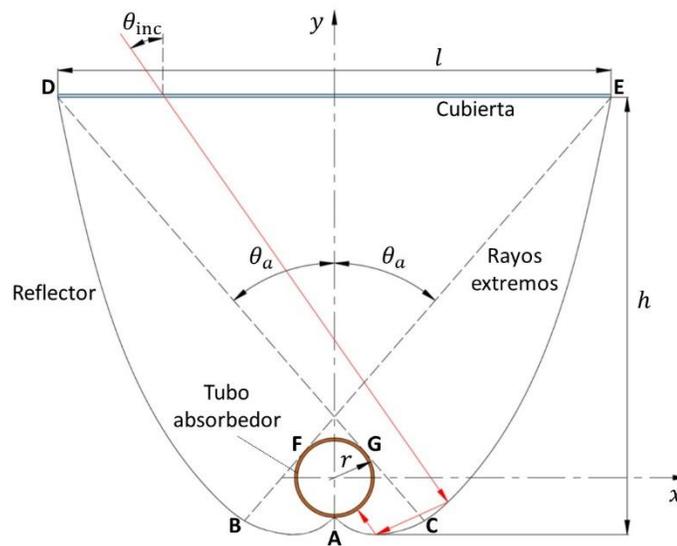


Figura 9. Sección transversal del CPC con absorbedor circular.

En la Figura 9 se observa que la geometría del reflector está compuesta por dos curvas involutas (A a B y A a C) y por dos parábolas (B a D y C a E). El diseño del reflector se realiza en consideración a dos variables: el radio externo del tubo absorbedor r y la mitad del ángulo de aceptación θ_a . En la Figura 10 se muestra un esquema ampliado del tubo absorbedor y la curva involuta, donde θ corresponde al ángulo medido

desde OA hasta OT y ρ representa la magnitud de la línea tangente TP. En base a las Figuras 9 y 10, las coordenadas x y y de ambos lados del reflector se definen de la siguiente manera:

$$x = r \sin \theta - \rho \cos \theta \quad (1)$$

$$y = -r \cos \theta - \rho \sin \theta \quad (2)$$

donde

$$\rho = r\theta \text{ para } |\theta| \leq \theta_a + \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\theta + \theta_a + 0.5\pi - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} \text{ para } \theta_a + \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \quad (4)$$

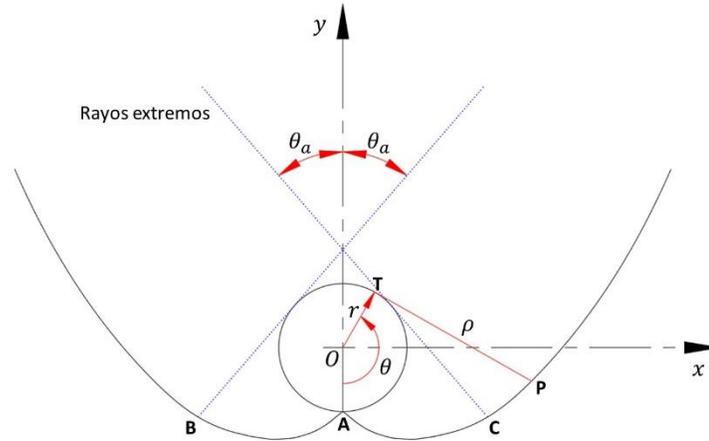


Figura 10. Curva involuta y tubo absorbedor.

La relación de concentración geométrica de cualquier sistema concentrador de radiación se define como la relación entre el área de apertura, $A_L = l \times \text{longitud}$, y el área externa del absorbedor, $A_S = 2\pi r \times \text{longitud}$, donde l es el ancho de apertura, por lo que para el CPC de la Figura 9 se escribe

$$C = \frac{l}{2\pi r} \quad (5)$$

La concentración máxima posible para un concentrador CPC, de acuerdo con (Rabl, 1976a)

$$C = \frac{1}{\text{sen } \theta_a} \quad (6)$$

Una particularidad del CPC es que la contribución de la parte alta de las parábolas a la concentración de energía es despreciable, por lo que usualmente se aplica un proceso conocido como truncamiento para ahorrar en material (Rabl, 1976a). En la Figura 11 se ilustra la variación de C con respecto al porcentaje de truncamiento para un CPC con $\theta_a = 30^\circ$, valor seleccionado en ésta tesis. Se puede observar que porcentajes grandes de truncamiento pueden aplicarse sin afectar la concentración notablemente. A partir de $\sim 90\%$ de truncamiento, C tiende a cero drásticamente (Rabl, 1987). El truncamiento que se decidió aplicar aquí fue del 50%, lo que redujo el valor de C a ~ 1.8 , como se observa en la figura, y permitió un ahorro de lámina reflejante de 41.3%. Asimismo, de un análisis matemático realizado por Rabl et al. (Rabl, 1976a), se encontró que la diferencia de altura total h de varios sistemas CPC con diferentes geometrías del receptor es relativamente pequeña. Debido a esto, por simplicidad en este trabajo se decidió utilizar las ecuaciones de un CPC plano propuestas por ellos para calcular los parámetros geométricos relevantes.

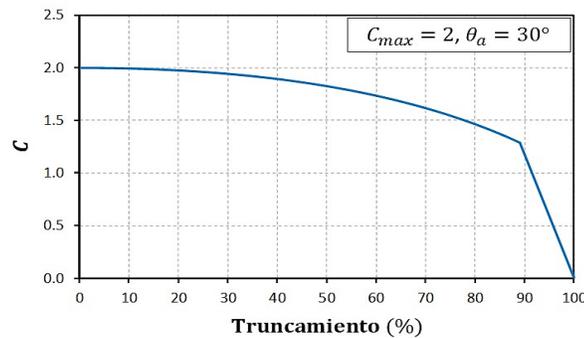


Figura 11. Variación de C con respecto al truncamiento.

De este modo, dado el ancho s del absorbedor plano y si la altura del sistema truncado se expresa como $h_t = 0.5h$, donde

$$h = \frac{s}{2} \left(1 + \frac{1}{\text{sen } \theta_a} \right) \cot \theta_a \quad (7)$$

el ancho de apertura l_t y el área del reflector $A_{ref,t}$ del CPC truncado se calculan con las siguientes ecuaciones

$$l_t = 2\bar{x} \cos \theta_a - \frac{\bar{x}^2}{s(1 + \sin \theta_a)} \sin \theta_a + s(\sin \theta_a - \cos^2 \theta_a) \quad (8)$$

$$A_{ref,t} = A_s(1 + \sin \theta_a) \ln \left[\frac{(\bar{x}/s) + \sqrt{(1 + \sin \theta_a)^2 + (\bar{x}/s)^2}}{\cos \theta_a + \sqrt{2(1 + \sin \theta_a)}} \right] + \frac{\bar{x}}{s} \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{x}}{s(1 + \sin \theta_a)} \right)^2} - \frac{\sqrt{2} \cos \theta_a}{\sqrt{1 + \sin \theta_a}} \quad (9)$$

donde

$$\bar{x} = s \left(\frac{1 + \sin \theta_a}{\cos \theta_a} \right) \left[-\sin \theta_a + \left(1 + \frac{h_t}{h} \cot^2 \theta_a \right)^{1/2} \right] \quad (10)$$

2.2 Análisis óptico y térmico de un CPC

2.2.1 Eficiencia óptica

Para conocer el comportamiento óptico de un sistema concentrador de radiación solar usualmente se realiza un estudio de trazado de rayos utilizando softwares especializados como TracePro o Tonatiuh, basados en el método de Montecarlo. Mediante el software TracePro se realizó un trazado de rayos en la mitad del CPC aquí diseñado, como se ve en la Figura 12. En total se emplearon 500 rayos, de manera perpendicular a la apertura, y a cada rayo se le asignó una potencia de 1 W. Los rayos que no inciden directamente al absorbedor son reflejados hacia éste por el reflector, formándose de esta manera la distribución de radiación sobre el absorbedor mostrada en la Figura 13. Dentro de este contexto se puede definir a la eficiencia óptica η_o del CPC como la relación entre la cantidad de energía absorbida por el tubo receptor, S , y la radiación solar incidente sobre la apertura, G_t , ambas expresadas por unidad de área de apertura:

$$\eta_o = \frac{S}{G_t} \quad (11)$$

Como se observa en la Figura 12, los rayos solares que no inciden directamente al tubo absorbedor experimentan cierto número de reflexiones antes de alcanzarlo. El número promedio de dichas reflexiones, n_i , se puede estimar con la siguiente ecuación (Rabl, 1976a)

$$n_i = \frac{A_{ref,t}}{A_s} \left[\frac{1}{2} - \frac{\bar{x}^2 - (s \cos \theta_a)^2}{2sA_{ref,t}(1 + \sin \theta_a)} \right] \quad (12)$$

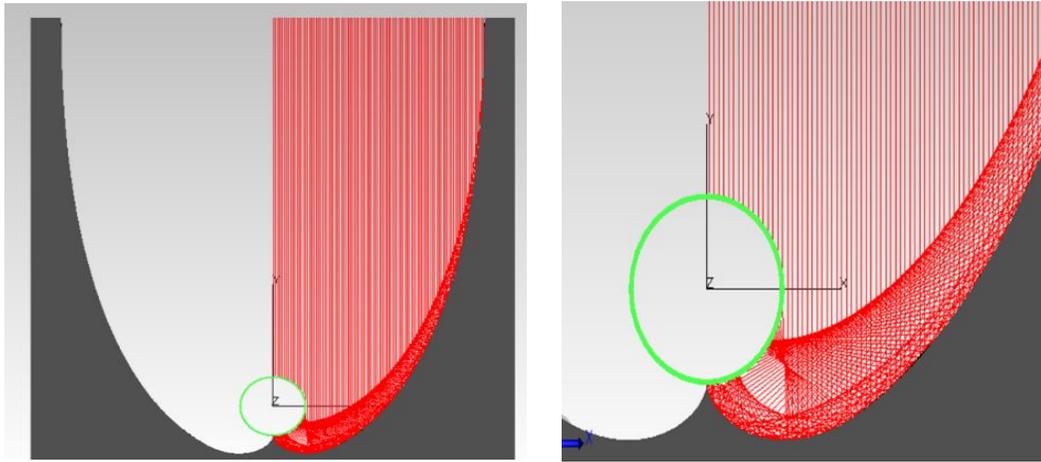


Figura 12. Trazado de rayos en la mitad del CPC diseñado.

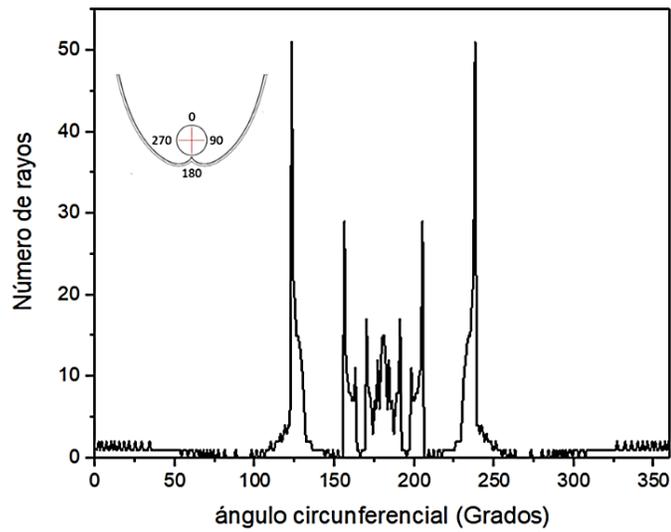


Figura 13. Distribución de la radiación incidente sobre el tubo absorbedor del CPC.

2.2.2 Radiación solar absorbida

La ecuación reportada por Duffie y Beckman (Duffie & Beckman, 2013) para determinar la radiación solar absorbida por el tubo receptor, por unidad de área de apertura, es

$$S = G_{b,CPC} \tau_{c,b} \tau_{CPC,b} \alpha_{a,b} + G_{d,CPC} \tau_{c,d} \tau_{CPC,d} \alpha_{a,d} + G_{g,CPC} \tau_{c,g} \tau_{CPC,g} \alpha_{a,g} \quad (13)$$

donde $G_{b,CPC}$, $G_{d,CPC}$ y $G_{g,CPC}$ corresponden a las porciones de radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada que llegan al absorbedor, y se calculan como sigue:

$$G_{b,CPC} = F G_{b,n} \cos \theta_{inc} \quad (14)$$

$$G_{d,CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{C} & \text{si } (\beta + \theta_a) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} + \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_a) > 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$G_{g,CPC} = \begin{cases} 0 & \text{si } (\beta + \theta_a) < 90^\circ \\ \frac{G \rho_g}{2} \left(\frac{1}{C} - \cos \beta \right) & \text{si } (\beta + \theta_a) > 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

En la Figura 14 se muestra un concentrador CPC con su plano de apertura inclinado β grados hacia el sur (es decir, inclinado hacia el ecuador en el hemisferio norte). También se bosqueja una superficie horizontal como referencia. La radiación que llega directamente del Sol a las superficies horizontal e inclinada se denomina $G_{b,n}$. Su proyección sobre un eje perpendicular a la superficie horizontal se llama G_b y sobre un eje perpendicular a la superficie inclinada se llama $G_{b,t}$. La radiación difusa que llega a la superficie horizontal es G_d , de modo que $G = G_b + G_d$. La radiación reflejada por el suelo, con reflectividad ρ_g , hacia el concentrador es G_g . El ángulo entre la vertical y el rayo solar se define como el ángulo cenital θ_z y su complemento se conoce como la altura solar α_{sol} , de modo que $\theta_z + \alpha_{sol} = 90^\circ$.

Si se utiliza un piranómetro para medir la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, G corresponde a la radiación global horizontal (RGH), G_d a la radiación difusa horizontal (RDH) y $G_{b,n}$ a la radiación normal directa (RND), determinada como

$$RND = (RGH - RDH) / \cos \theta_z \quad (17)$$

Como normalmente es difícil conocer las propiedades ópticas de los materiales para cada tipo de radiación, en la Ecuación (13) normalmente se asume que la transmisividad de la cubierta es $\tau_c \approx \tau_{c,b} \approx \tau_{c,d} \approx \tau_{c,g}$, la absorptividad del tubo receptor es $\alpha_a \approx \alpha_{a,b} \approx \alpha_{a,d} \approx \alpha_{a,g}$ y la transmisividad efectiva del CPC es $\tau_{CPC} = \tau_{CPC,b} = \tau_{CPC,d} = \tau_{CPC,g}$, donde

$$\tau_{CPC} = \rho_{ref}^{n_i} \quad (18)$$

siendo ρ_{ref} la reflectividad de la superficie reflejante. En la Ecuación (14) el valor de F es igual a 1 si se cumple la condición

$$(\beta - \theta_a) \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_a) \tag{19}$$

de lo contrario es igual a 0. El ángulo solar azimutal γ_s corresponde al ángulo entre la línea del Sol proyectada sobre el plano horizontal y el sur geográfico, como se ilustra en la Figura 15. Las ecuaciones para calcular θ_z , α_{sol} y γ_s (en el hemisferio norte) son

$$\sin \alpha_{sol} = \cos \theta_z = \sin(\text{Latitud}) \sin \delta + \cos(\text{Latitud}) \cos \delta \cos \omega_h \tag{20}$$

$$\gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega_h}{\cos \alpha_{sol}} \tag{21}$$

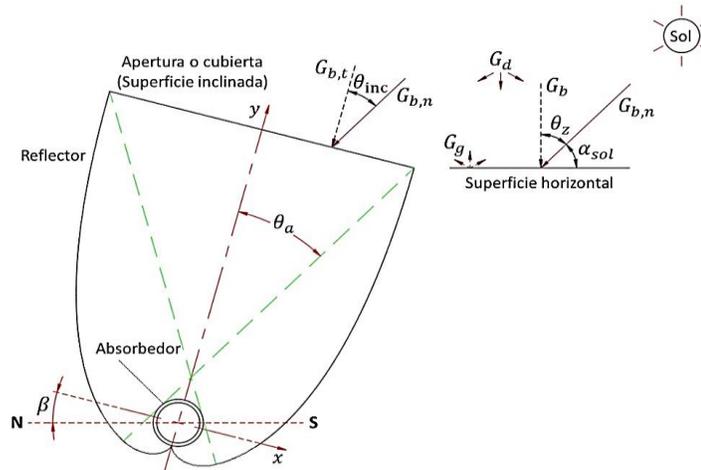


Figura 14. CPC con ángulo de inclinación β hacia el sur en el hemisferio norte.

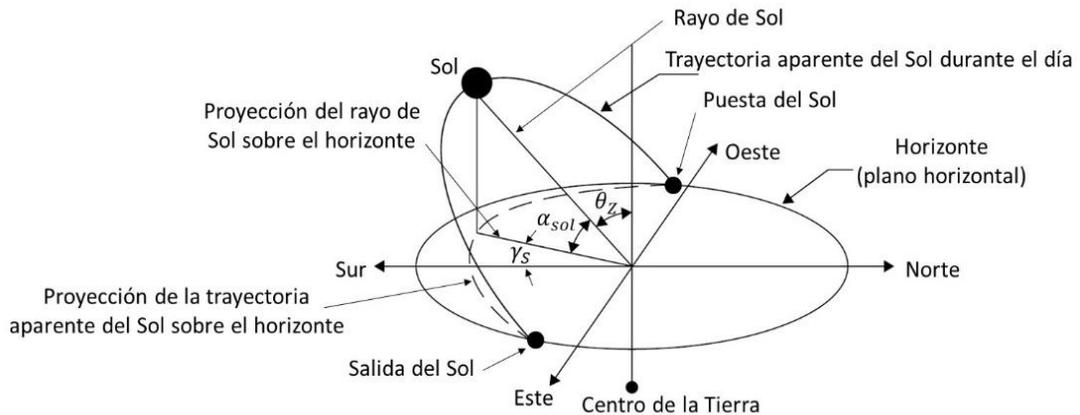


Figura 15. Esquema de la trayectoria aparente del Sol en el plano horizontal.

donde δ es la declinación solar definida como (Szokolay, 1996)

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (22)$$

siendo n es el día juliano, equivalente al número de días transcurridos en el año ($n = 1$ el primero de enero). En las Ecuaciones (20) y (21) ω_h es el ángulo horario, el cual equivale al desplazamiento angular del Sol de este a oeste a 15° por hora. De acuerdo con la Figura 16, ω_h se calcula como

$$\omega_h = \mp 0.25 \times \text{número de minutos respecto del mediodía solar} \quad (23)$$

siendo negativo por la mañana y positivo por la tarde. El tiempo solar se encuentra aplicando la siguiente ecuación

$$\text{Tiempo solar} - \text{Tiempo civil} = \pm 4(\text{Longitud estándar} - \text{Longitud local}) + E \quad (24)$$

donde

$$E = 9.87 \operatorname{sen}(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \operatorname{sen} B \quad (25)$$

$$B = (n - 81) \left(\frac{360}{364}\right) \quad (26)$$

En la ciudad de Ensenada: Longitud estándar= 120° Oeste y Longitud local= $116^\circ 36'$ Oeste.

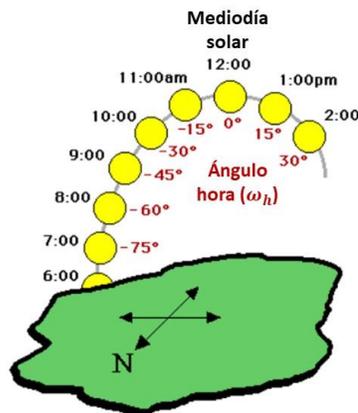


Figura 16. Ángulo hora ω_h .

El valor de β se estimó en base a la altura solar máxima $\alpha_{sol,max}$ en los días de experimentación, la cual se obtiene como sigue

$$\alpha_{sol,max} = 90 - \text{Latitud} + \delta \quad (27)$$

Una vez conocidos todos los ángulos involucrados, θ_{inc} para una superficie en el hemisferio norte inclinada hacia el sur se determina, en grados, como

$$\cos \theta_{inc} = \text{sen}(\text{Latitud} - \beta) \text{sen} \delta + \cos(\text{Latitud} - \beta) \cos \delta \cos \omega_h \quad (28)$$

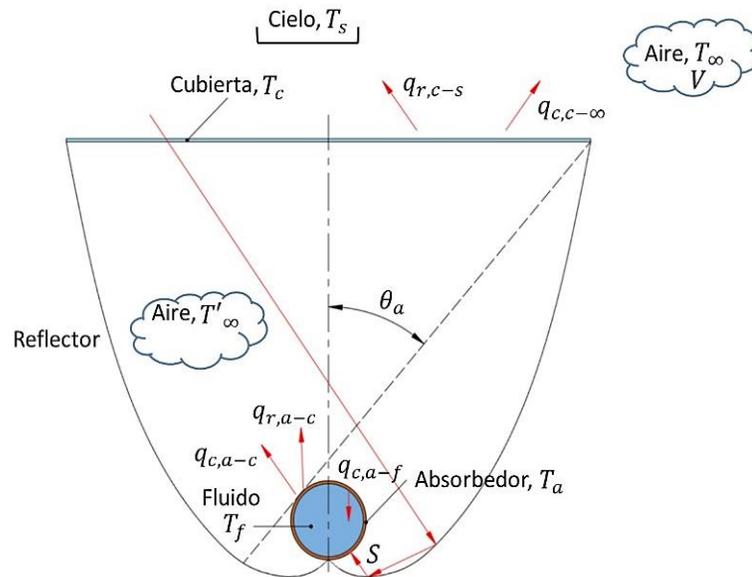
2.2.3 Eficiencia térmica

En la Figura 17 se muestran los mecanismos de transferencia de calor presentes en el concentrador CPC y en la Figura 18 se representa el circuito térmico equivalente. En las figuras T denota temperatura, q_c transferencia de calor por convección, q_r transferencia de calor por radiación, R_c resistencia térmica por convección, R_r resistencia térmica por radiación, R_{cond} resistencia térmica por conducción y V velocidad del viento. Igualmente, los subíndices a , c , f , s y ∞ , indican absorbedor, cubierta, fluido, cielo y aire. Debido a que el valor de ρ_{ref} es usualmente alto, la participación del reflector en el intercambio de calor se puede considerar despreciable (Tagle-Salazar et al., 2018). En la Tabla 2 se proporcionan las ecuaciones de transferencia de calor involucradas.

En las Ecuaciones (29) a (45) de la Tabla 2, h y h_r son los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación, respectivamente, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), U_{a-f} es el coeficiente de transferencia de calor desde la superficie externa del absorbedor hasta el fluido, r_i es el radio interno del absorbedor, k_a y k_f son las conductividades térmicas del absorbedor y del fluido, respectivamente, y por último, Nu , Re y Pr son los números adimensionales de Nusselt, Reynolds y Prandtl, correspondientemente.

Tabla 2. Ecuaciones de transferencia de calor (Hsieh, 1981) (Incropera Frank P., 2000).

Radiación térmica	Convección
Cubierta – cielo: $q_{r,c-s} = A_c \sigma \varepsilon_c (T_c^4 - T_s^4) \quad (29)$ $R_{r,c-s} = \frac{T_c - T_s}{q_{r,c-s}} = \frac{1}{h_{r,c-s} A_c} \quad (30)$ $h_{r,c-s} = \sigma \varepsilon_c (T_c + T_s)(T_c^2 + T_s^2) \quad (31)$	Cubierta – aire del ambiente: $q_{c,c-\infty} = A_c h_{c-\infty} (T_c - T_\infty) \quad (35)$ $R_{c,c-\infty} = \frac{T_c - T_\infty}{q_{c,c-\infty}} = \frac{1}{h_{c-\infty} A_c} \quad (36)$ $h_{c-\infty} = 5.7 + 3.8V \quad (37)$
Absorbedor – cubierta: $q_{r,a-c} = \frac{A_a \sigma (T_a^4 - T_c^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_a}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right) \frac{A_a}{A_c}} \quad (32)$ $R_{r,a-c} = \frac{T_a - T_c}{q_{r,a-c}} = \frac{1}{h_{r,a-c} A_a} \quad (33)$ $h_{r,a-c} = \frac{\sigma (T_a + T_c)(T_a^2 + T_c^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_a}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right) \frac{A_a}{A_c}} \quad (34)$	Absorbedor – aire en la cavidad: $q_{c,a-c} = A_a h_{a-c} (T_a - T_c) \quad (38)$ $R_{c,a-c} = \frac{T_a - T_c}{q_{c,a-c}} = \frac{1}{h_{a-c} A_a} \quad (39)$ $h_{a-c} = 3.25 + 0.0085 \frac{T_a - T_c}{4r} \quad (40)$
Conducción y convección	
Absorbedor – fluido: $q_{c,a-f} = U_{a-f} A_a (T_a - T_f) \quad (41)$ $U_{a-f} A_a = \frac{1}{R_{cond,a} + R_{c,a-f}} \quad (42)$ $= \left[\frac{r \ln(r/r_i)}{k_a} + \frac{1}{h_{a-f}(r_i/r)} \right]^{-1} \quad (42)$ $h_{a-f} = \frac{Nu k_f}{2r_i} \quad (43)$	Flujo laminar: $Nu = 4.36 \quad (44)$ Flujo turbulento: $Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{0.4} \quad (45)$

**Figura 17.** Mecanismos de transferencia de calor en el CPC.

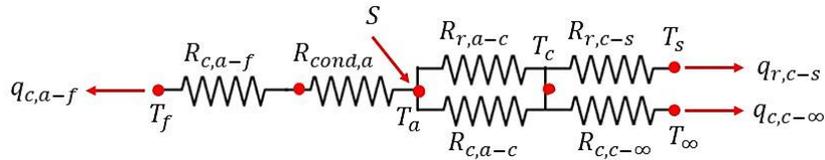


Figura 18. Circuito térmico del CPC.

El calor adquirido por el fluido entre las secciones de entrada y salida del tubo absorbedor puede determinarse por cualquiera de las siguientes dos ecuaciones

$$Q_u = \dot{m}c_{p,f}(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (46)$$

$$Q_u = A_L[S - U_L(\bar{T}_a - T_{\infty})] = F_R A_L[S - U_L(T_{f,i} - T_{\infty})] \quad (47)$$

donde $T_{f,i}$ y $T_{f,o}$ son las temperaturas del fluido en las secciones de entrada y salida del absorbedor, respectivamente, \dot{m} es el flujo másico, $c_{p,f}$ es el calor específico del fluido, U_L es el coeficiente global de pérdidas de calor (expresado por unidad de área de apertura), \bar{T}_a es la temperatura promedio del absorbedor y F_R es el factor de remoción de calor, expresado como

$$F_R = \frac{\dot{m}c_{p,f}C}{A_L U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_L U_L F'}{\dot{m}c_{p,f}C}\right) \right] \quad (48)$$

siendo F' el factor de eficiencia del colector, definido como

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (49)$$

donde U_0 es el coeficiente de transferencia de calor desde el fluido hasta el ambiente. De este modo U_0 es el inverso de la resistencia térmica equivalente de todo el circuito térmico de la Figura 18, mientras que U_L es el inverso de la resistencia térmica equivalente desde la superficie externa del absorbedor hasta el ambiente. Para poder resolver el circuito térmico se asume que $T_s \approx T_{\infty}$. Los factores F' y F_R son un indicativo de la ganancia de calor real del colector respecto a la ganancia que existiría si T_a fuera igual a T_f en cada sección transversal del tubo, o bien si T_a fuera igual a $T_{f,i}$. Una vez conocida la ganancia de calor, la eficiencia térmica η_t del CPC se define como la relación entre el calor ganado por el fluido y la radiación solar incidente sobre la apertura

$$\eta_t = \frac{Q_u}{G_t A_L} \quad (50)$$

Si el CPC está inclinado (Figura 14), se utiliza la siguiente ecuación para calcular G_t

$$G_t = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (51)$$

donde el factor de inclinación R_b se obtiene de la relación

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (52)$$

2.3 Nanoestructuras de ZnO

Como se mencionó en el capítulo anterior, los nanomateriales en la actualidad tienen un papel importante en la innovación y aplicación de tecnología. Dichos materiales pueden ser encontrados en la naturaleza y también pueden ser creados a partir de una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos. Para que un material se defina como nanomaterial, debe tener al menos alguna de sus dimensiones con una longitud menor a los 100 nm. Usualmente estos materiales son manipulados de manera ingenieril para aprovechar sus propiedades de acuerdo con la aplicación de interés, por ejemplo, en el área farmacéutica, electrónica, tratamiento de agua, agricultura y la remediación del medio ambiente. Dentro de la diversidad de nanomateriales se encuentran los óxidos metálicos, los cuales han ganado interés debido a su versatilidad de síntesis y aplicación (Siddiquee et al., 2019).

En los últimos años, los nanomateriales basados en óxidos metálicos han atraído gran atención por sus cualidades, tales como, la detección rápida de agentes dañinos, sensibilidad a estímulos externos, resistencia a altas temperaturas, y una síntesis a bajo costo. Además, este tipo de materiales pueden adoptar un vasto número de geometrías estructurales, propiedades químicas y físicas únicas debido a sus dimensiones, alta densidad y grande área superficial (Fernández-García & Rodríguez, 2007). Algunos óxidos con alta estabilidad mecánica y estructural son el óxido de titanio (TiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de molibdeno (MoO_x) y óxido de zinc. Una de las razones por la cuales los óxidos metálicos presentan características únicas es debido a su comportamiento electrónico, siendo una característica de

estos la presencia de un amplio ancho de banda prohibida y baja reactividad. Esto se debe a que al disminuir el tamaño del material se influye en la magnitud del ancho de banda, influenciando la conductividad y reactividad química (Tay et al., 2010).

El óxido de zinc es un material semiconductor tipo II-VI, con un valor de banda de energía prohibida de 3.3 eV, con propiedades físicas interesantes, como una amplia transparencia en la región del espectro visible, una emisión luminiscente en el UV y conductividad térmica. Además, el ZnO tiene la característica de formar una gran diversidad de estructuras a escala nanométrica y micrométrica, dependiendo del proceso de síntesis utilizado (Sahu et al., 2018b). El gran interés en la aplicación de dispositivos nanoestructurados basados en ZnO es debido a que es inerte, resistente a medios hostiles, no es tóxico y es insoluble en agua, por lo cual no presenta un riesgo eminente para el ambiente y consumidores (Gottardo et al., 2021). Otra propiedad de interés es la alta estabilidad térmica, esta es consecuencia de la energía cohesiva de enlace (7.52eV), mostrando una temperatura de fusión de 1970°C (Klingshirn et al., 2010). Por otra parte, el ZnO presenta propiedades piezoeléctricas prominentes, el doble comparado con otros semiconductores del tipo II-VI como el sulfuro de zinc (ZnS), sulfuro de cadmio (CdS) y seleniuro de cadmio (CdSe).

El ZnO se puede encontrar en tres estructuras, sal de roca, blenda de zinc y hexagonal wurtzita, como se muestran en la Figura 19. En condiciones normales, la fase cristalina más estable es la wurtzita, esto se debe a la repulsión existente entre los átomos de oxígeno y zinc que genera un alto grado de ionicidad en sus enlaces. Por esta razón existe un gran interés en sintetizar ZnO con estructura hexagonal. Dicha fase se puede obtener con tratamientos térmicos o diferentes métodos de síntesis.

En la estructura wurtzita cada átomo de zinc se encuentra rodeado por cuatro átomos de oxígeno formando un tetraedro, con planos continuos alternados a lo largo del eje c (Figura 20 (c)). Además, tiene una base de cuatro átomos en la celda unitaria primitiva como se observa en la Figura 20, dos de ellos son unidades moleculares del ZnO (Klingshirn et al., 2010). Debido a los 4 átomos presentes en la celda se tienen 12 modos vibracionales en los que las moléculas presentan movimiento. En la Figura 21 se observan los patrones de desplazamiento de los modos vibracionales (A K Bhunia, P K Jha, D Rout, 2016). Usualmente para conocer los modos vibracionales presentes en el material, se realiza un estudio de espectroscopia Raman. Para el caso del ZnO en estructura wurtzita se reconoce a partir de los tensores de fonones pertenecientes al ZnO donde comúnmente los fonones son excitados en frecuencias desde 261 hasta 1100 cm^{-1} .

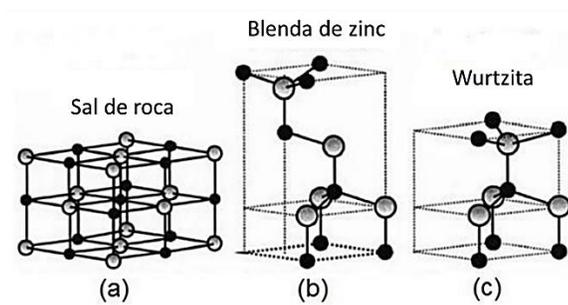


Figura 19. Estructuras químicas del óxido de zinc (a) sal de roca, (b) blenda de zinc y (c) wurtzita. Las esferas grises y negras representan átomos de zinc y oxígeno respectivamente.

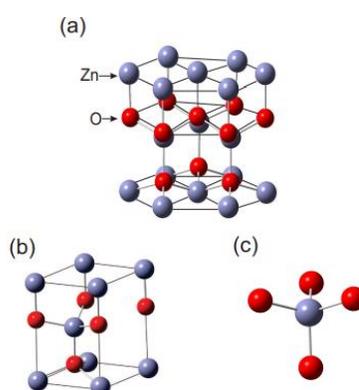


Figura 20. (a) Estructura cristalina de ZnO en fase wurtzita, (b) celda unitaria de wurtzita, (c) coordinación tetraédrica del ZnO (A K Bhunia, P K Jha, D Rout, 2016).

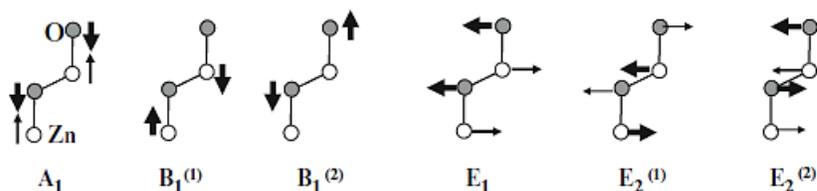


Figura 21. Modos vibracionales 26 presents en el ZnO (Klingshirn et al., 2010).

Debido al valor de ancho de banda prohibida el ZnO, este tiene un comportamiento óptico distintivo, el cual se ha estudiado extensamente a través de caracterizaciones como espectroscopia UV-Visible y espectroscopia fotoluminiscente. Típicamente, el ZnO exhibe una absorptividad en la región del ultravioleta, asociado a la energía necesaria para que los electrones de valencia superen el ancho de

banda. La relación entre el ancho de banda y la longitud de onda de mayor absorción (λ) se expresa en la ecuación 53, donde h es la constante de Planck ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) y c es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Otra característica interesante del ZnO es su comportamiento luminiscente, especialmente, su respuesta fotoluminiscente. Este fenómeno se basa en la emisión de luz generada por la transición electrónica de un electrón cuando pasa de un nivel energético mayor a uno menor (Rosenberg et al., 2009). La luz absorbida por el material provoca una excitación de los estados electrónicos, seguida por un relajamiento de los electrones, liberando la energía excedente en forma de un fotón como se representa en la Figura 22.

$$E_g (eV) = \frac{hc}{\lambda} \quad (53)$$

Las propiedades mencionadas anteriormente son dependientes del método de síntesis puesto que la morfología, composición, estructura y tamaño están directamente relacionados a la técnica de síntesis. En la literatura se puede encontrar distintos métodos para la síntesis de ZnO en películas delgadas, nanopartículas y nanoestructuras. Sin embargo, debido al objetivo de la investigación se decidió utilizar una ruta de síntesis química sencilla, preferentemente verde para la obtención de nanoestructuras de ZnO. El ZnO puede ser fácilmente sintetizado por métodos químicos húmedos empleando los precursores y condiciones de síntesis apropiados, esto con el fin de promover el auto-acoplamiento de las moléculas involucradas en el proceso de síntesis (Corr, 2016). Múltiples síntesis por auto-acoplamiento de ZnO han sido reportadas, utilizando distintas sales como precursores de zinc (Zn). Entre los precursores más utilizados se encuentran el cloruro de zinc (ZnCl_2), nitrato de zinc hexahidratado ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y acetato de zinc ($\text{ZnC}_4\text{H}_6\text{O}_4$).

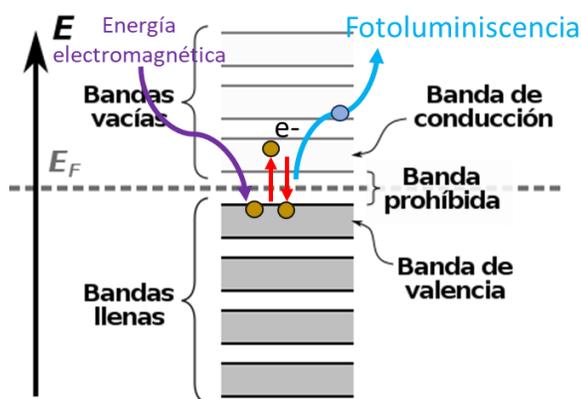


Figura 22. Representación de la teoría de bandas en ZnO.

Borbón-Núñez et al. (Borbón-Nuñez et al., 2014) sintetizaron ZnO con el propósito de evaluar sus propiedades termoluminiscentes. Como precursor de Zn utilizaron $ZnCl_2$ e hidróxido de sodio (NaOH) como agente oxidante. El producto obtenido fueron nanopartículas con morfología esférica, además encontraron que las curvas de emisión estaban compuestas por seis picos de TL individuales, con un orden cinético desde 1.2 a 1.8. Por otra parte, Ramya et al. (Ramya et al., 2021) efectuaron una investigación para la síntesis verde de ZnO donde utilizaron $ZnC_4H_6O_4$ como precursor y ácido ascórbico proveniente de la hoja de un árbol de guayaba. Realizaron una disolución con 5g de acetato en 50 ml de agua destilada, añadieron 10 ml de ácido ascórbico y mantuvieron en agitación por 30 min manteniendo un pH de 12 con ayuda de NaOH, toda la reacción se mantuvo a 313 K. Las estructuras obtenidas fueron varillas con un espesor promedio de 38 nm y una estructura cristalina de wurtzita.

Chaithanatkun et al. (Chaithanatkun et al., 2015) buscaron conocer el impacto del ácido ascórbico en la síntesis de ZnO por precipitación, donde emplearon $Zn(NO_3)_2$, La disolución se colocó en agitación a 323.15 K y se añadió NaOH por goteo a una concentración 4 M. Finalmente añadieron ácido ascórbico a distintas tasas de molaridad (0.5-4%) se percataron que, a mayor concentración de ácido, se tenía una preferencia de crecimiento en el plano (101). Sahu et al. (Sahu et al., 2018b) sintetizaron dos morfologías distintas de ZnO a partir del control de adición de hidróxido de potasio (KOH). Como precursor utilizaron $ZnCl_2$ a una concentración de 0.05 M, mantuvieron en agitación la disolución del cloruro y añadieron por goteo el KOH. La reacción se mantuvo durante 3 horas a 333 K finalmente se dejó reposar la solución por 8 horas y fue filtrada. En los resultados se observa que conforme variaban la velocidad en agregar el KOH obtenían diferentes morfologías, por goteo laminas, mientras que de manera rápida obtenían cúmulos pequeños (Sahu et al., 2018a).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Procedimiento de síntesis convencional de las nanoestructuras de ZnO

La síntesis convencional de las nanoestructuras de ZnO se llevó a cabo utilizando un método de crecimiento en solución propuesto por Sahu et al. (Sahu et al., 2018b) basado en la oxidación de una sal de zinc en presencia de un ambiente alcalino, con la diferencia en usar NaOH en lugar de KOH. Como precursor de zinc se utilizó nitrato de zinc hexahidratado ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) [Sigma Aldrich 98%] y como agente oxidante hidróxido de sodio (NaOH) [Sigma Aldrich 97%]. Para la síntesis de ZnO se prepararon 2 disoluciones: NaOH a 0.5 M y $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a 0.05 M. La solución de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ se mantuvo en agitación magnética constante sobre una plancha con una potencia nominal de 1550 W además se utilizaron dos termómetros de alcohol para medir temperatura. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se añadió la solución de NaOH por goteo, con una velocidad aproximada de 1 gota por segundo.

La ecuación (54) representa el mecanismo de reacción efectuado durante el crecimiento del ZnO. La Figura 23 muestra un diagrama del procedimiento de síntesis utilizado. El procedimiento se realizó en agitación y temperatura constantes por 3 h. Se utilizaron tres diferentes temperaturas de crecimiento, 50, 60 y 70°C, con el fin de evaluar la morfología y propiedades obtenidas. Una vez transcurrido el tiempo de síntesis, la muestra se dejó reposar por 8 h a temperatura ambiente (Figura 24). El producto obtenido se filtró utilizando vacío. El polvo recolectado se secó durante 12 h a 80°C en una atmósfera de aire, para posteriormente someter a estos mismos a un tratamiento térmico a 600°C por 6 h en atmósfera de aire. Para fines comparativos, las muestras serán definidas en la matriz experimental de la Tabla 5 como L1, L2 y L3, para las muestras sintetizadas a 50, 60 o 70°C, respectivamente.



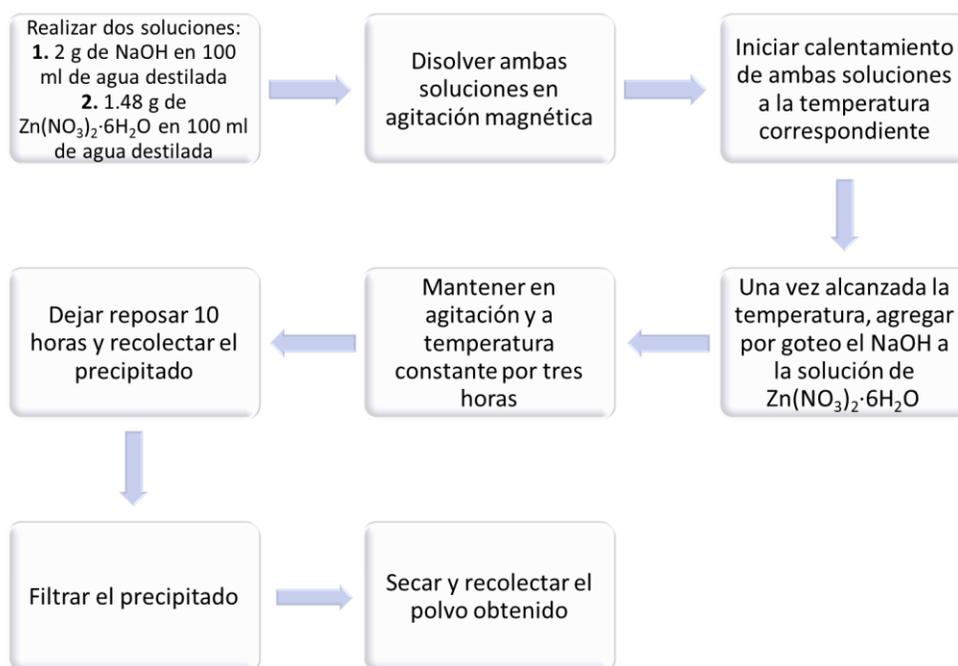


Figura 23. Procedimiento de síntesis convencional de ZnO.

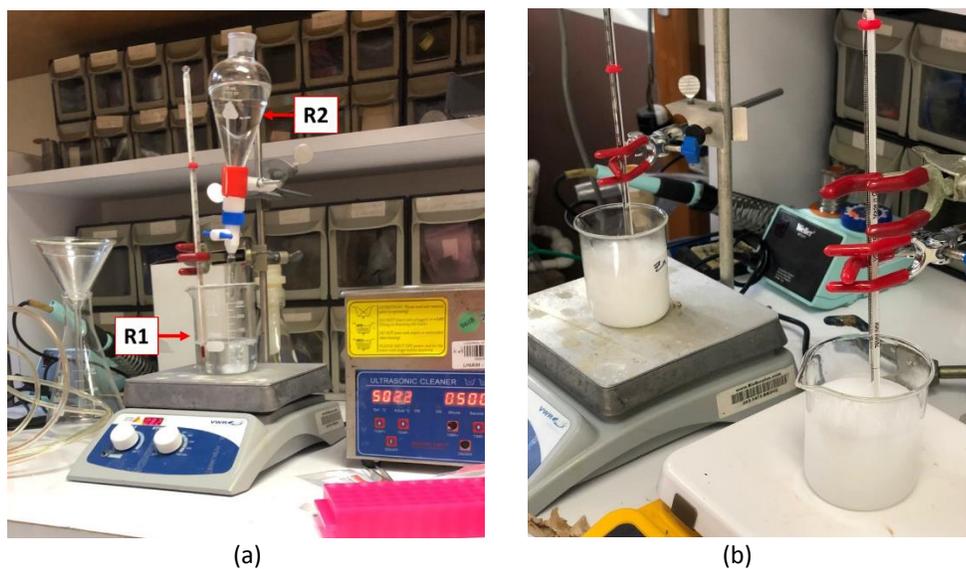


Figura 24. Arreglo experimental utilizado en la síntesis convencional de ZnO: a) R1 denota la disolución de Zn(NO₃)₂·6H₂O y R2 el goteo de la disolución de NaOH, (b) periodo de reposo de 8 h a temperatura ambiente.

3.2 Técnicas de caracterización de las nanoestructuras de ZnO

3.2.1 Espectroscopia Ultravioleta Visible

La espectroscopia por absorción óptica, o espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis) es una técnica comúnmente utilizada para estudiar metales, semiconductores y aislantes. A estos materiales se les puede distinguir por su ancho de banda de energía prohibida (del inglés band gap), la cual representa la energía necesaria para que un electrón perteneciente a la banda de valencia sea excitado y se sitúe en la banda de conducción. La energía absorbida por el material es esencial para conocer la estructura electrónica y transiciones entre la banda de valencia y conducción de los materiales (Surender Kumar et al., 2018). Con el objetivo de conocer el comportamiento electrónico de los materiales sintetizados en este trabajo, estas fueron analizadas en modo reflectancia utilizando un espectrofotómetro marca AVANTES, modelo AvaSpecs-2048 (Figura 25).

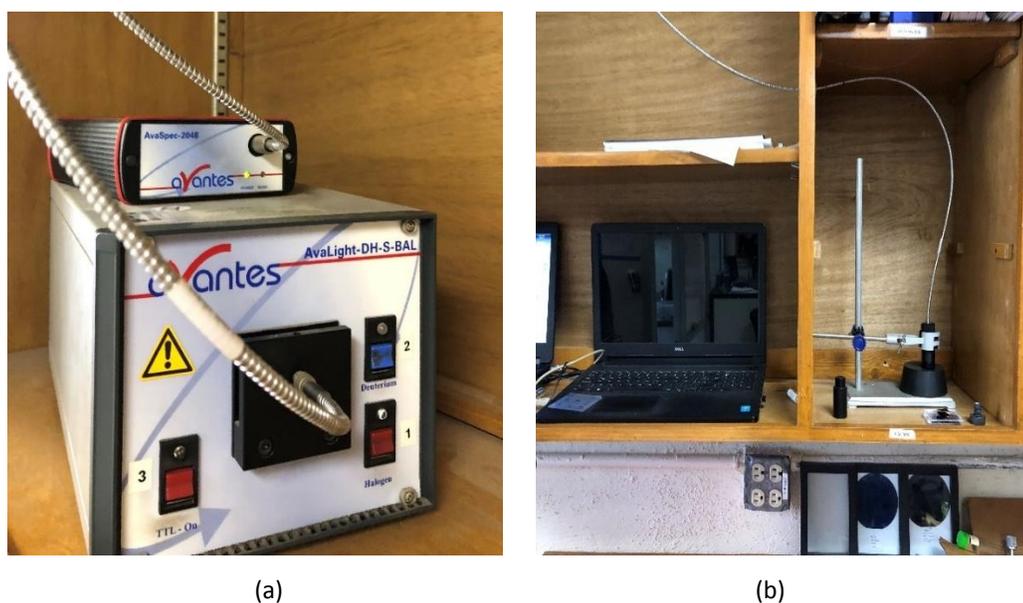


Figura 25. Espectrofotómetro AVANTES-2048 utilizado para realizar pruebas de transmisividad: (a) fuente de luz, (b) fibra óptica y porta-muestras.

3.2.2 Difracción de Rayos-X

La difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) es una técnica de caracterización experimental altamente eficaz para conocer propiedades relacionadas con la estructura cristalina de sólidos, tales como

su geometría, orientación de cristales unitarios, preferencia de orientación en policristales, defectos y estrés del material. La técnica de XRD se basa en la colisión de un haz de rayos-X sobre el material de interés, difractando el haz de rayos-X debido a los planos cristalinos presentes en el material. A partir del patrón de difracción se logra identificar el material y sus propiedades estructurales (Surender Kumar et al., 2018). Para analizar las muestras sintetizadas en este trabajo se utilizó un difractómetro marca Philips modelo X'pert MPD, (Figura 26).



Figura 26. Difractómetro Philips X'pert MPD.

3.2.2 Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman es una técnica vibracional molecular, sensible a la longitud, fuerzas y arreglos de los enlaces químicos del material. Esta técnica se basa en incidir fotones sobre el material provocando una interacción entre los enlaces químicos y los fotones, excitando los enlaces y llevándolos a un nivel energético mayor. La mayoría de la energía es re-irradiada en la misma frecuencia con la que fue irradiada inicialmente, sin embargo, una pequeña parte de la energía es transferida al material, generando la excitación de modos vibracionales (Surender Kumar et al., 2018). La diferencia de energía entre la re-irradiada y la emitida por los modos vibracionales es llamada energía vibracional, con la cual se puede deducir la estructura molecular del material. Para conocer los modos vibracionales de las muestras sintetizadas en este trabajo se utilizó un espectrofotómetro marca AVANTES con una fuente láser de 532 nm y un microscopio óptico con un objetivo de 20x, ambos ilustrados en la Figura 27.

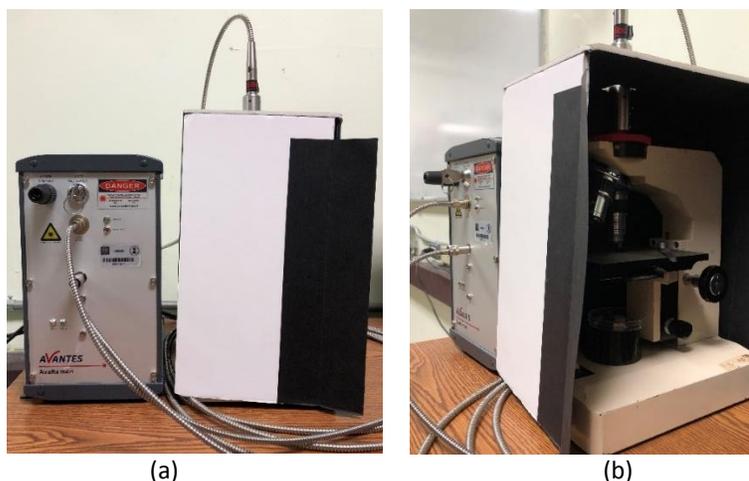


Figura 27. Espectroscopio Raman marca AVANTES: (a) Fuente láser (b) microscopio.

3.2.4. Microscopia Electrónica de Barrido

La microscopia electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es una de las técnicas de caracterización más utilizadas que permite obtener información morfológica del material mediante imágenes. En un análisis SEM típico, un haz de electrones con energía entre 200 eV y 50 keV es incidido sobre el material, provocando que los electrones impacten y penetren la superficie. Un número de interacciones electrónicas ocurren como resultado de la emisión de electrones y fotones de la muestra, éstas son capturadas por el equipo SEM creando imágenes (Surender Kumar et al., 2018). Para estudiar la morfología de las nanoestructuras sintetizadas en este trabajo, estas fueron analizadas en un microscopio Hitachi SU3500. Para facilitar su análisis las muestras fueron recubiertas con oro, utilizando un “SPI sputter coater”. El equipo se muestra en la Figura 28.

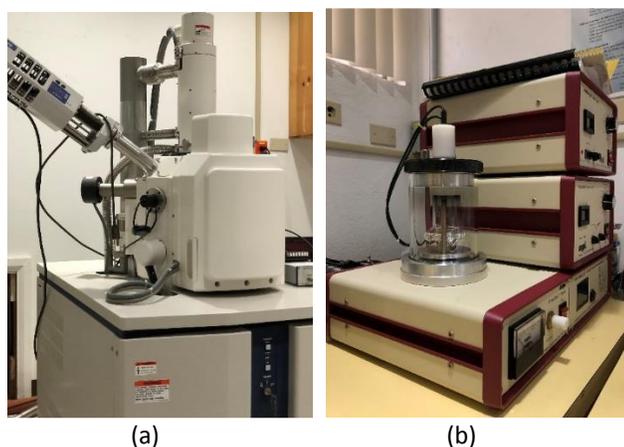


Figura 28. Microscopio electrónico de barrido utilizado para conocer la morfología del ZnO sintetizado: (a) microscopio, (b) Equipo de pulverización catódica utilizado.

3.3 Diseño y construcción del concentrador solar CPC

El proceso de diseño y construcción del concentrador solar CPC se llevó a cabo en tres etapas. Primero se realizó una simulación numérica de la geometría en el software Matlab con base en las ecuaciones ya establecidas en la literatura y presentadas en el Capítulo 2 (Szokolay, 1996). Después, con ayuda de las dimensiones obtenidas, se realizó un diseño en 3D con el programa SolidWorks, y finalmente se llevó a cabo la fabricación de las piezas y el ensamble del concentrador. El propósito de simular la geometría fue obtener la información necesaria para generar el plano en 2D del CPC a construir. A partir del ángulo de aceptación y radio externo del tubo absorbedor fue posible conocer las coordenadas de las curvas involuta y parábola, y fue factible evaluar la geometría del CPC con múltiples ángulos de aceptación, radios y porcentaje de truncamiento. Esto para comprender de forma gráfica la relación existente entre altura y apertura del reflector acorde a θ y r .

Después de obtener la geometría del CPC, se realizó una simulación de geometría solar para conocer la energía absorbida. A partir de las ecuaciones establecidas por Szokolay (Szokolay, 1996) y presentadas en el Capítulo 2, se realizó el estudio geométrico solar para cualquier zona geográfica ubicada en el hemisferio norte y cualquier día de los últimos 5 años. En función del día, mes, hora y ubicación geográfica se calculan: el ángulo horario, la declinación terrestre, y los ángulos cenital, azimutal y de incidencia, parámetros necesarios para el cálculo de la energía absorbida. En la Tabla 3 se muestran los datos de entrada y salida del análisis numérico, mientras que en las gráficas de la Figura 29 se puede observar el CPC evaluado con distintos valores de θ_a y r . En dichas gráficas se exhiben las diferentes dimensiones que el sistema puede tener y permite elegir con claridad los parámetros del CPC a construir.

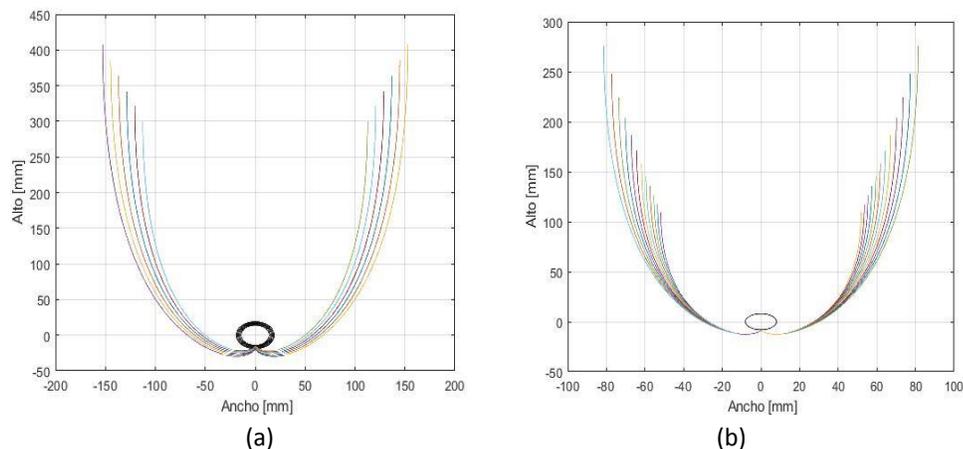


Figura 29. Perfil del concentrador CPC evaluado a diferentes valores de θ_a (a) y r (b).

Tabla 3. Información ingresada y obtenida a partir del análisis numérico en Matlab.

Información de entrada	Unidad	Información de salida	Unidad
<i>Hora</i>	H: min	Hora solar verdadera	H: min
<i>Fecha</i>	Día/mes	Diferencia entre hora civil y solar	H: min
<i>Longitud local</i>	Grados	Ángulo solar	Grados
<i>Meridiano de referencia</i>	Grados	Declinación terrestre	Grados
<i>Latitud local</i>	Grados	Ángulo de altura solar	Grados
<i>Ángulo de inclinación</i>	Grados	Ángulo de incidencia	Grados
<i>Ángulo de apertura de CPC</i>	Grados	Radiación solar extraterrestre	W/m ²
		Energía absorbida por CPC	W/m ²
		Área reflectiva completo y truncado	m ²
		Altura del CPC completo y truncado	Cm
		Apertura del CPC completo y truncado	Cm
		Concentración del CPC completo y truncado	-
		Numero de reflexiones promedio	-

Los parámetros que se establecieron a partir de la simulación numérica fueron un ángulo de aceptación $\theta_a = 30^\circ$ y un radio externo de $r = 20$ mm para el tubo absorbedor. Con base en estos valores se diseñó el CPC en 3D con el software SolidWorks. En la Figura 30 se puede ver la sección transversal. El concentrador solar que se construyó está integrado por 2 canales CPC conectados en serie como se ilustra en la Figura 31, donde también se muestra el resto de los componentes del sistema. Cada canal tiene 1.50 m de longitud, 14.45 cm de altura y 0.79 m² de área reflectiva. Se maquinaron 10 perfiles de PVC gris con un espesor de 1.2 cm para sostener y guiar la lámina reflectora siguiendo la trayectoria definida por las ecuaciones de diseño. Los perfiles se colocaron sobre una base rectangular de aglomerado de madera, con 1.2 cm de espesor, utilizando escuadras de aluminio en forma de L con 2.54 cm de lado y tornillos de acero de 1.8 cm de largo.

Para cerrar cada canal de CPC se colocaron dos tapas de madera de pino de 1.8 cm de espesor, mismas que se sujetaron a los perfiles de PVC correspondientes mediante tornillos a través de los orificios indicados en la Figura 30. El tubo absorbedor empleado en cada canal es de acero inoxidable y tiene una longitud de 1.75 m y un diámetro externo de 3.17 cm. Los tubos se sujetaron con soportes fabricados de ácido poliláctico (PLA) en una impresora 3D. Para evitar el contacto directo entre cada tubo y el soporte se colocó un empaque de caucho resistente al calor con un espesor de 1.5 mm. También, los tubos

absorbedores fueron recubiertos con pintura negro mate de alta temperatura cuyo valor de absorptividad es de 0.85. La lámina reflectora es de aluminio galvanizado con acabado espejo y un espesor de 0.5 mm. Por último, a fin de evitar la convección entre los tubos y el aire del ambiente, se colocó una cubierta transparente de acrílico de 6 mm de espesor en la apertura de cada canal.

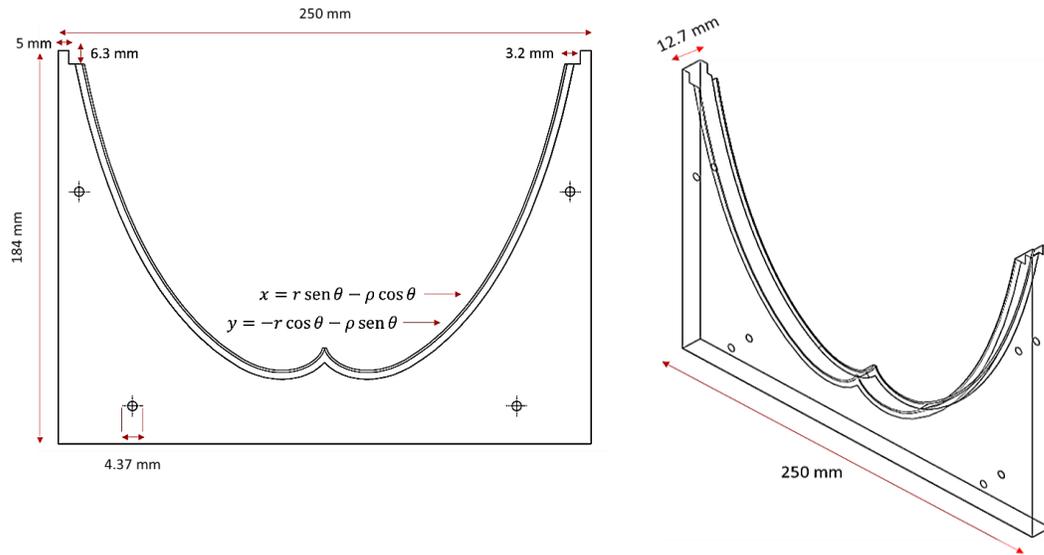


Figura 30. Sección transversal del CPC diseñado.

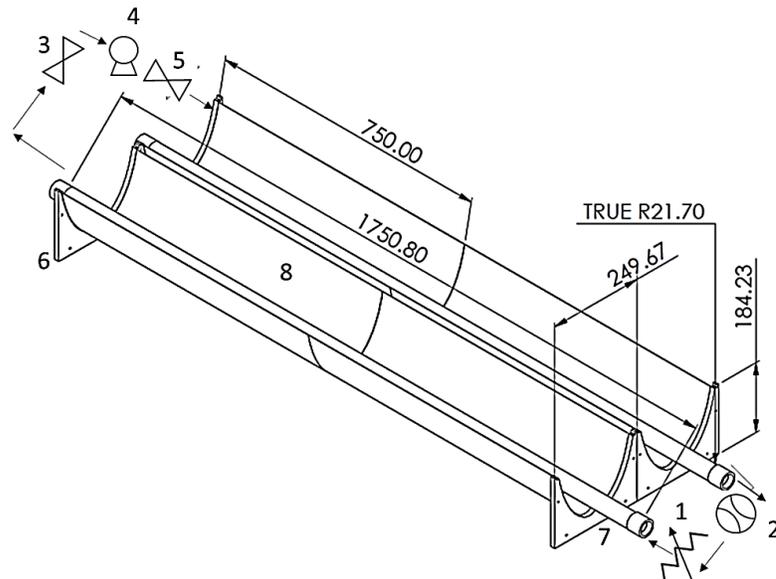


Figura 31. Vista isométrica del concentrador solar CPC y sus componentes: sensor de temperatura RTD (1), medidor de flujo (2), válvulas de paso (3 y 5), bomba (4), perfiles de PVC (6), tubo absorbente de acero inoxidable (7) y lámina reflectora (8). Las flechas indican el sentido del flujo. Las dimensiones están en mm.

A partir de las medidas establecidas en el diseño 3D se realizaron los cortes necesarios de la lámina reflectora, base, tapas de madera, tubo absorbedor y acrílico. La etapa de ensamblaje se inició dando forma a la lámina reflectiva con el propósito de mantener fija la trayectoria de la involuta y parábola a lo largo del perfil del CPC (Figura 32). Después se fijaron los perfiles de PVC sobre la base y se colocaron las láminas dentro de la muesca con ayuda de un hule de plástico de 2 mm de diámetro. Posteriormente se pusieron los tubos, las tapas de madera y el acrílico para cerrar el sistema. Para evitar daños a la base y tapas de madera, se les aplicó un recubrimiento de barniz grado marino. Con el objetivo de variar el ángulo de inclinación del sistema se utilizó un elevador mecánico de tornillo colocado abajo de la base de madera. Finalmente se construyó el circuito hidráulico con tubería de CPVC y manguera industrial de 2.54 cm de diámetro. En las Figuras 33 y 34 se puede observar el concentrador solar CPC terminado, con todos sus componentes.

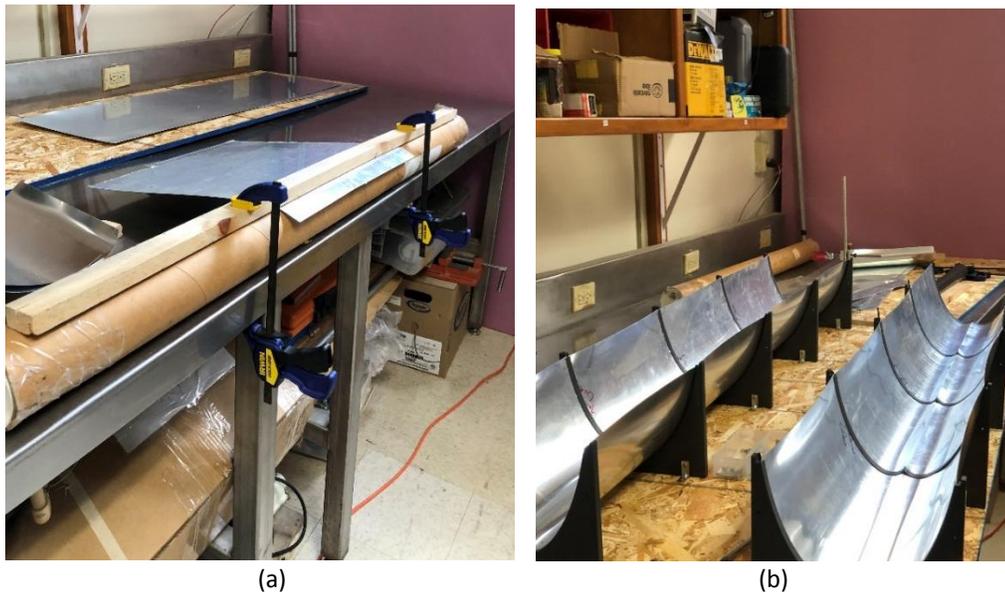


Figura 32. (a) Proceso de doblar de lámina (b) perfiles y lamina ensamblada.

La temperatura y el flujo másico del fluido se midieron, respectivamente, con un sensor de temperatura resistivo (RTD) marca EIP y un sensor de flujo modelo YF-S201 compatible con Arduino. Se utilizaron dos termopares tipo K marca Omega para medir las temperaturas del ambiente y de la superficie del tubo absorbedor. Para registrar la radiación global horizontal (RGH) se utilizó un piranómetro marca Kipp & Zonen modelo CMP 21 (Figura 35). Todos los instrumentos a excepción del sensor de flujo se conectaron a un adquisidor de datos marca Keysight modelo 34972. Para asegurar un flujo constante y evitar la precipitación de las nanoestructuras se utilizó una bomba marca AquaNet con una potencia promedio de

108.6 W. En la Tabla 4 se proporcionan las especificaciones técnicas de los instrumentos de medición y los resultados de calibración de los termopares y el sensor RTD.

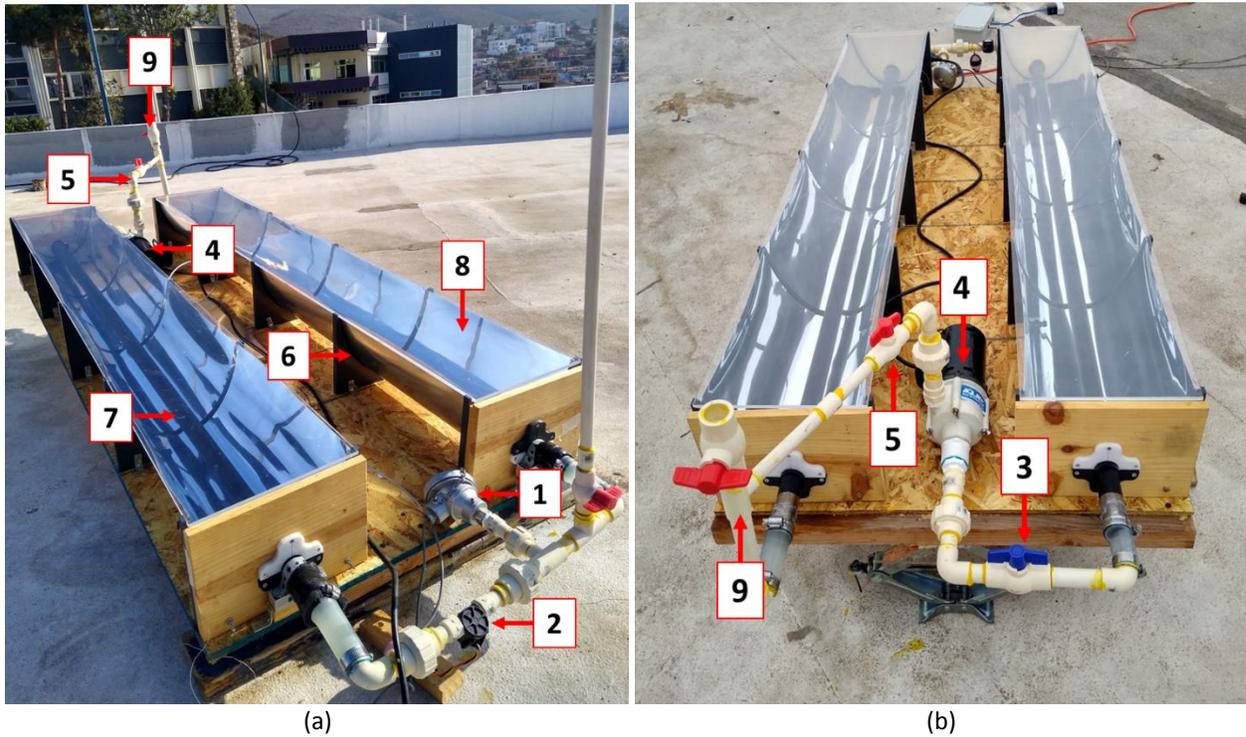


Figura 33. Vista frontal (a) y posterior (b) del concentrador solar CPC, y sus componentes: sensor de temperatura RTD (1), medidor de flujo (2), válvulas de paso (3, 5, 9), bomba (4), perfiles de PVC (6), tubo absorbedor de acero inoxidable (7) y lámina reflectora.



Figura 34. Vista lateral del concentrador solar CPC.

Tabla 4. Especificaciones técnicas y resultados de calibración de los instrumentos de medición.

Instrumento	Modelo	Error
RTD	EIP	± 1.0 (%)
Termopar tipo K 1	Omega K	± 1.0 (%)
Termopar tipo K 2	Omega K	± 1.0 (%)
Piranómetro	Kipp & Zonen CMP 21	< 10 W/m ²
Sensor de flujo	YF-S201	± 5.0 (%)

**Figura 35.** Piranómetro Kipp & Zonen modelo CMP 21.

3.4 Procedimiento de síntesis solar de las nanoestructuras de ZnO

Conforme al objetivo de este trabajo se utilizó el concentrador solar CPC construido para sintetizar nanoestructuras de ZnO utilizando la radiación del Sol. El procedimiento que se estableció para realizar la síntesis solar fue una adaptación práctica de la metodología realizada en el laboratorio, como se describe en la Figura 36. A diferencia de la síntesis convencional, el volumen de las soluciones se aumentó 15 veces para llenar el sistema. Es importante señalar que, en la síntesis solar, la temperatura de síntesis fue una variable en función de las condiciones ambientales, además de que la incorporación del NaOH a la solución se añadió directamente, y no por goteo. En la Figura 37a se pueden ver los reactivos al inicio de la síntesis y en la Figura 37b el producto recolectado al final.

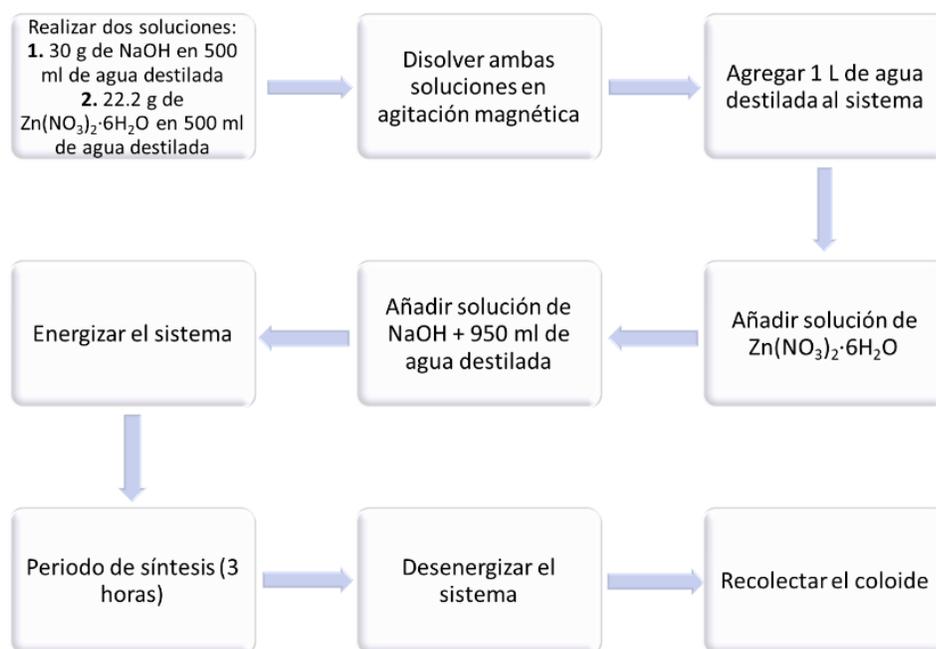


Figura 36. Procedimiento de síntesis solar de ZnO.

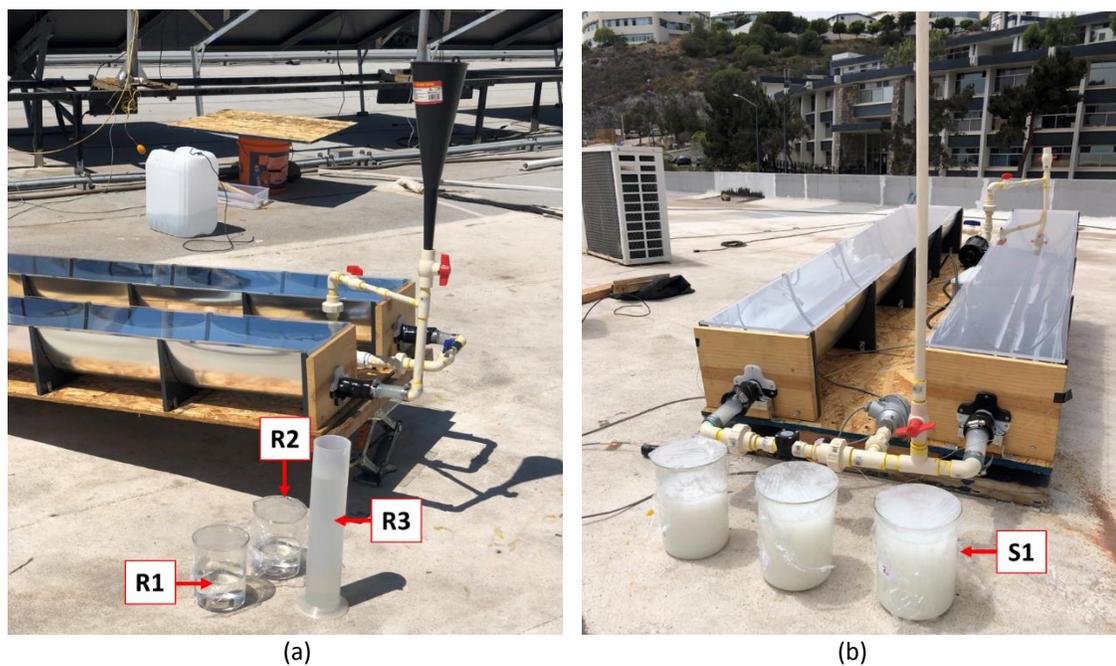


Figura 37. (a) Inicio de la síntesis: R1 es la solución de $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, R2 es la solución de NaOH y R3 es el agua destilada. (b) Producto recolectado: S1 denota la solución de ZnO sintetizado.

3.5 Matriz experimental

Las pruebas experimentales con energía solar fueron realizadas en el techo del edificio de Física Aplicada del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), B.C. Dado que el lugar se encuentra en el hemisferio norte, el concentrador solar CPC se orientó hacia el sur geográfico con una inclinación de 10° debido a que esa fue la altura solar promedio en el intervalo de experimentación. Por otro lado, las síntesis convencionales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de CICESE. La matriz experimental se proporciona en la Tabla 5. Como se mencionó en la Sección 3.1 a las tres síntesis convencionales de ZnO hechas a 50°C, 60°C y 70°C se les denominó L1, L2 y L3, respectivamente.

Como se ilustra en la Tabla 5 el 6 de junio de 2022 se realizó una primera caracterización térmica del sistema para evaluar su potencial para elevar la temperatura del fluido de trabajo por encima de 50°C por tiempo suficiente. Posteriormente, después de las tres síntesis solares (S1, S2 y S3) llevadas a cabo entre el 13 y 15 de junio de 2022, se hicieron dos experimentos de caracterización más. Los resultados de las caracterizaciones del concentrador y de las síntesis convencionales y solares se describen en el Capítulo 4 utilizando la nomenclatura empleada en la matriz experimental.

Tabla 3. Matriz experimental.

Fecha	Tipo de experimento	Nombre del experimento
Mayo 2022	Síntesis de laboratorio a 50°C	L1
Mayo 2022	Síntesis de laboratorio a 60°C	L2
Mayo 2022	Síntesis de laboratorio a 70°C	L3
6 de junio, 2022	Caracterización del CPC	C1
13 de junio, 2022	Síntesis solar	S1
14 de junio, 2022	Síntesis solar	S2
15 de junio, 2022	Síntesis solar	S3
27 de junio, 2022	Caracterización del CPC	C2
1 de julio, 2022	Caracterización del CPC	C3

Capítulo 4. Resultados Experimentales

4.1 Caracterización de las nanoestructuras de ZnO sintetizadas convencionalmente

4.1.1 Difracción de rayos X (XRD)

En la figura 38 se observa el patrón de difracción de rayos X obtenido de las nanoestructuras sintetizadas en laboratorio variando la temperatura de síntesis. Se puede observar que los patrones de difracción de las tres muestras presentan picos localizados a 32° , 35° , 38° , 48° , 57° , 63° y 68° , asociados a los planos (100), (002), (101), (102), (110), (103) y (112) respectivamente, de acuerdo con la carta cristalográfica del ZnO en la fase cristalina wurtzita (Wang et al., 2011). De acuerdo con la relación de intensidades, se puede mencionar que el ZnO sintetizado tiene un crecimiento preferencial en el plano (101). Los resultados anteriores indican que la muestra de ZnO sintetizada a 70°C presenta picos más agudos y definidos, en comparación de L2 y L1, lo cual indica un mayor grado de cristalinidad en la estructura del material.

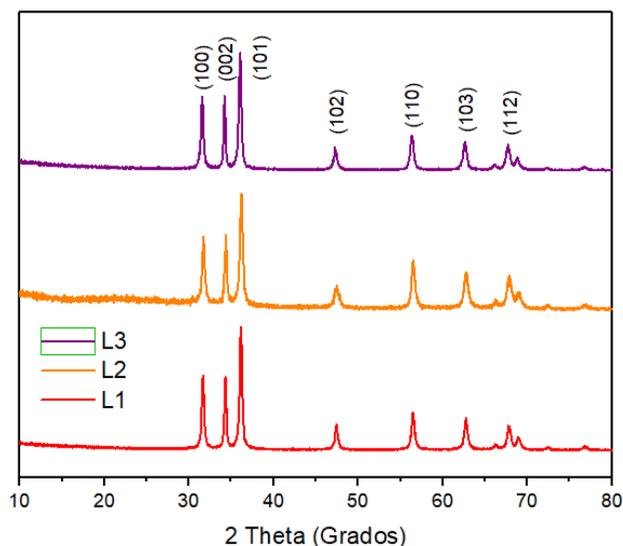


Figura 38. Patrón de difracción de rayos X de nanoestructuras de ZnO obtenidas a partir de la síntesis convencional en laboratorio. L1 corresponde a la síntesis a 50°C , L2 a la síntesis a 60°C y L3 a la síntesis a 70°C (Wang et al., 2011).

4.1.2 Espectroscopia Raman

En la Figura 39 se presenta el espectro Raman de las nanoestructuras sintetizadas en laboratorio. Se observa que las tres muestras, L1, L2 y L3, exhiben espectros similares, con la presencia de picos definidos localizados a 202, 430, 561, 652 y 1150 cm^{-1} , los cuales están asociados a los modos vibracionales del ZnO $2E_{2(\text{low})}$, $A_1\text{TO}$, $E_1\text{TO}$, $A_1\text{LO}$, y 2LO respectivamente. Para L1 se observa una emisión dominante en el modo vibracional $E_2\text{low}$, mientras que los modos vibracionales $E_1\text{TO}$ y 2LO se observan de menor intensidad, con respecto a L2 y L3. L2 presenta el mayor pico en $2E_{2(\text{low})}$ seguido por $E_1\text{TO}$ y 2LO . Por otra parte, L3 presenta picos más intensos en $2E_{2(\text{low})}$ y $E_1\text{TO}$ asociados al mayor grado de cristalinidad observado en XRD.

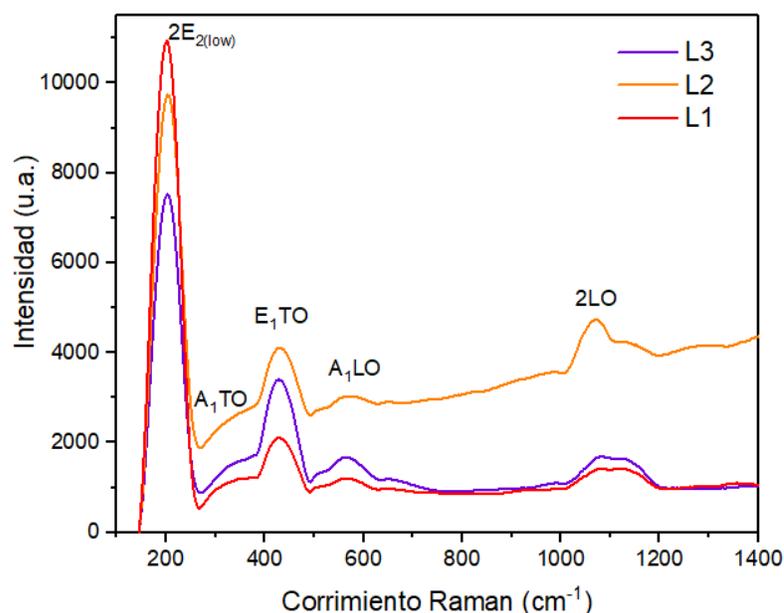


Figura 39. Espectro Raman para nanoestructuras de ZnO sintetizadas de manera convencional. L1 corresponde a la síntesis a 50°C, L2 a la síntesis a 60°C y L3 a la síntesis a 70°C.

4.1.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Con el objetivo de determinar el efecto de la temperatura de síntesis en la morfología y dimensiones del ZnO sintetizado en el laboratorio, se analizaron las muestras en el microscopio electrónico de barrido. En la figura 40 (a) para el ZnO sintetizado a 50°C, se observan estructuras en forma de cubo irregulares, con un acabado superficial llano, y un tamaño promedio de 0.7 micras. Por otra parte, al incrementar la temperatura de síntesis a 60°C, figura 40 (b), se puede observar una morfología más irregular, estructuras

con un acabado superficial laminar, con una variación de tamaños entre 0.2 micras a 0.9 micras, mientras que el espesor de las láminas es inferior a los 100 nm. Así mismo, al utilizar una temperatura de 70°C, figura 40 (c), se observan estructuras con una morfología más esférica, con diámetros inferiores a los 500 nm, conformadas por pequeñas estructuras laminares, como las muestras sintetizadas a 60°C.

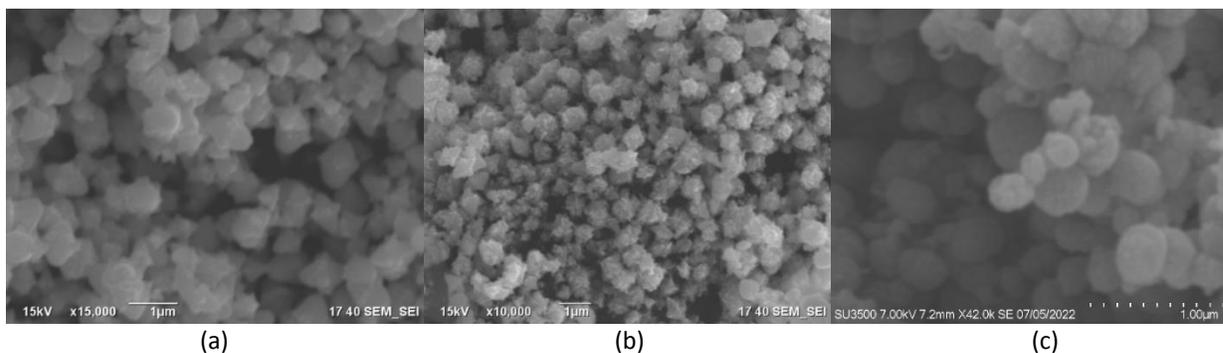


Figura 40. Imágenes de nanoestructuras de ZnO (a) Nanoestructuras sintetizadas a 50°C (b) Nanoestructuras sintetizadas a 60°C (c) Imagen de nanoestructuras de ZnO sintetizadas a 70°C.

4.1.4 Espectroscopia UV-Visible

Con la ayuda de espectroscopia ultravioleta Visible (UV-Vis) se evaluó la transmitancia de las muestras sintetizadas en laboratorio. La Figura 41 muestra los espectros de reflectancia de las nanoestructuras sintetizadas. Se puede observar una absorción mayor al 90% en el espectro ultravioleta concretamente entre 300 y 380 nm para las tres muestras, y una transparencia en la región visible del 80%, 75% y 100% respectivamente para L1, L2 y L3. Este comportamiento es característico del ZnO, lo que nos confirma la obtención del semiconductor. Una diferencia notable entre las muestras es el porcentaje de la transmitancia, el cual coincide con la información obtenida por difracción de rayos X.

4.1.5 Espectroscopia de fotoluminiscencia

En la figura 42 se muestran los espectros de fotoluminiscencia de las muestras sintetizadas en laboratorio (L1, L2 y L3). En todas se observa un espectro muy similar compuesto por dos zonas de emisión, una emisión intensa en la región del ultravioleta, centrada en 340 nm, asociada a la emisión del borde de banda del óxido de zinc (Klingshirn et al., 2010). Asimismo, se puede observar una débil emisión en la región del visible, centrada a 480 nm, la cual se le atribuye defectos estructurales del material. La diferencia más

notable entre las tres muestras es la intensidad de emisión, donde L3 presenta picos más agudos, seguida por L2 y L1 respectivamente.

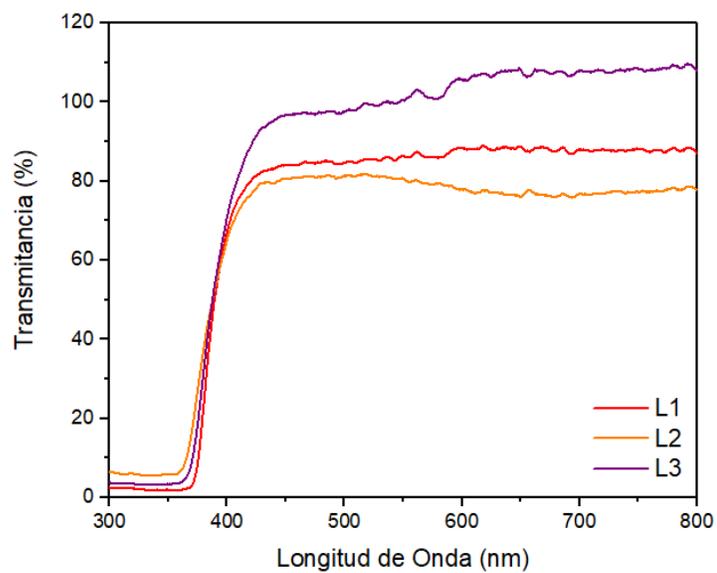


Figura 41. Espectro de transmittancia para ZnO sintetizado a tres diferentes temperaturas.

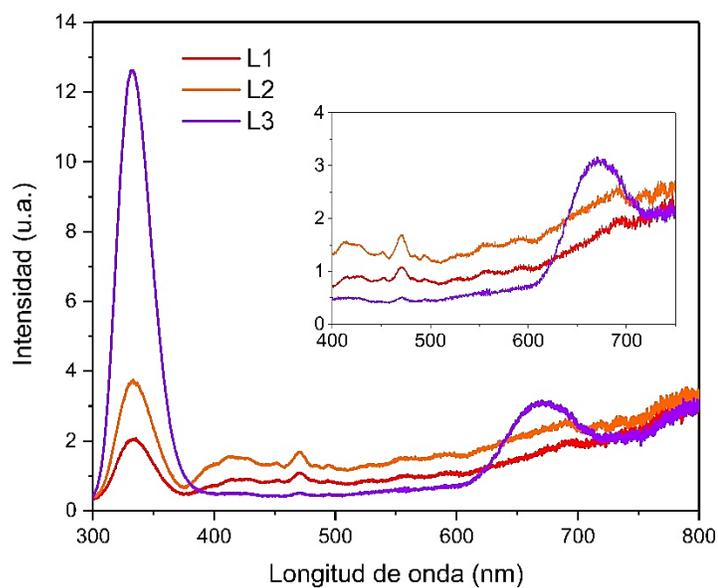


Figura 42. Espectro de fotoluminiscencia para ZnO sintetizado a tres diferentes.

4.2 Caracterización del concentrador solar CPC

Para conocer el comportamiento térmico del concentrador solar se realizó una caracterización bajo condiciones de clima real, que consistió en monitorear las temperaturas del fluido (T_{fluido}), de la superficie de uno de los tubos absorbedores (T_{tubo}) y del ambiente (T_{amb}), así como la medición de la radiación global horizontal horaria (RGH) los días 6 y 27 de junio y 1 de julio de 2022, etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5. Debido a que el sistema operó de forma tal que al salir el fluido de un tubo absorbedor entraba al otro inmediatamente se consideró suficiente con monitorear T_{fluido} en un solo punto, situado entre los dos canales CPC (Figura 33).

Asimismo, se asumió como suficiente registrar T_{tubo} en sólo uno de los tubos debido a que ambos canales son iguales. No obstante, en un experimento adicional hecho el 14 de julio de 2022 se investigó la variación de la temperatura entre cada tubo absorbedor a lo largo del día. En todos los casos el fluido utilizado fue agua destilada a una tasa de 11 l/s. Cada experimento tuvo una duración de 7 h, iniciando a las 10:00 am. En la Figura 43 se muestran los valores de RGH y T_{amb} , y en las Figuras 4.7 y 4.8 los de T_{tubo} y T_{fluido} medidos en los tres días de caracterización.

En la Figura 43 las curvas de RGH C1, C2 y C3 se pueden considerar como la tendencia común de la radiación global horizontal. En ésta, se observa un incremento gradual conforme se acerca al mediodía solar; es decir la máxima altura solar para el día n. En dichos días de caracterización la máxima radiación comprendió entre las 13:00 y las 15:00 horas con una máxima de 1012.6 W/m², 1118 W/m² y 1028.3 W/m² para C1, C2 y C3 respectivamente. A partir de ese lapso, la radiación comienza a disminuir con la misma graduación que sucede el incremento. Sin embargo, se pueden observar máximos y mínimos con diferencias distintas, esto se atribuye a la nubosidad presente en el día. La temperatura ambiente para los tres días tuvo una ligera variación entre los 26 y los 30 °C.

La Figura 44 exhibe una aproximación a la temperatura externa del tubo absorbedor para los tres días de caracterización. Es sencillo percatarse que las curvas se asemejan a la tendencia reflejada por la radiación solar. Debido a esta conducta, es fácil determinar que la principal variable de influencia en el sistema es la RGH. Se considera a estos datos como una aproximación debido a que el termopar tipo k no debe colocarse bajo radiación directa y fue colocado en la superficie inferior del absorbedor; Como es de notar en la sección 2.2 la distribución de rayos incidentes no es uniforme, provocando gradientes de temperatura a lo largo de la circunferencia del tubo, limitando el estudio de este. Las temperaturas máximas registradas fueron 72.4°C, 74.9°C y 69.4°C para C1, C2 y C3 respectivamente.

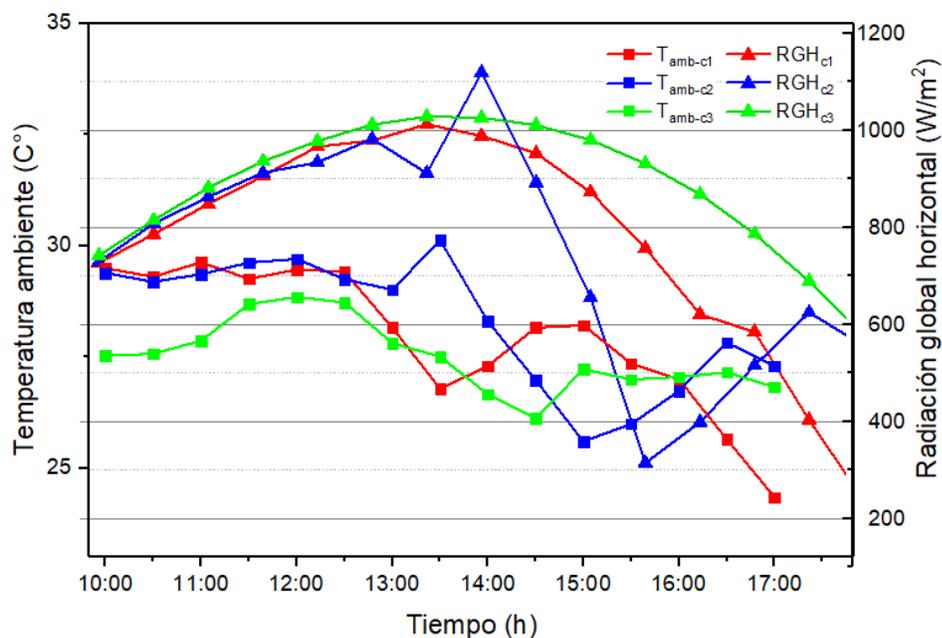


Figura 43. Radiación global horizontal (RGH) acumulada y temperatura ambiente (T_{amb}) medidas durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.

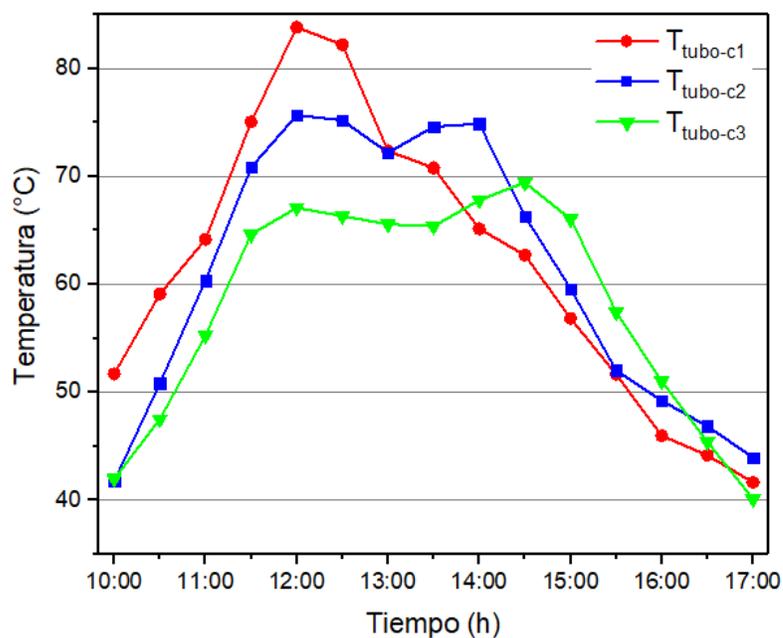


Figura 44. Temperatura externa de la superficie del absorbente (T_{tubo}) registrada durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.

La Figura 45 muestra la temperatura del fluido para los tres días de caracterización, se puede observar la misma tendencia de temperatura con respecto a la del tubo absorbedor; Esto se debe a que la única influencia y variable en el fluido es la energía absorbida por el tubo. La máxima temperatura registrada para los tres días de caracterización fue de 67.3°C, 69.6°C y 65.5°C respectivamente; Mientras que las mínimas registradas fueron de 39.7°C, 37.1°C y 39.6°C. A pesar de que las mínimas temperaturas no logran el requerimiento mínimo de síntesis (50°C) es de notar que en el intervalo entre las 10:30 y 15:00 horas la temperatura se mantuvo superior a los 50°C ofreciendo más, de las 3 horas de temperatura constante necesaria para la síntesis.

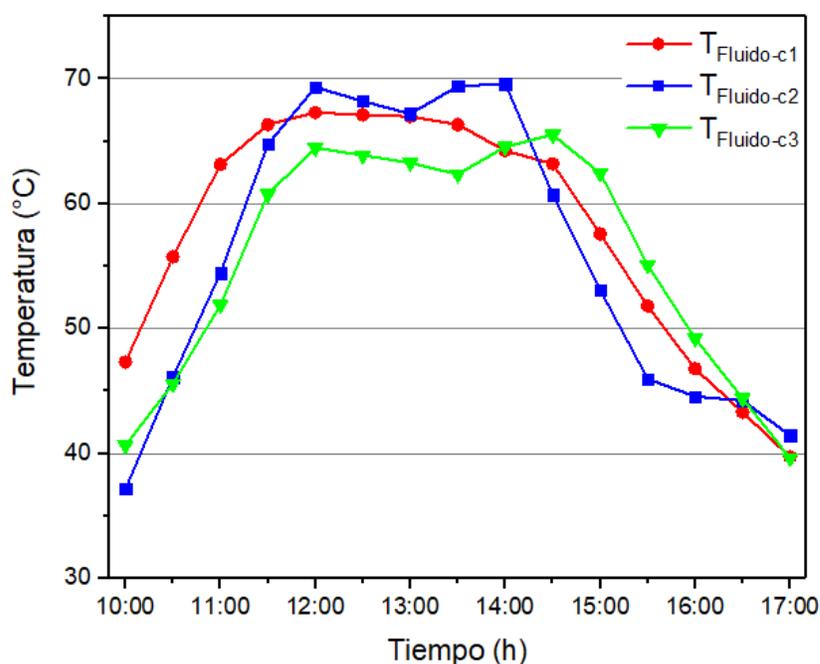


Figura 45. Temperatura del fluido (T_{fluido}) monitoreada durante los tres días de caracterización etiquetados como C1, C2 y C3 en la Tabla 5.

Como se explicó previamente, el concentrador solar está constituido por dos canales CPC iguales, colocados en paralelo y conectados en serie haciendo un circuito cerrado. Por lo tanto, se asumió que el comportamiento térmico de los tubos absorbedores sería similar. No obstante, para corroborarlo el 14 de julio se tomaron mediciones de la temperatura superficial de cada tubo en cuatro secciones diferentes, equidistantes a lo largo de la longitud, cada 0.5 h durante 7 h. Las mediciones se hicieron con un termómetro láser con 0.1°C de precisión y rango de -20 a 400°C. Para medir correctamente fue necesario remover momentáneamente la cubierta de acrílico. Los valores promedio de la temperatura de cada tubo,

diferenciados como este y oeste, así como la diferencia de temperatura (ΔT_s) entre ambos se muestran en la Figura 46.

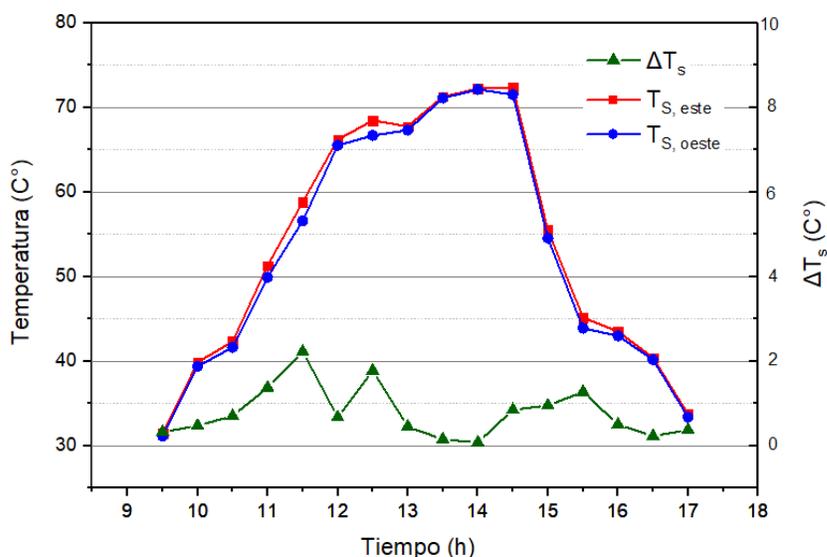


Figura 46. Temperaturas de los tubos absorbedores este ($T_{s,este}$) y oeste ($T_{s,oeste}$), y diferencia de temperatura ΔT_s .

En la Figura 46 se puede ver que las temperaturas de ambos tubos, identificadas como $T_{s,este}$ y $T_{s,oeste}$, respectivamente, fueron consistentemente similares, con excepción de cuatro casos donde ΔT_s fue mayor a 1°C . Se cree que el hecho de remover la cubierta de acrílico para hacer las mediciones fue el principal responsable de las discrepancias, ya que la convección con el ambiente tendió a disminuir la temperatura de los tubos rápidamente. De cualquier forma, para fines prácticos la influencia de ΔT_s en los procesos de síntesis puede considerarse insignificante.

La caracterización del sistema permitió comprobar que el comportamiento térmico del concentrador solar fue conforme a lo descrito en el Capítulo 2. La temperatura del fluido fue estrechamente dependiente de la transferencia de calor por convección desde el tubo absorbedor, mismo que fue calentado por la radiación solar reflejada por el concentrador. Con ayuda del programa realizado en Matlab y a partir de la caracterización del sistema fue posible seleccionar un horario de experimentación. Debido a que el periodo de síntesis tiene una duración de 3 h, se estableció un tiempo de síntesis 1.5 h antes del mediodía solar y 1.5 h después. Por lo tanto, de acuerdo con los días en los que se realizaron los experimentos el horario de experimentación fue de 11:00 a 14:00 h.

4.3 Caracterización de las nanoestructuras de ZnO sintetizadas con energía solar

Una vez caracterizado el concentrador solar CPC, se procedió a realizar la síntesis de las nanoestructuras de ZnO en el mismo. Se realizaron tres síntesis solares, los días 13, 14 y 15 de junio de 2022, nombrados como S1, S2 y S3, respectivamente, en la Tabla 5. La tasa de flujo másico utilizada durante las pruebas de caracterización se mantuvo durante las síntesis. En la Figura 47 se exhibe el comportamiento de la RGH acumulada cada 5 min al igual que la temperatura ambiente promedio en ese intervalo en los días de síntesis. Dichos datos se obtuvieron durante los periodos de precalentamiento del fluido y tiempo de la síntesis. Se consideró el inicio de la síntesis como el tiempo en el que el fluido alcanzó una temperatura mínima de 50 °C. Debido a esta consideración el horario de las tres síntesis no fue idéntico, sin embargo, los tres experimentos cumplieron con los tiempos y temperaturas establecidos en la metodología.

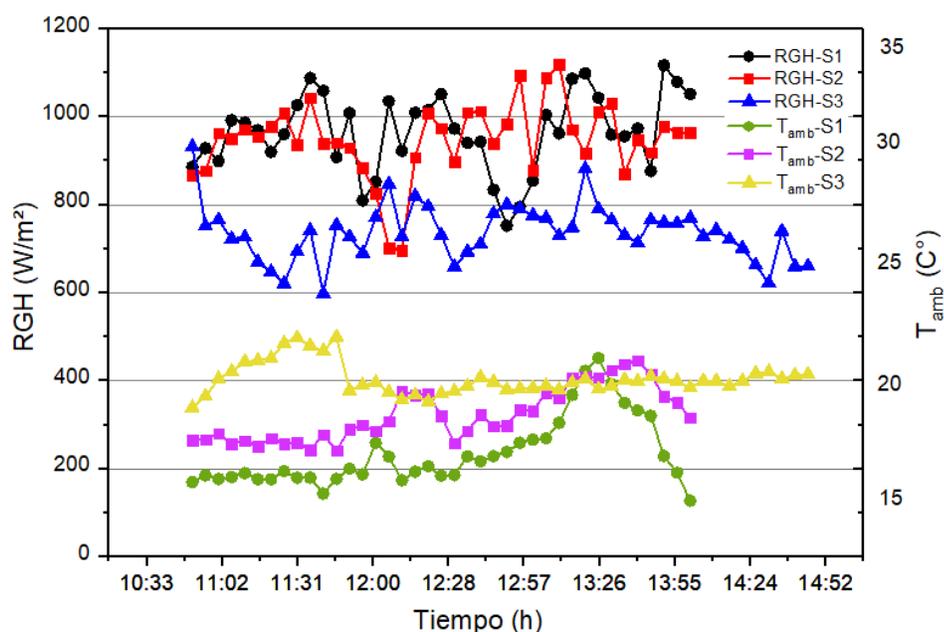


Figura 47. RGH y T_{amb} registrados durante los tres días de síntesis solar etiquetados como S1, S2 y S3 en la Tabla 5.

Para la síntesis S1, se observó un máximo de 1117 W/m^2 y un mínimo de 752 W/m^2 de radiación solar, mientras que la temperatura ambiental se encontró en el rango de 14 a 20 $^{\circ}C$. En el día S2 se observó una radiación con mayor variación, se registró una mínima de 696 W/m^2 y un máximo de 1119 W/m^2 . La temperatura ambiental se registró con menos cambios en comparación al día S1, estando en un rango entre 16 y 20 $^{\circ}C$. El experimento S3 fue el que mostró mayor estabilidad tanto en RGH como en T_{amb} con respecto a los días S1 y S2. Se observó un máximo de 932 W/m^2 y un mínimo de 599 W/m^2 . A pesar de

haber sido el día con menor radiación debido a la nubosidad presente, se cumplió con el requerimiento mínimo de temperatura. La temperatura ambiental tuvo una mínima de 18.5 °C y una máxima de 21.5 °C.

En la Figura 48 se presentan las temperaturas de la solución (T_f) registradas durante los tres días de síntesis. Se observa que los máximos de temperatura para cada síntesis fueron de 67.7°C, 72°C y 52°C respectivamente para S1, S2 y S3. En los tres experimentos se logró mantener una temperatura mayor a los 50 °C por un lapso de 3 horas, suficiente para abastecer el requerimiento energético de la síntesis de nanomateriales. El mínimo de temperatura para cada síntesis fue de 37°C, 38°C y de 28°C dichas temperaturas se observaron al arranque del sistema, considerándose como el precalentamiento del fluido, siendo los mínimos de temperatura 50.2°C, 51.8°C y 50 °C.

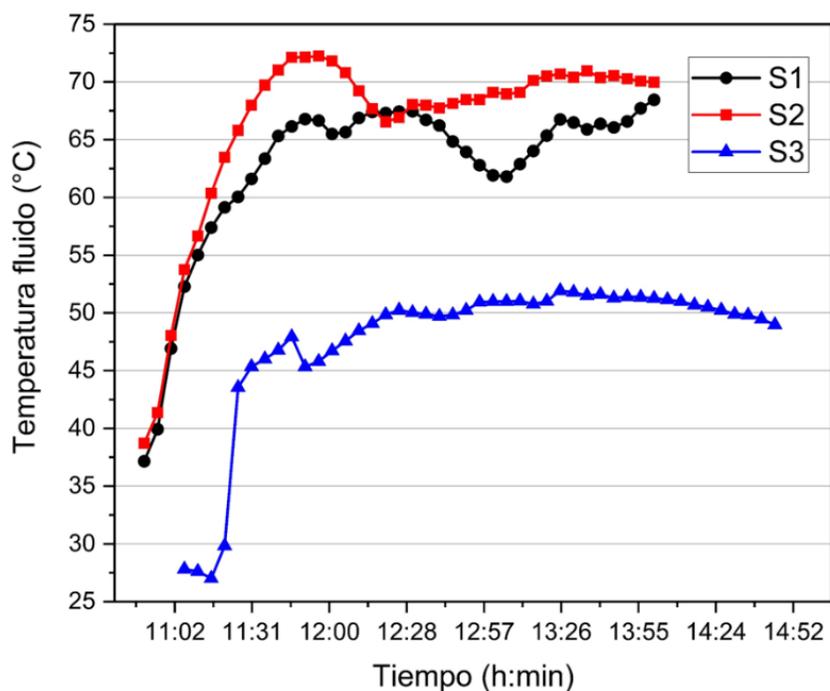


Figura 48. Valores de T_{fluido} medidos durante los tres días de síntesis solar etiquetados como S1, S2 y S3 en la Tabla 5

4.4 Caracterización de las nanoestructuras solares

4.4.1 Espectroscopia UV-Visible

Con el objetivo de conocer el comportamiento electrónico de los materiales sintetizados con energía solar, se evaluó el comportamiento de las muestras al exponerlas a un rango de luz de 300 a 800 nm. En la figura 49 se observa los espectros de reflectancia de las muestras sintetizadas por medio de radiación solar, S2 y S3. En los espectros se puede observar que las dos muestras son transparentes en la región del visible, y tienen una absorción del 97% en la región ultravioleta, a partir de los 380 nm. Este comportamiento es característico del ZnO, lo que nos confirma la obtención del semiconductor. Cabe señalar que S3 tiene una transparencia mayor al 100% en la región del visible, a diferencia de S2 que tienen un 90 %.

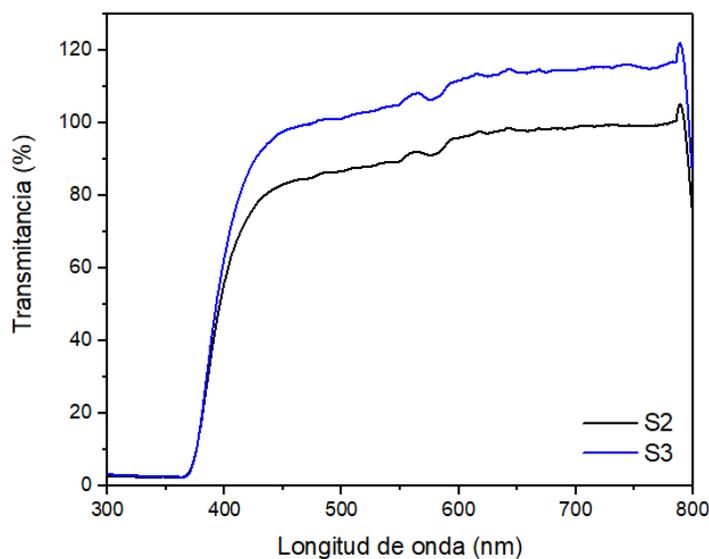


Figura 49. Espectro de reflectancia del ZnO sintetizado con energía solar.

4.4.2 Difracción de rayos-X

Para conocer la estructura cristalina de los nanomateriales sintetizados utilizando radiación solar se analizaron mediante difracción de rayos x. En la Figura 50 se muestran los patrones de difracción de las tres síntesis solares (S1, S2 y S3). Los patrones de las tres muestras presentan un comportamiento similar, con picos agudos y bien definidos, localizados a 32°, 35°, 38°, 48°, 57°, 63° y 68°. De igual forma que las

muestras sintetizadas a en el laboratorio, los picos corresponden a la fase cristalina hexagonal del ZnO, y los picos de difracción se pueden asociar a los planos (100), (002), (101), (102), (110), (103) y (112) de acuerdo con la ficha cristalográfica JCPDS NO 36–1451. A diferencia de las muestras sintetizadas en el laboratorio, estas muestran un crecimiento preferencial en el plano (002). Cabe destacar que no se presentan diferencias considerables en el arreglo cristalino entre las tres muestras, en consecuencia, se puede concluir que el método de síntesis es reproducible a pesar de los gradientes de temperatura observados durante la síntesis.

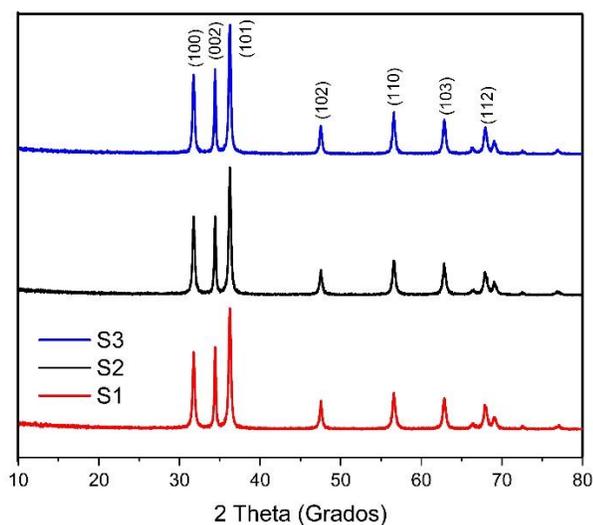


Figura 50. Difractograma de las nanoestructuras ZnO (S1, S2 y S3) sintetizadas con energía solar.

4.4.3 Espectroscopia Raman

Con el propósito de conocer la composición y estructura de las nanoestructuras de ZnO se procedió a analizarla por medio de espectroscopia Raman. En la Figura 51 se observan los espectros Raman del ZnO sintetizado con energía solar. Las muestras analizadas presentan un comportamiento similar. En los espectros se observa la presencia de un pico intenso en 226 cm^{-1} , correspondiente al modo vibracional $2E_{2(\text{low})}$, seguido por la emisión perteneciente al modo vibracional $E_{2(\text{high})}$ (410 cm^{-1}), otro pico localizado a 570 cm^{-1} asociado al modo $E_{1(\text{low})}$, y finalmente una banda localizada a 270 cm^{-1} asociada al modo A1.

4.4.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Para conocer la morfología de las nanoestructuras sintetizadas por energía solar se analizaron por microscopia electrónica de barrido. En las figuras 52 (a) y 52 (b) se puede observar la presencia de cúmulos circulares integrados por estructuras laminares bien definidas. En la imagen (a) se logra apreciar una distribución de tamaños muy homogénea de las estructuras obtenidas, con una morfología muy similar entre ellas. Las estructuras obtenidas tienen una morfología conocida como estructura tipo flores de óxido de zinc, característica de ZnO obtenido por el método de síntesis hidrotérmal (Carranza et al., 2021). Como se puede apreciar en la figura (b), las estructuras poseen un diámetro promedio de 2 micras y las láminas varían en espesor dentro del rango de 27 a 52 nm.

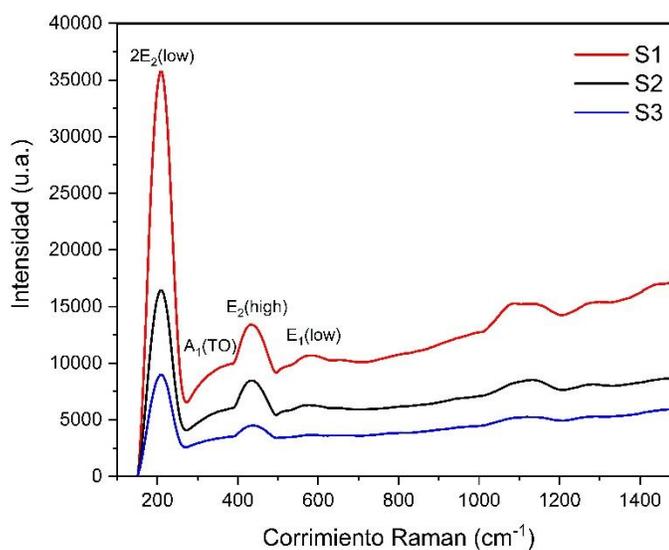


Figura 51. Espectro Raman para ZnO sintetizado con energía solar.

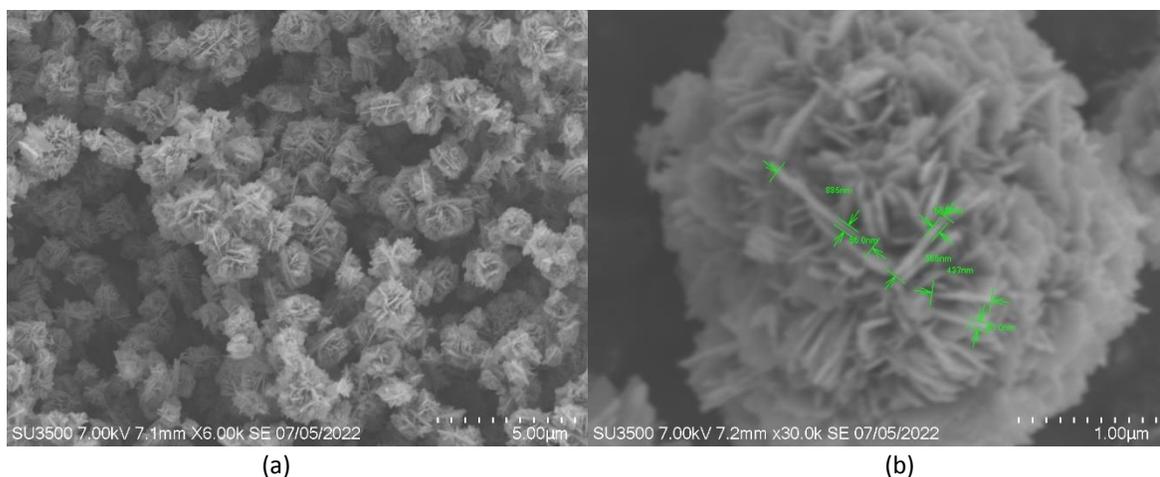


Figura 52. Imágenes de SEM de nanoestructuras de ZnO solar.

4.4.5 Fotoluminiscencia

En la figura 53 se observan los espectros de emisión de las muestras sintetizadas con energía solar (S1 y S2). En ambas muestras se observa un espectro similar, una emisión intensa en la región del ultravioleta, centrada en 340 nm, correspondiente a la emisión del borde de banda del óxido de zinc (Klingshirn et al., 2010). Además, se puede observar una emisión en la región del visible, centrada a 470 nm, asociada a defectos estructurales presentes en el material. El comportamiento observado es característico del ZnO, siendo esta una de las propiedades más atractivas para diferentes aplicaciones como: fotocatalisis, almacenamiento de energía y fotovoltaicas.

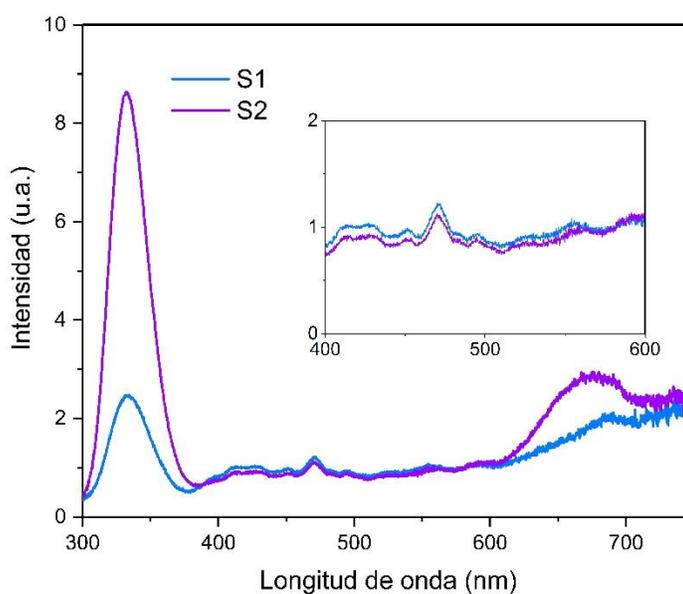


Figura 53. Fotoluminiscencia emitida por ZnO solar.

Capítulo 5. Discusión

5.1 Análisis de nanoestructuras sintetizadas en laboratorio

La síntesis de las nanoestructuras de ZnO en el laboratorio se llevó a cabo con el propósito de evaluar las propiedades de las nanoestructuras obtenidas a tres temperaturas distintas, dentro del intervalo de temperaturas que se esperaba alcanzar en el CPC. Entre las propiedades estudiadas, las que mostraron una mayor variación fueron las propiedades morfológicas. En la Sección 4.1.3 se muestran las imágenes de microscopía electrónica de barrido para las tres nanoestructuras obtenidas, observándose un cambio notable en la forma, y una reducción del tamaño de partícula a medida que se incrementó la temperatura de síntesis. Para la muestra sintetizada a 50 °C se tuvo una morfología cúbica irregular (Figura 40 a); después de incrementar la temperatura 10 °C, las estructuras de ZnO se presentan en forma de cúmulos laminares con espesores a nivel nanométrico (Figura 40 b). Al incrementar la temperatura a 70 °C, se observó otro cambio en la morfología de las estructuras, siendo mayormente de forma esférica, con un acabado rugoso (Figura 40 c). En estas últimas estructuras, fue difícil determinar la formación laminar, esto debido al pequeño tamaño de partículas.

Por otra parte, también se evaluó el cambio en sus propiedades estructurales, analizando los difractogramas de los materiales sintetizados a las tres temperaturas (Figura 38). Primeramente, se puede observar que todas las muestras cristalizaron en la fase hexagonal wurtzita. Sin embargo, es posible observar un mayor grado de cristalinidad a medida que se incrementó la temperatura de síntesis de las nanoestructuras, observándose picos más agudos y de mayor intensidad en la muestra sintetizada a 70°C. Este comportamiento se pudo corroborar mediante espectroscopia Raman, en la cual fue posible observar picos más intensos asociados a los modos de vibración del ZnO a medida que se incrementó la temperatura de síntesis.

En relación con las propiedades ópticas de las nanoestructuras, las tres muestras obtenidas presentaron un comportamiento característico del óxido de zinc (Figura 41), una alta transparencia en la región del visible, una absorción mayor al 90% en la región del ultravioleta. La muestra sintetizada a 70 °C fue la que presentó un mayor porcentaje de transmitancia en la región del visible, lo cual se asocia al grado de cristalinidad de la muestra. Por otra parte, es posible ver algunas fluctuaciones en los espectros de absorción de las muestras, los cuales pueden estar asociados a defectos presentes en la estructura

cristalina del nanomaterial. Dichos defectos fueron confirmados con la técnica de fotoluminiscencia (Figura 42), donde se puede observar la emisión característica del ZnO en el ultravioleta, así como una pequeña banda de emisión a 470 nm y 700 nm, la cual puede estar asociada a la presencia de átomos intersticiales en la estructura del ZnO. Se considera que estos defectos son causados por un exceso de átomos de oxígeno en la estructura cristalina, ya que la síntesis fue realizada en un ambiente acuoso.

5.2 Análisis de nanoestructuras sintetizadas con energía solar

En las síntesis solares, la temperatura fluctuó de acuerdo con la radiación solar incidente. Para S1 se obtuvo una temperatura máxima de 67.7°C y una temperatura de síntesis mínima de 50.2°C; para S2 se observó una temperatura máxima de 72.8°C y mínima de 51.8°C, y en el caso de S3 se presentó una temperatura máxima de 52°C y temperatura mínima de 44.6 °C. Se consideró como temperatura de síntesis a la temperatura mínima de 50°C que marcó el inicio del periodo de síntesis (3 h). A partir de los experimentos realizados para sintetizar las nanopartículas de ZnO utilizando el concentrador solar, se realizó una evaluación de las propiedades morfológicas, estructurales y ópticas de los diferentes lotes obtenidos.

En relación a sus propiedades morfológicas, se observaron nanoestructuras formadas por cúmulos de estructuras laminares, específicamente, estructuras tipo flor, las cuales presentaban un diámetro promedio de 2 μm , sin embargo, las láminas presentaban dimensiones por debajo de 100 nm (Figura 52). La distribución de morfologías y tamaños fue muy homogénea en las diferentes síntesis realizadas utilizando el CPC, a diferencia de las síntesis en laboratorio. La morfología observada en la síntesis solar es similar a la obtenida utilizando temperaturas de síntesis superior a los 60 °C. En relación a las propiedades estructurales, las muestras obtenidas resultaron cristalinas, todas ellas con una estructura hexagonal, en fase wurtzita, con un crecimiento preferencial en el plano (101), (Figura 50). Además, se observó un comportamiento similar en los espectros de Raman, presentando una mayor intensidad de los modos vibracionales asociados al ZnO en su fase hexagonal, siendo estos más intensos para la muestra sintetizada cuando se alcanzó una mayor temperatura en el CPC (Figura 51).

Por otra parte, las propiedades ópticas de estas nanoestructuras presentaron un comportamiento similar al observado en las muestras sintetizadas en el laboratorio (Figura 49): transparentes en la región del visible (>80%) y una absorción en la región del ultravioleta. En relación a los espectros de emisión, los espectros de fotoluminiscencia de la Figura 53 presentaron emisiones débiles a 460 nm. La diferencia más notoria entre la síntesis en laboratorio y solar fue la morfología. Esto se puede atribuir a que la fluctuación

de temperatura de síntesis se mantuvo superior al requerimiento mínimo. Otra característica del método solar es que se mantuvieron condiciones de flujo turbulento en estado estacionario. Se asumió que este tipo de flujo incrementó la homogeneidad en la solución produciendo una estandarización en los puntos de nucleación. En la Tabla 6 se observan las características físicas y estructurales de las síntesis solares y en laboratorio.

Tabla 4. Características y propiedades presentadas por las nanoestructuras sintetizadas.

Muestra	Morfología	Cristalinidad	Transmitancia en el visible (%)
L1	Cúbica	Cristalino, hexagonal	80%
L2	Cúmulos laminares	Cristalino, hexagonal	75%
L3	Esférica	Cristalino, hexagonal	100%
S2	Tipo flor	Altamente cristalino, hexagonal	85%
S3	Tipo flor	Altamente cristalino, hexagonal	100%

5.3 Análisis del consumo energético y ahorro de emisiones de CO₂

Como se mencionó anteriormente, el propósito de esta investigación fue proponer una alternativa para sintetizar nanomateriales a una escala mayor a la del laboratorio, tratando de minimizar el impacto ambiental y reducir el costo económico. Por consiguiente, se evaluó el consumo energético de ambas metodologías (síntesis tradicional en laboratorio y síntesis solar). Para conocer el consumo específico de la síntesis en laboratorio, se consideró la demanda de energía eléctrica por parte de la plancha térmica, mientras que para la síntesis solar se consideró el consumo eléctrico de la bomba hidráulica utilizada. En la Tabla 7 se muestra el consumo energético de una de las síntesis solares y de las síntesis en laboratorio a 50°C y 70°C con la finalidad de resaltar los requerimientos mínimos y máximos de energía. También se presenta el consumo energético específico en función de la cantidad de nanomaterial sintetizado por cada método y su impacto ambiental a través de las emisiones de CO₂ equivalentes.

A partir de la información mostrada en la Tabla 7 se deduce que por cada miligramo de ZnO sintetizado con energía solar se logran ahorros de energía eléctrica de 62.7% y 60.5% con respecto a las síntesis de laboratorio L1 y L2. De acuerdo con la calculadora de emisiones de CO₂ de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2011) dichos ahorros de electricidad equivalen a reducciones de CO₂ de 58.5% y 60.3%, correspondientemente. Asimismo, si el precio del kWh para tarifa industrial de pequeña

demanda y baja tensión variable en Baja California es de \$2.5 MXN aproximadamente (CFE, 2022) también se tiene un ahorro económico del 62.7% y 60.5 %, respectivamente. En la Tabla 8 se enlistan los ahorros aquí descritos.

Tabla 5. Consumo energético específico y emisiones de CO₂ correspondientes para tres de las síntesis.

Caso	Temperatura de síntesis (°C)	Consumo total de energía (Wh)	Emisiones de CO ₂ correspondientes (g)*	Cantidad de ZnO producida (mg)	Consumo específico de energía (Wh/mg)	Emisiones específicas de CO ₂ correspondientes (g/mg)*
L1	50	56.38	24.0	336.6	0.166	0.065
L3	70	58.14	25.0	369.6	0.157	0.068
S1	50-69	324.54	140.0	5225.0	0.062	0.027

*Estimación de emisiones de CO₂ obtenida de la base de datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2011).

Tabla 6. Ahorros de energía, de emisiones de CO₂ y económico.

Caso comparado	Ahorro de energía (%)	Ahorro de emisiones de CO ₂ (%)	Ahorro económico (%)
L1 respecto a S1	62.7	58.5	62.7
L3 respecto a S1	60.5	60.3	60.5

Del análisis energético aquí mostrado se puede observar que el ahorro promedio de energía eléctrica fue del 61.2%, lo que indica que el método de síntesis con energía solar es altamente recomendable desde el punto de vista energético, además tiene la ventaja adicional de presentar una reproducibilidad notable en el producto obtenido. Como el ahorro energético siempre se traduce en un ahorro económico y una disminución en las emisiones de CO₂, el desarrollo de tecnología de síntesis de nanomateriales con energía solar puede ser atractivo para la industria. Esto conlleva a que la aplicación e investigación de nanomateriales se incremente y favorezca la adaptación y regulación de la nanotecnología.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro

6.1 Conclusiones

A través de este trabajo de tesis se investigó la factibilidad de sintetizar nanoestructuras de ZnO utilizando energía solar concentrada. Para tal propósito se diseñó y construyó un concentrador solar CPC con absorbedor circular en el cual se sintetizaron las nanoestructuras por el método de auto acoplamiento en solución acuosa. Para fines comparativos, también se sintetizaron nanoestructuras de ZnO de manera convencional en el laboratorio a tres temperaturas distintas: 50°C, 60°C y 70°C. La metodología empleada fue similar a la metodología solar, con ligeras modificaciones en la agregación del NaOH. Por último, se hizo una estimación de los ahorros en energía eléctrica, costos y emisiones de CO₂.

De la etapa de diseño, construcción y caracterización del CPC se concluye lo siguiente:

Con base en las ecuaciones de diseño establecidas en la literatura se realizó un estudio numérico que permitió determinar los parámetros geométricos adecuados del concentrador: $\theta_a = 30^\circ$, $r = 20$ mm, truncamiento del 50% y $C = 1.8$. A partir de esta información, se realizaron los dibujos de diseño y ensamblajes requeridos para la fabricación y construcción del CPC.

Las mediciones de temperatura del fluido registradas durante la caracterización en el intervalo de trabajo (11:00 a 14:00 h) demostraron que el sistema tiene la capacidad de alcanzar y mantener un rango de temperatura adecuado para la síntesis de las nanoestructuras de ZnO. Las temperaturas del fluido máximas registradas durante los tres días de caracterización fueron 67.3°C, 69.6°C y 65.5°C respectivamente.

Se logró estandarizar el procedimiento de síntesis para obtener nanoestructuras de ZnO por la ruta tradicional y solar. De la etapa de síntesis y caracterización de las nanoestructuras de ZnO realizadas en laboratorio a tres diferentes temperaturas se concluye lo siguiente:

A partir de los resultados obtenidos por microscopía electrónica, se encontró que la morfología depende de la temperatura de síntesis; obteniendo cubos irregulares para L1, láminas aglomeradas para L2 y esferas rugosas para L3. Esta variación de morfología generó distintas propiedades estructurales y ópticas

Las muestras sintetizadas a 70°C mostraron un mayor grado de cristalinidad en comparación a las muestras sintetizadas a 50°C y 60°C. Este resultado se refleja en las propiedades ópticas de las nanoestructuras, donde la muestra L3 mostró una transparencia del 100% en la región del espectro visible, mientras que las muestras L1 y L2 mostraron una transparencia del 80% y 75% respectivamente.

Se sintetizaron de forma favorable nanoestructuras de ZnO utilizando radiación solar como fuente de energía. Las nanoestructuras sintetizadas mostraron una morfología de tipo flor. En relación con sus propiedades estructurales, las nanoestructuras mostraron un mayor grado de cristalinidad comparado con las síntesis en laboratorio. De la etapa de síntesis solar y caracterización de las nanoestructuras de ZnO se concluye lo siguiente:

La diferencia de temperatura en el fluido no impactó de manera significativa en la morfología del material. Se considera que las condiciones de flujo turbulento dentro del CPC ayudaron a estandarizar la morfología de las nanoestructuras.

A partir de la caracterización morfológica se observó que las tres síntesis solares mostraron buena reproducibilidad, mostrando estructuras tipo flor con un diámetro promedio de 2 μm , constituidas por láminas (pétalos) que varían en el rango de 27 a 52 nm.

Por último, del análisis de consumo energético se concluye lo siguiente:

Con respecto a la síntesis de laboratorio a 50°C, por cada mg de ZnO sintetizado con energía solar se lograron ahorros de 62.7% en electricidad, 58.5% en emisiones de CO₂ y 62.7% en costos.

Con respecto a la síntesis de laboratorio a 70°C, por cada mg de ZnO sintetizado con energía solar se lograron ahorros de 60.5% en electricidad, 60.3% en emisiones de CO₂ y 60.5% en costos.

6.2 Recomendaciones para trabajo futuro

Derivado del trabajo experimental realizado en esta tesis y de la experiencia adquirida se emiten las siguientes recomendaciones para futuros estudios sobre el tema:

Desarrollar un procedimiento más adecuado para medir la temperatura de la superficie del tubo absorbedor en el concentrador CPC con el propósito de mejorar la caracterización del sistema.

Ampliar el análisis de consumo energético incluyendo parámetros como la energía solar absorbida por el tubo absorbedor, calor ganado por el fluido y eficiencia térmica del concentrador.

Evaluar la factibilidad del sistema para sintetizar otros tipos de nanomateriales, con diferentes metodologías utilizando energía solar.

Probar el sistema en diferentes ubicaciones geográficas para conocer el rendimiento a distintas condiciones ambientales.

Evaluar las propiedades de los materiales sintetizados que puedan darle cierta aplicación, como: densidad, conductividad térmica, calor específico, resistencia mecánica, toxicidad, entre otras.

Literatura citada

- Bhunia A K, Jha P K, Rout D, S. S. 2016. Morphological Properties and Raman Spectroscopy of ZnO Nanorods. 2021. *Journal of Physical Science*, 111–118. Recuperado en junio 2021 de: https://www.researchgate.net/publication/312154275_Morphological_Properties_and_Raman_Spectroscopy_of_ZnO_Nanorods
- Barbe, T., Flamant, G., Nadal, E., Vossier, A., Olalde, G., Gordon, J. M., & Bataille, F. 2022. Elucidating the gas flow dynamics in a nanomaterial synthesis solar reactor. *Chemical Engineering Journal*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135846>
- Basiukk, V., & Basiuk. 2015. Green Processes for Nanotechnology. *Inorganic to Bioinspired Nanomaterials*. Recuperado en agosto 2021 de: <http://dspace.conacyt.gov.py/xmlui/handle/123456789/12993>
- Borbón-Nuñez, H. A., Cruz-Vázquez, C., Bernal, R., Kitis, G., Furetta, C., & Castaño, V. M. 2014. Thermoluminescence properties of sintered ZnO. *Optical Materials*, 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.06.034>
- Carranza, F., Villa, C. D., Aguilar, J., Borbón-Nuñez, H. A., & Saucedo, D. 2021. Experimental study on the potential of combining tio₂, zno, and al₂ o₃ nanoparticles to improve the performance of a double-slope solar still equipped with saline water preheating. *Desalination and Water Treatment*, 216, 14–33. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26760>
- Carvajal-Campos, Y., Ceballos-Mendivil, L., Baldenebro-López, F., Pérez-Rábago, C., & Estrada, C. A. 2019. Synthesis and characterization of tantalum carbide nanoparticles using concentrated solar energy. *Advanced Powder Technology*, 30(11), 2574–2579. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.08.004>
- Ceballos-Mendivil, L. G., Cabanillas-López, R. E., Tánori-Córdova, J. C., Murrieta-Yescas, R., Pérez-Rábago, C. A., Villafán-Vidales, H. I., Arancibia-Bulnes, C. A., & Estrada, C. A. 2015. Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy. *Solar Energy*, 116, 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.006>
- CFE. 2022. Esquema tarifario vigente. Recuperado en septiembre 2022 de: <https://App.Cfe.Mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Negocio.AspX>
- Chaithanatkun, N., Chantarawong, D., Songkeaw, P., Onlaor, K., Thiwawong, T., & Tunhoo, B. 2015. Effect of ascorbic acid on structural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation process. 2015 IEEE 10th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2015, 145–148. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2015.7147396>
- Chien, Y. H., Huang, C. C., Wang, S. W., & Yeh, C. S. 2011. Synthesis of nanoparticles: Sunlight formation of gold nanodecahedra for ultra-sensitive lead-ion detection. *Green Chemistry*, 13(5), 1162–1166. <https://doi.org/10.1039/c0gc00915f>
- Corr, S. A. 2016. Metal oxide nanoparticles. *SPR Nanoscience*, 31–56. <https://doi.org/10.1039/9781782623717-00031>
- D Laplaze, P Bernier, G Flamant, M Lebrun, A Brunelle, & S Della-Negra. 1996. Solar energy: application to the production of fullerenes. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 29(21), 4943. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/29/21/008>

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Fernández-García, M., & Rodríguez, J. A. 2007. *Metal Oxide Nanoparticles*. <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc0331>
- Flamant, G., Ferriere, A., Laplace, D., & Monty, C. 1999. *Solar processing of materials: opportunities and new frontiers* (Vol. 66, Issue 2). Recuperado en mayo 2022 de: www.elsevier.com/locate/solener
- Gottardo, S., Mech, A., Drbohlavová, J., Małyska, A., Bøwadt, S., Riego Sintés, J., & Rauscher, H. 2021. Towards safe and sustainable innovation in nanotechnology: State-of-play for smart nanomaterials. In *NanoImpact* (Vol. 21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100297>
- Hsieh, C. K. 1981. Thermal analysis of CPC collectors. *Solar Energy*, 27(1), 19–29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90016-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90016-5)
- Incropera Frank P. 2000. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. Wiley.
- Borbón-Nuñez. 2010. *Síntesis, Caracterización Termoluminiscente y Determinación de Parámetros Cinéticos de ZnO Tratado Térmicamente*. Tesis de Maestría. Universidad De Sonora División De Ingeniería.
- IRENA. 2021, *Patents Evolution*. Recuperado en febrero 2021 de: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Innovation-and-Technology/Patents-Evolution>
- Jadhav, N. L., Gondhalekar, K. A., Doltade, S. B., & Pinjari, D. 2018. Concentrated solar radiation aided green approach towards the synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles by photochemical oxidation of FeCl₂. *Solar Energy*, 171, 769–773. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.027>
- Kalogirou, S. A. 2009. Chapter three - Solar Energy Collectors. Kalogirou, Ed.; pp. 121–217). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.00003-0>
- Klingshirn, C. F., Meyer, B. K., Waag, A., Hoffmann, A., & Geurts, J. 2010. *Zinc Oxide* (Vol. 120). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10577-7>
- Murty, B. S., Shankar, P., Raj, B., Rath, B. B., & Murday, J. 2013. *Textbook of Nanoscience and Nanotechnology*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28030-6>
- Negrea, D., Ducu, C., Moga, S., Malinovschi, V., Monty, C. J. A., Vasile, B., Dorobantu, D., & Enachescu, M. 2012. Solar physical vapor deposition preparation and microstructural characterization of TiO₂ based nanophases for dye-sensitized solar cell applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(11), 8746–8750. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6814>
- Norton, B. 2013. Solar energy. In *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*. Begellhouse. https://doi.org/10.1615/AtoZ.s.solar_energy
- Pranesh, V., Velraj, R., Christopher, S., & Kumaresan, V. 2019. A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications. *Solar Energy*, 187, 293–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.056>

- Pudukudy, M., & Yaakob, Z. 2015. Facile Synthesis of Quasi Spherical ZnO Nanoparticles with Excellent Photocatalytic Activity. *Journal of Cluster Science*, 26(4), 1187–1201. <https://doi.org/10.1007/s10876-014-0806-1>
- Rabl, A. 1987. Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90069-4)
- Rabl, A. 1976. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators. *Solar Energy*, 18(6), 497–511. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90069-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90069-4)
- Rabl, A., Goodman, N. B., & Winston, R. 1979. Practical design considerations for CPC solar collectors. *Solar Energy*, 22(4), 373–381. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90192-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90192-0)
- Ramya, V., Kalaiselvi, V., Kannan, S. K., Shkir, M., Ghramh, H. A., Ahmad, Z., Nithiya, P., & Vidhya, N. 2021. Facile Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Psidium guajava leaf Extract and Their Antibacterial Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05717-1>
- Rosenberg, R. A., Abu Haija, M., Vijayalakshmi, K., Zhou, J., Xu, S., & Wang, Z. L. 2009. Depth resolved luminescence from oriented ZnO nanowires. *Applied Physics Letters*, 95(24). <https://doi.org/10.1063/1.3275000>
- Sahu, K., kuriakose, S., Singh, J., Satpati, B., & Mohapatra, S. 2018. Facile synthesis of ZnO nanoplates and nanoparticle aggregates for highly efficient photocatalytic degradation of organic dyes. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 121(April), 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.04.023>
- Serrano, E., Rus, G., & García-Martínez, J. 2009. Nanotechnology for sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2373–2384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.003>
- Siddiquee, S., Melvin, G. J. H., & Rahman, M. M. 2019. Nanotechnology: Applications in energy, drug and food. In *Nanotechnology: Applications in Energy, Drug and Food*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99602-8>
- Solargis. Enero 1. 2020. The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data. Consultado en octubre 2022 de: <https://Solargis.Com/Maps-and-Gis-Data/Download/World>.
- Surender Kumar, Dalip Singh, & Latif Ullah Khan. 2018. *Handbook of Materials Characterization*. Springer. Recuperado en abril 2021 de: <https://www.springerprofessional.de/handbook-of-materials-characterization/16134024>
- Szokolay, S. V. 1996. *Solar geometry. Plea, Passive and Low Energy Architecture International in assoc. with Dept. of Architecture*. Recuperado en febrero 2021 de: https://qut.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=alma991003732709704001&context=L&vid=61QUT_INST:61QUT&lang=en&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=any,contains,991003732709704001&sortby=rank
- Tagle-Salazar, P. D., Nigam, K. D. P., & Rivera-Solorio, C. I. 2018. Heat transfer model for thermal performance analysis of parabolic trough solar collectors using nanofluids. *Renewable Energy*, 125, 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.069>

- Tay, Y. Y., Tan, T. T., Boey, F., Liang, M. H., Ye, J., Zhao, Y., Norby, T., & Li, S. 2010. Correlation between the characteristic green emissions and specific defects of ZnO. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 12(10), 2373–2379. <https://doi.org/10.1039/b922372j>
- Wang, M., Zhou, Y., Zhang, Y., Hahn, S. H., & Kim, E. J. 2011. From Zn(OH)₂ to ZnO: A study on the mechanism of phase transformation. <https://doi.org/10.1039/c1ce05502j>
- Yao, D., Chen, Z., Zhao, K., Yang, Q., & Zhang, W. 2013. Limitation and Challenge Faced to the Researches on Environmental Risk of Nanotechnology. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.020>