



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN REACTOR CPC FOTOCATALÍTICO
AUTOMATIZADO EMPLEANDO ZnO/CuO PARA LA DEGRADACIÓN DE
CONTAMINANTES ORGÁNICOS**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M.C.I. JOSÉ MAURICIO RODRÍGUEZ VALENCIA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO

CUNDUACÁN, TABASCO, A: ENERO 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán Tabasco, el día 16 del mes enero del año 2025, el que suscribe José Mauricio Rodríguez Valencia alumna(o) del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 192D20005, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado y titulada DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN REACTOR CPC FOTOCATALÍTICO AUTOMATIZADO EMPLEANDO ZnO/CuO PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS dirigida por Dra. Lizeth Rojas Blanco.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 16 de enero 2025.

José Mauricio Rodríguez Valencia

Nombre y Firma



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/140/2025
FECHA: 14 de enero de 2025
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

M.C.I. JOSÉ MAURICIO RODRÍGUEZ VALENCIA
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"Diseño, construcción y control de un reactor CPC fotocatalítico automatizado
empleando ZnO/CuO para la degradación de contaminantes orgánicos"**

Para obtener el grado de **Doctor en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como
Directora de Tesis a la Dra. Lizeth Rojas Blanco.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los
trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

c.c.p. Archivo

DRA'DMFM / MCA'RACT



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
MÉXICO

JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 16 de diciembre de 2024.
MEM/AP-DAIA/231/2024

PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**"Diseño, construcción control de un reactor CPC fotocatalítico automatizado
empleando ZnO/CuO para la degradación de contaminantes orgánicos"**

Desarrollado por el MCI. **José Mauricio Rodríguez Valencia**, del **Doctorado en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMITÉ SINODAL

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
PRESIDENTE

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
SECRETARIO

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
VOCAL 1

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 2

DR. JUAN BARAJAS FERNANDEZ
VOCAL 3

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
VOCAL 4

DR. JUAN GABRIEL ALVAREZ RAMÍREZ
VOCAL 5

Miembro CUMEX desde 2008
**Consortio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD PARA LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán –Jalpa de Méndez, km 1, Col. La Esmeralda,
C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
e-Mail: dirección.daia@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 16 de enero 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORO en la producción, creación y/o realización de la obra denominada DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN REACTOR CPC FOTOCATALÍTICO AUTOMATIZADO EMPLEANDO ZnO/CuO PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS.

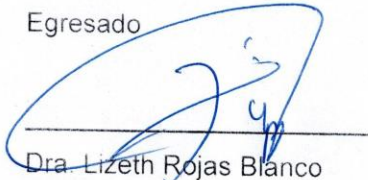
Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



M.C.I. José Mauricio Rodríguez Valencia

Egresado



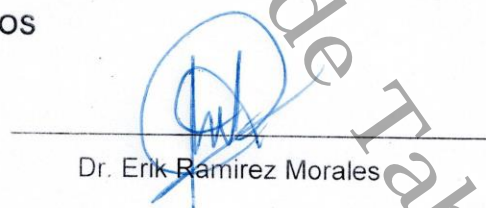
Dra. Lizeth Rojas Blanco

DIRECTORA

TESTIGOS



Dra. Marcela del Carmen Arellano Cortazar



Dr. Erik Ramírez Morales

Dedicatoria

A los Dra. Lizeth y Dr. Erik quienes me guiaron durante mi formación en el posgrado en ciencias en ingeniería, también agradecido por su paciencia, tiempo y dedicación hacia mí y mi proyecto de investigación.

A los Doctores del programa de posgrado, ellos me brindaron su dirección para concretar mi proyecto de tesis.

A mi familia quienes estuvieron apoyándome en el desarrollo de todo lo relacionado a mi proyecto.

A Cinthya que estuvo todo el tiempo apoyándome y entendiendo todo lo engloba llevar a cabo en trabajo de investigación.

A mis compañeros de trabajo, Luis, Pedro, Jaime, que me brindaron ideas, conocimientos y apoyo para mi proyecto.

A los muchachos de servicio social del laboratorio de electrónica que también me ayudaban mientras yo atendía algunos procesos de mi tesis, en especial el estudiante Marcin.

Agradecimiento

A los asesores los doctores integrantes del PD de DCI que estuvieron al pendiente del desarrollo del tema de investigación.

Al laboratorio de Semiconductores, por todo el soporte para poder realizar los experimentos de mi investigación.

A los responsables del laboratorio de nanotecnología, laboratorio de microscopia electrónica y laboratorio de forja y soldadura por impartir cursos importantes para la formación de los estudiantes, de la misma forma al Ing. Pedro Madrigal y al maestro Enrique Montero encargados de los laboratorios de máquinas y herramientas y laboratorio de control e instrumentación respectivamente, por su apoyo y consejos para este trabajo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de contenido

Capítulo I Introducción	20
1.1 Planteamiento del problema	20
1.2 Antecedentes	20
1.3 Justificación	24
1.4 Objetivos del Proyecto	25
Capítulo 2 Marco Teórico	27
2.1 Contaminación en el agua	27
2.2 Proceso avanzado de oxidación (PAO)	29
2.2.1 Fotocatálisis	30
2.2.2 Óxido de Zinc (ZnO)	31
2.2.3 Óxido de Cobre (CuO)	33
2.2.4 Heterounión	34
2.2.5 Heterounión de ZnO/CuO	35
2.2.5.1 Heterounión de ZnO/CuO en fotocatálisis	36
2.3 Técnicas de caracterización	38
2.3.1 Técnica de Termogravimetría (TGA)	38
2.3.2 Técnica de Difracción de Rayos X (XRD)	39
2.3.3 Técnica de Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS)	40
2.3.4 Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	42
2.3.5. Técnica de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)	44
2.3.6 Técnica de Fisisorción de Nitrógeno	45
2.3.7 Técnica de Espectroscopía de luz Ultravioleta y Visibles de reflectancia difusa (UV-Vis)	47

2.4 Reactores fotocatalíticos	49
2.4.1 Reactor fotocatalítico CPC	50
2.4.2 Concentración de la luz en el CPC	52
2.4.3 Diámetro del tubo receptor en el CPC	53
2.4.4 Ubicación del tubo receptor en el CPC	55
2.5 Control del CPC.....	57
2.6 Diseño de experimento para el CPC (DE)	61
2.7 Instrumentación electrónica y medición <i>in situ</i> CPC	64
Capítulo 3 Desarrollo experimental.....	67
3.1 Síntesis de ZnO	67
3.2 Síntesis de CuO.....	67
3.3 Síntesis de ZnO/CuO.....	68
3.4 Condiciones de los equipos usados para la caracterización de ZnO, CuO y ZnO/CuO	69
3.5 Prueba fotocatalítica	70
3.6 Prueba fotocatalítica en CPC	70
3.7 Diseño de experimento.....	71
Capítulo 4 Resultados y discusión	75
4.1 Termogravimetría (TGA).....	75
4.2 Difracción de Rayos X (XRD)	76
4.3 Espectroscopía Fotelectrónica de Rayos X (XPS).....	80
4.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	84
4.5 Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)	85
4.6 Fisisorción de Nitrógeno	86
4.7 Espectroscopía de luz Ultravioleta y Visibles de reflectancia difusa (UV-Vis)	88

4.8 Actividad fotocatalítica	91
4.8.1 ZnO y ZnO/CuO en presencia de AM usando lámpara fluorescente UV	91
4.8.2 ZnO y ZnO/CuO en presencia de AM usando LEDs	93
4.8.3 Comparación de la degradación de UV con ZnO y LEDs con ZnO/CuO	96
4.9 Reutilización de ZnO/CuO	98
4.10 CPC	100
4.10.1 Simulación del CPC	100
4.10.2 Construcción del CPC	102
4.10.3 Soporte de CPC (ejes de orientación e inclinación)	104
4.10.4 Diseño y Construcción de bridas	105
4.10.5 Tubería del CPC	109
4.10.6 Control del seguidor solar	109
4.10.7 Instrumentación del CPC	123
4.10.8 Prueba de operación del CPC	127
4.10.9 Optimización del CPC (DE)	129
4.10.10 Conclusiones del Diseño de Experimento	146
Capítulo 5 Conclusión	151
Referencias	153
Anexo 1	166

Índice de Tabla

Tabla 1	<i>Degradación de contaminantes en presencia de ZnO/CuO.....</i>	22
Tabla 2	<i>Principales contaminantes en el agua (Hlongwane et al., 2019)</i>	28
Tabla 3	<i>Potencial de reducción de especies reactivas de oxígeno.....</i>	29
Tabla 4	<i>Descripción de cada elemento de control para el sistema tracking</i>	60
Tabla 5	<i>Los factores y sus niveles para las series de los experimentos.....</i>	62
Tabla 6	<i>Listado de elementos requeridos para instrumentar un CPC</i>	66
Tabla 7	<i>Análisis de Varianza (ANOVA)</i>	73
Tabla 8	<i>Tamaños de cristalito de ZnO, CuO y ZnO/CuO</i>	80
Tabla 9	<i>Características texturales de ZnO y ZnO/CuO</i>	88
Tabla 10	<i>Comparativa del consumo energético en la degradación de AM en presencia de ZnO/CuO.</i>	98
Tabla 11	<i>Parámetros iniciales del CPC.</i>	100
Tabla 12	<i>Propiedades del material empleado para la construcción de la brida. ...</i>	107
Tabla 13	<i>Comparativo de consumo eléctrico entre un sistema digital y uno analógico. 111</i>	
Tabla 14	<i>Valores de los elementos del control del seguidor solar.....</i>	120
Tabla 15	<i>Pruebas aleatorias para la degradación del contaminante dentro del CPC. 130</i>	
Tabla 16	<i>Porcentaje de las pruebas de degradación a diferente factores y niveles a 240 min. 139</i>	
Tabla 17	<i>Tabla de análisis de varianza (ANOVA).....</i>	139
Tabla 18	<i>Porcentaje de las pruebas de degradación a 120 min.....</i>	142
Tabla 19	<i>Tabla de análisis de varianza (ANOVA) a 120 min.....</i>	142
Tabla 20	<i>Porcentaje de las pruebas de degradación a 30 min.....</i>	144

Índice de Figuras

Figura 1.	Principio básico de la fotocatalisis	30
Figura 2.	Estructura cristalina de óxido de zinc: a) cubica sal de roca, b) cubica zinc blenda, c) hexagonal wurtzita.....	32
Figura 3.	Estructuras cristalinas del óxido de cobre a) CuO y b) Cu ₂ O	33
Figura 4.	Clasificación de las heterouniones y su forma de bandas prohibida	34
Figura 5.	Dos semiconductores con diferente banda prohibida, formando un equilibrio al nivel de Fermi.....	35
Figura 6.	Heterounión tipo escalón formada por ZnO/CuO.....	36
Figura 7.	Proceso de fotocatalisis de la heterounión de ZnO/CuO	37
Figura 8.	Concepto de los componentes principales de TGA	39
Figura 9.	Concepto de los componentes principales de XRD	40
Figura 10.	Representación conceptual de la técnica de XPS	42
Figura 11.	Concepto de los componentes principales del SEM.....	43
Figura 12.	Concepto de los componentes básicos del TEM	45
Figura 13.	Clasificación de isothermas por la IUPAC (Thommes et al., 2015)	46
Figura 14.	Clasificación de las histéresis por la IUPAC (Thommes et al., 2015)	47
Figura 15.	Concepto de la absorción de una longitud de onda en un material	48
Figura 16.	Colector con absorbedor de forma a) cilíndrica y b) plana.....	50
Figura 17.	Diagrama esquemático del CPC.....	52
Figura 18.	Trayectoria del rayo de luz dentro del CPC	53
Figura 19.	(a) Radio y (b) Diámetro mínimo del tubo receptor.....	54
Figura 20.	Diámetro máximo del tubo receptor	55
Figura 21.	Tubo receptor ubicado con respecto al foco, (a) centrado, (b) desfasado en vertical a $\frac{3}{4}$ de diámetro hacia abajo, (c) Arco superior centrado al foco, (d) $\frac{1}{4}$ de diámetro separado entre el tubo y el foco	57

Figura 22.	Clasificación de los sistemas de seguimiento solar	59
Figura 23.	Diagrama de bloque de un sistema de control de lazo cerrado	60
Figura 24.	Pasos de un diseño de experimento.....	62
Figura 25.	Proceso de obtención de análisis de varianza.....	64
Figura 26.	Proceso de la síntesis de ZnO.....	67
Figura 27.	Síntesis de CuO.....	68
Figura 28.	Síntesis de ZnO/CuO.....	69
Figura 29.	Termogravimetría de la muestra ZC1	76
Figura 30.	Difracción de Rayos X de la muestra de Z1 comparado con el estándar PDF 01-079-5604 de ZnO	77
Figura 31.	Difracción de Rayos X de la muestra de C1 comparado con el estándar PDF 01-089-5896 de CuO	78
Figura 32.	a) Difracción de Rayos X de la muestra ZC1 comparado con el estándar de ZnO y CuO, b) deconvolución de ZC1 para mostrar los planos de CuO.....	79
Figura 33.	Survey XPS de a) ZnO y b) ZnO/CuO, resaltando la presencia de la energía de enlace de Zn, Cu, y O	81
Figura 34.	Espectro XPS, presencia del estado de oxidación de Cu ⁺² y señal satélite de la muestra CuO	82
Figura 35.	Espectro XPS, desplazamiento de la energía de enlace de Zn en las muestras de ZnO y ZnO/CuO	83
Figura 36.	Deconvolución del espectro XPS de O 1s	84
Figura 37.	Micrografía SEM de ZnO a diferentes magnificencia (a,b) y ZnO/CuO (d,e). EDS de ZnO (c) y ZnO/CuO (f).....	85
Figura 38.	Micrografía TEM de a) ZnO y b) ZnO/CuO	86
Figura 39.	a) el ZnO y b) el ZnO/CuO tiene Isotermas tipo IV y ambas con presencia de macroporos	87

Figura 40.	Espectro de absorbancia de ZnO y la estimación de su banda prohibida	89
Figura 41.	Espectro de absorbancia de CuO y la estimación de su banda prohibida	90
Figura 42.	El espectro de ZnO/CuO es activa en la misma región del ZnO, pero absorbe en la región visible como CuO y la estimación de la banda prohibida de ZnO/CuO	91
Figura 43.	a) Lámpara fluorescente UV usada en las pruebas fotocatalíticas en b) ZnO y en c) ZnO/CuO	93
Figura 44.	a) LEDs usados para prueba fotocatalítica en b) ZnO y c) ZnO/CuO	94
Figura 45.	Proceso de degradación de AM en presencia de ZnO/CuO	95
Figura 46.	Comparación de potencia eléctrica, degradación con respecto al tiempo de ZnO y ZnO/CuO	97
Figura 47.	Pruebas de reutilización de ZnO/CuO en AM	99
Figura 48.	Simulación del CPC con el software SolTrace	101
Figura 49.	Proceso de la construcción del colector	103
Figura 50.	La comprobación del CPC se dio cuando un haz de luz puntual (flecha amarilla) se proyectó en varias zonas del colector y su reflexión (flecha naranja) siempre se dirigió en la superficie del tubo receptor	104
Figura 51.	Mecanismo de orientación e inclinación	105
Figura 52.	Diseño y construcción de la brida	106
Figura 53.	Puntos de esfuerzos de la brida del CPC	108
Figura 54.	Los haces de luz llegan perpendicular a la superficie del colector, b) ejes X y Y del seguidor solar	110
Figura 55.	a) Longitudes de onda en el espectro visible emitidas por el sol y b) respuesta del LRD a la luz	112
Figura 56.	Set point del sistema de control de seguimiento solar	113
Figura 57.	Retroalimentación del sistema de control del seguidor solar	114

Figura 58.	Sistema de control para el seguidor solar en el CPC	115
Figura 59.	Elementos de procesos que forman parte del sistema de control del seguidor solar.....	116
Figura 60.	Respuesta del voltaje del potenciómetro al momento de girar el CPC ..	117
Figura 61.	Función de transferencia con un 95.64% de aproximación con el respecto a la medición experimental.....	118
Figura 62.	a) Simulación de la respuesta del modelo matemático y b) diagrama a bloques hechas en Simulink.....	119
Figura 63.	Diagrama final del sistema de control del seguidor solar.....	121
Figura 64.	a) Diseño PCB del set point, b) PBC del control del seguidor solar y c) PCB de conectores de alimentación eléctrica (+3.3V, +5V, +12V, -12V y GND)	122
Figura 65.	a) Código G de la PCB wizard, b) Maquinado de la baquelita con un CNC usando código G y c) resultado final de las PBC usada en el sistema de control del seguidor solar.....	123
Figura 66.	Código de lectura de un sensor MQ135.....	125
Figura 67.	Código de lectura para los sensores de temperatura y flujo de agua	126
Figura 68.	Grafica solar construida en SunEarthTool.com para a la ubicación 18° 4' 23.806" N, 93° 9' 52.554" W y datos de elevación y azimut por hora.....	128
Figura 69.	a) CPC situado de este a oeste, con base b) en la trayectoria del sol...	129
Figura 70.	Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 10-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 1L/min.....	131
Figura 71.	Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 11-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 4L/min.....	132
Figura 72.	Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 12-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 4L/min.....	133
Figura 73.	Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 13-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 1L/min.....	134

Figura 74. Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 14-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 1L/min.....	135
Figura 75. Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 18-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 4L/min.....	136
Figura 76. Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 19-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 4L/min.....	137
Figura 77. Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 20-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 1L/min.....	138
Figura 78. Gráfica de efectos de los factores contra degradación.....	141
Figura 79. Diagrama de Pareto de los efectos principales de los factores de la degradación a 120 min.....	143
Figura 80. Grafica de efectos principales de la degradación a 30min.....	145
Figura 81. Gráfica de Pareto de los efectos principales de los factores de la degradación a 30 min.....	146
Figura 82. Simulación de intensidad de flux en el tubo del CPC	148
Figura 83. Gráficas de interacciones entre factores y sus niveles, correspondiente al análisis a 30min	150

La degradación del contaminante orgánico en presencia de ZnO/CuO fue más rápida en el diseño construido del reactor CPC fotocatalítico automatizado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Resumen

La contaminación en los medios acuosos se incrementa diariamente, los principales contaminantes son los orgánicos y entre ellos lo que predominan son los colorantes, estos afectan de forma directa o indirecta a la salud, por lo tanto, se realizan investigaciones para mejorar la calidad del agua.

Una alternativa para solucionar la contaminación en el agua, son los procesos avanzados de oxidación, como la fotocatalisis, esta consiste en el uso de un material semiconductor que es irradiado con una fuente de energía en su superficie para formar radicales hidroxilos y súperóxidos, estos reaccionan con el contaminante y los reduce a CO_2 y H_2O . En este trabajo se obtuvo una interfaz entre el ZnO y CuO, para aprovechar la luz visible del sol y así mineralizar el contaminante modelo.

El CPC es un dispositivo que incrementa la efectividad ZnO/CuO, por lo tanto, se diseñó y construyó un CPC, con un sistema de control al seguidor solar para aprovechar mejor los rayos del sol durante el día, todo esto por medio de instrumentación de electrónica analógica. Esta tiene la ventaja que los elementos son fáciles de encontrar en el mercado, también son económicos y fáciles de reemplazar, sin necesidad de ser programados.

Las condiciones de operación del CPC fueron: velocidad de fluido a 4 L/min en un horario de 12 a 2pm, obteniendo una degradación del 99%. La orientación del CPC es norte a sur y de este a oeste. En condiciones de presencia de nubes mantener la velocidad de fluido de 4 L/min para mejorar la velocidad de degradación.

Abstract

The pollution in water increases daily, the main pollutants are organic and among them the predominant are dyes, these effects directly or indirectly to health, therefore, research is carried out to improve water quality.

An alternative to solve water pollution is advanced oxidation processes, such as photocatalysis, this consists of the use of a semiconductor material that is irradiated with an energy source so that hydroxyl radicals and superoxides are formed on the surface of the material, these react with the pollutant and reduce them to CO₂ and H₂O. In this work, an interface between ZnO and CuO was obtained, to take advantage of the visible light of the sun and thus mineralize the model pollutant.

The CPC is a device that increases the effectiveness of ZnO/CuO, therefore, a CPC was designed and built, with a control system for the solar tracker to better take advantage of the sun's rays during the day, all this by means of analog electronic instrumentation. This has the advantage that the elements are easy to find on the market, they are also inexpensive and easy to replace, without the need to be programmed.

The optimal operating conditions of the CPC were: fluid speed at 4 L/min from 12 to 2pm, obtaining a degradation of 99%. The orientation of the CPC is north to south and east to west. In cloudy conditions, maintain the fluid speed of 4 L/min, to improve the degradation rate.

Palabras claves

Degradación de contaminantes, Síntesis, Fotocatálisis, ZnO, CuO, ZnO/CuO, CPC, Seguidor solar, Control, Instrumentación electrónica, Optimización.

Capítulo I

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El planeta tierra está cubierto a un 70% de agua en su superficie, esa cantidad lo forma el agua salada (97.5%) y el agua dulce (2.5%), el agua dulce se encuentra en su mayor parte formada por: glaciares o hielo (70%), aguas subterráneas (\approx 30%) y agua disponible para consumo humano y los ecosistemas ($>$ 1%), de esa pequeña cantidad de agua dulce, el 69% es destinado al sector agropecuario, un 19% para el sector industrial y 12% al sector municipal (Arronte G.R., 2017).

En las últimas décadas, la calidad del agua de ese 12% se ha reducido por contaminantes que contienen compuestos tóxicos y cancerígenos, los cuales proveniente de la industria textil, alimenticia, cosmética, pesticidas, herbicidas, etc. (Bora & Mewada, 2017).

1.2 Antecedentes

Los esfuerzos para contrarrestar a los contaminantes han traído el desarrollo de varios métodos como: degradación biológica (Xie et al., 2018), adsorción (Benally et al., 2019), extracción por solvente y separación por membrana (Calatayud-Vernich et al., 2019). Los métodos anteriores no degradan los contaminantes, solo los transfieren a concentraciones sólidas; como alternativa surgen los procesos avanzados de oxidación (PAO). Estos son ampliamente usados debido a su estabilidad y simplicidad de reproducción, su principal característica es la generación de radicales OH^{\cdot} (hidroxilos) y súper óxidos (Ochoa-Gutiérrez et al., 2018), estos son altamente reactivos, no selectivos y mineralizan los contaminantes a dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y a otros compuestos inocuos sin generar residuos peligrosos (Pérez-González et al., 2019a).

La fotocatalisis es un PAO, consiste cuando una luz incide sobre un material semiconductor y produce reacciones de reducción y oxidación (redox), luego estas logran la degradación de un contaminante. Desde su descubrimiento en los años 70, se han hecho investigaciones a una gran variedad de materiales semiconductores como el dióxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO).

El ZnO es un semiconductor con una banda prohibida de 3.37 eV, es resistente a la fotocorrosión, tiene buena estabilidad en medios acuosos, no es tóxico y es usado en el tratamiento de agua (Ievtushenko et al., 2018). También el ZnO es más atractivo debido a que tiene mayor sensibilidad, absorción, menor costo que el TiO_2 y bajo las mismas condiciones el ZnO degrada 127% más que el TiO_2 (Bharathi et al., 2019a), (Zyoud et al., 2020).

El ZnO tiene dos limitantes, su fotoactividad en la región ultravioleta (UV) y su rápida velocidad de recombinación (Samad et al., 2016), para mejorar esas limitantes se han realizado investigaciones, como el dopado con metales nobles (Chabane et al., 2016), no metales (Dib et al., 2016) y acoplamiento con otros semiconductores con diferentes banda prohibida (Wetchakun et al., 2019). Esta última, es una alternativa que ha mostrado mejor resultado, porque aumenta el tiempo de recombinación del par electrón-hueco (Harish et al., 2017).

Existen múltiples trabajos donde se acoplan el ZnO con otros semiconductores, tales como: CuO/TiO_2 (Zeng et al., 2017), ZnO/TiO_2 (Wetchakun et al., 2019), ZnO/SnO_2 (Sudhaparimala & Vaishnavi, 2016), ZnO/MgO (Sangeeta et al., 2017), TiO_2/WO_3 (H. Khan et al., 2018) y ZnO/CuO (Mardikar et al., 2018). El óxido de cobre (CuO) destaca por su absorción en la región visible de la luz (Xu et al., 2019a), también el CuO no es tóxico, es económico, abundante, amigable con la naturaleza y tiene una banda prohibida de 1.2 eV. En la Tabla 1 se muestran algunos trabajos de fotocatalisis de ZnO/CuO y su efectividad.

Tabla 1

Degradación de contaminantes en presencia de ZnO/CuO

Método de síntesis	Condiciones de Operación tratamiento térmico	Material	Fotocatálisis	Tiempo y porcentaje de degradación	Autor
Sol-gel	60°C por 10h y 600 °C rampa de 5°C/min	CuO/ZnO 1:10	0.1 g de ZnO/CuO en 50mL, a 5ppm. LED 30W (430-470nm).	Degradación de 91 % de azul de metileno y 73% de fenol en 420 min, en presencia de la muestra CuO/ZnO 1:10	(Vo et al., 2023)
Coprecipitación	80°C por 8H y 450°C por 1h.	Nano varillas de ZnO/CuO	0.01 g de ZnO/CuO en 50mL. Lámpara de Xenon 400W	CuO a 10% con respecto a ZnO, degradación de 98.9% en 15 min	(Mubeen et al., 2023)
Hidrotermal,	120°C por 24h y 60°C a 12 h.	Nano hojas ZnO/CuO	20mg de CuO en 20mL de 10ppm. Lámpara de mercurio 15W UV (253nm) y Luz de Sol	Degradación de 99% para azul de metileno con Uv en 35 min y 90% para Rodamina B, con luz de sol en 70 min.	(Dikra et al., 2024)
Sol-gel,	100°C por 1 h y 500°C por 2h.	(TiO ₂) _{0.95} -(ZnO) _{0.05} dopado con 2 mol% Ag	Muestra de 1cm ² dentro de una celda de 2mL de azul de metileno a 10 ppm, con una lámpara UV de 15W (254nm)	Degradación el azul de metileno cerca de 80% en 2 h	(Pérez-González et al., 2019b)
Combustión en solución	400°C a 10 min y 400°C por 3h.	ZnO/CuO /Eu	100mL a 10ppm y una relación de material de 1mg/mL. Lámpara UV	Degradación de 99% para azul de metileno y 93% de rodamina b con luz UV y degradación 45% y 37% de azul de metileno y rodamina b respectivamente con luz visible, en 100 min.	(Shubha et al., 2023)
Sol-gel	70°C por 2 h y 500°C por 2 h.	AC-ZnO/ZC-Ag ₂ O/AZ-CuO	25mL a 4ppm de azul de metileno, la película irradiada la luz UV	Degradación de 89 % de azul de metileno por 5h	(Dikra et al., 2024)

Método de síntesis	Condiciones de Operación tratamiento térmico	Material	fotocatálisis	Tiempo y porcentaje de degradación	Autor
Sol-gel por ruta verde	Filtrado de biomasa, 80°C por 48h.	ZnO ₈₀ /CuO ₂₀	10mL a 10ppm de azul de metileno con 40mg de catalizador, con lámpara de 500W de tungsteno	Degradación de 98 de azul de metileno en 85 min	(Fouda et al., 2020)
Hidro-termal por microondas		Heterounión CuO/ZnO	100ml a 10ppm de naranja de metileno y 0.05 g del material, con una lámpara mercurio	Degradación de 90% del en 40min	(Ramakrishnegowda et al., 2023)
Estado sólido		(ZnO/CuO)/rGO	100mL a 5ppm de rodamina b. Lámpara de 150 W (400nm).	Degradación de rodamina b y 4 cloro fenol en 99% y 93% respectivamente en 20min.	(Kumaresan et al., 2020)

Los materiales semiconductores mejoran su actividad fotocatalítica al estimular más sitios activos, eso se obtiene con el uso de reactores fotocatalíticos.

Los reactores fotocatalíticos son dispositivos que captan la luz del sol, luego lo concentra e irradiar toda la superficie del material semiconductor, de esta forma aumenta la velocidad de mineralización de los contaminantes. Existe una gran variedad de ellos como: reactor de cama plana (FPR) (Di Capua et al., 2017), reactores de membrana (Xiang et al., 2023), reactores de fluyente en cama (Tatarchuk et al., 2022), colectores parabólicos compuestos (CPC) (Waghmare & Gulhane, 2016a).

El CPC sobresale porque capta los haces de sol dentro de la concavidad y los refleja en un punto, (Ren et al., 2016), existen una gran cantidad de trabajos, que buscan incrementar la relación de contracción, rendimiento térmico y análisis ópticos, sin embargo, pocos reactores tienen una instrumentación electrónica que le permita obtener datos para mejorar la degradación del contaminante y mucho menos que sea autónomo (Martínez et al., 2014).

1.3 Justificación

En este trabajo aborda dos vertientes, el material semiconductor y el reactor CPC fotocatalítico, los dos para mejorar la degradación de los contaminantes en el agua. Con respecto a la primera vertiente, es obtener una heterounión entre ZnO y CuO, es decir una interfaz donde se realiza la separación de cargas para aumentar el tiempo de las reacciones redox y aprovechar la luz visible del sol y en ese sentido entra la segunda vertiente de este trabajo, el diseño y construcción del reactor fotocatalítico CPC automatizados que permite mejorar la actividad fotocatalítica del ZnO/CuO usando la luz visible del sol.

El CPC tendrá un control electrónico para el seguimiento solar, con el objetivo que el colector capte los haces de luz de forma perpendicular durante la trayectoria del sol e irradie toda la superficie del material ZnO/CuO, de esa forma se excitarán más sitios activos para la separación por electrón hueco. Otro punto es la instrumentación electrónica, que proporcionará información de la degradación del contaminante in situ, los datos obtenidos permitirán ajustar el CPC para aumentar la velocidad de degradación del contaminante orgánico. Las dos vertientes trabajaran en conjunto para mejorar la calidad del agua.

1.4 Objetivos del Proyecto

Objetivo general:

Construir y controlar un reactor CPC híbrido con medición in situ de la actividad fotocatalítica, usando el ZnO/CuO como fotocatalizador para la degradación de contaminante orgánicos.

Objetivos específicos:

1. Obtener los materiales semiconductores ZnO, CuO y ZnO/CuO usando el método de síntesis Sol-Gel, para su uso en la degradación de contaminantes orgánicos.
2. Realizar un estudio detallado de la estructura cristalina, la morfología de la superficie y las propiedades ópticas de los materiales ZnO, CuO y ZnO/CuO empleando técnicas de caracterización estructural, morfológica y óptica, respectivamente, con el objetivo de confirmar y validar sus propiedades específica.
3. Evaluar la fotodegradación del azul de metileno (AM) con el ZnO/CuO por medio espectroscopía UV-Vis, para analizar y verificar el comportamiento de la degradación del AM.

4. Diseñar y construir un reactor CPC híbrido que considere el suministro de energía solar y de una fuente convencional, en donde sea posible evaluar in situ la actividad fotocatalítica del ZnO/CuO para obtener un CPC eficiente energéticamente para la degradación de contaminantes.

5. Instrumentar y controlar el reactor CPC considerando la medición de la radiación solar, las variables del comportamiento del fluido y un control de lazo cerrado para el monitoreo, registro y control del sistema experimental.

6. Evaluar la factibilidad de la implementación del reactor CPC híbrido en la degradación de contaminantes mediante un análisis comparativo de la actividad fotocatalítica del ZnO/CuO respecto a lo reportado por otros autores.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Contaminación en el agua

El agua es el medio que mantiene la vida en el planeta, cada año su calidad decrece por contaminantes que provienen de los sectores industrial, agrícola y doméstico, apenas de 20% de estos sectores tratan el agua que usaron, antes de regresado a los cuerpos acuáticos. En la Tabla 2 G. N. Hlongwane y colaboradores, clasificaron los contaminantes que se encuentran en el agua y sus efectos en la salud, los contaminantes con más presencia en el agua son la categoría compuestos orgánico (Chakraborty et al., 2023; Hlongwane et al., 2019; Oseghe et al., 2023).

En los compuestos orgánicos, los que predominan son los colorantes, diariamente se vierten 1.750 millones de litros de colorantes a los cuerpos acuáticos, aparte de las afecciones indicadas en la Tabla 2, también tienen efectos en la reducción de la fotosíntesis de los organismos que se encuentran en el agua, debido a que la luz es absorbido y/o dispersado, impidiendo el traspaso de la luz, otro problema que presenta se la anoxia en el agua debido al consumo del oxígeno durante la degradación del colorante (Sapawe et al., 2013; Srinivasan, 2023).

Tabla 2*Principales contaminantes en el agua (Hlongwane et al., 2019)*

Categoría	Subcategoría	Contaminante representativo	Mayores fuentes	Toxicidad	Referencia
Compuestos inorgánicos	Metales pesados	Cloruro, plomo, cobre, cadmio, acero, níquel y zinc	Minería, refinería química, petróleo, textil, acero, agrícola industrial	Trastorno cardiovascular, cáncer, diabetes, enfisema, hipertensión, mellitus, deficiencia renal, deformación ósea	Custodio M. et al (2021). Chatanga et al. (2019).
	Compuestos poliatómico	Arsénico, cromato, nitrato y sulfato			
Compuestos orgánicos	Colorante Herbicida, farmacéutica.	Amarillo reactivo, azul reactivo, azul de metileno, safranina-o, g naranja, verde de malaquita y rodamina.	Textil, punturas, curtido, cosméticos, farmacéutica e industria agrícola	Mutación, genotoxicidad y cáncer	Wu et al. (2021). Wu et al. (2018). Custodio M. et al. (2021). Chatanga et al.(2019). Saleem et al., (2019); Yahans A et al. (2021).
		Atrazina, 2-4 dicloro fenol, ibuprofeno.			
Microorganismo	Bacteria Virus	Escherichia coli, estafilococo poliovirus-1	Fecal y contaminación del suelo	Enfermedades transmitidas por el agua como: diarrea, colitis hemorrágica, síndrome urémico hemolítica	Saleem et al. (2019). Yahans A. et al. (2021).

Se han desarrollado métodos y técnicas para reducir estos contaminantes y mejorar la calidad del agua, como por ejemplo: fenton y ozono, estos requieren el uso de catalizadores, producen radicales hidroxilos, altamente oxidativos, pero ambos se limitan en su capacidad de reutilización y baja eficacia en el aprovechamiento del H₂O₂ (Mathur et al., 2021; Okpara et al., 2023).

Otro método es la adsorción, es la adhesión de los contaminantes en un material, como es el carbón activado y tiene la ventaja de su reutilización, sin embargo su principal desventaja se presenta cuando hay altas concentraciones de contaminantes (Nti et al., 2023), también está el método de precipitación química, en este caso solidifica al contaminante (Hualpa-Cutipa et al., 2022). Estos últimos métodos no descomponen las cadenas de las moléculas de los contaminantes es decir no los mineraliza, como alternativa surgen los procesos avanzados de oxidación.

2.2 Proceso avanzado de oxidación (PAO)

Los métodos fenton y ozono pertenecen a los PAO, debido a su capacidad de generar especies reactivas, como el radical hidroxilo el cual tiene un alto potencial de reducción para oxidar a otras especies. Los radicales hidroxilos están solo por debajo del flúor, a como se muestra en la Tabla 3. Estas especies son resultados de las reacciones de oxidación entre un catalizador y una fuente de energía aplicada, luego entran en contacto con el contaminante y lo mineralizar hasta llevarlos a compuestos inorgánicos como CO_2 y H_2O (Kumari & Kumar, 2023).

Tabla 3

Potencial de reducción de especies reactivas de oxígeno

Especies reactivas	Potencial de reducción V
Flúor	3.03
Radical hidroxilo	2.8
Oxígeno Singlete	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de hidrógeno	1.78
Radical Hidroperóxido	1.7

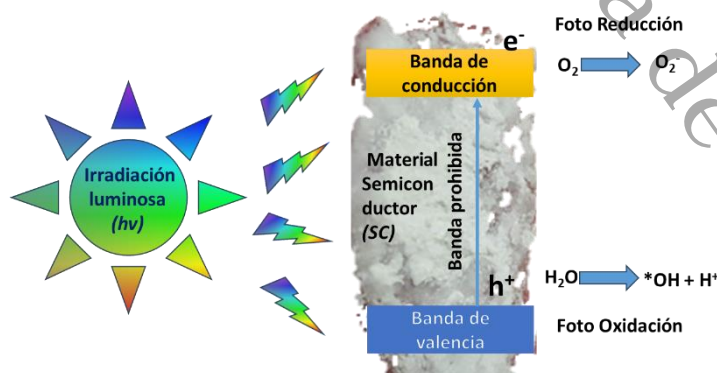
2.2.1 Fotocatálisis

La fotocatálisis fue descubierta en 1972 por Fujishima y Honda (Tariq et al., 2023), desde entonces el proceso ha mejorado, tiene la capacidad de ser usado en el tratamiento de agua de los sectores industriales, agrícola y farmacéutico, actualmente tiene varias ventajas que lo hacen atractivo para el tratamiento de agua, como por ejemplo: no selectivo, elimina casi todos los contaminantes, tiene una alta estabilidad y eficacia en su proceso, también es rápido y se optimiza el consumo energético de su ejecución al usar la luz del sol (M. M. Khan, 2023).

La fotocatálisis consiste en el uso de un material semiconductor, el cual es irradiado por una fuente luminosa en su superficie, la energía del fotón es absorbida por el electrón (e^-) que se encuentra de la banda de valencia y se desplaza a la banda de conducción, dejando un espacio, que es considerando un hueco (h^+) en la banda de valencia. El electrón reduce un aceptor y el hueco oxida un donador, a estas reacciones se denominan reacciones de redox, en la Figura 1 se muestra el proceso de la fotocatálisis.

Figura 1.

Principio básico de la fotocatálisis



Nota: Adaptado de (Shubha et al., 2023).

En la redox existen 4 posibilidades y depende de su nivel (Diaz-Angulo et al., 2020).

- 1.- Reducción: cuando el nivel redox es bajo en la banda de conducción.
- 2.- Oxidación: cuando el nivel redox es alto en la banda de valencia.
- 3.- Reducción y oxidación: cuando en nivel redox es bajo en la banda de conducción y alto en la banda de valencia.
- 4.- No hay reducción y tampoco oxidación: cuando el nivel redox es alto en la banda de conducción y bajo en la banda de valencia.

La fotocatalisis se puede dividir en dos con base al estado de sus elementos.

Fotocatalisis Homogénea: Cuando el semiconductor y el reactante están en la misma fase, gas, líquido o sólido.

Fotocatalisis Heterogénea: Cuando el semiconductor y el reactante están en diferente fase (R. Ameta et al., 2018).

2.2.2 Óxido de Zinc (ZnO)

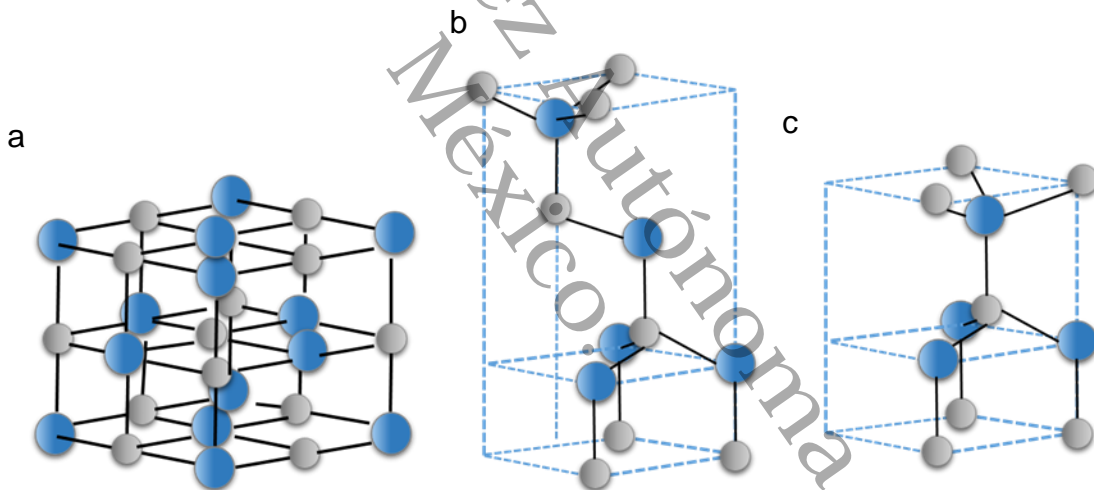
En fotocatalisis para el tratamiento de agua se usa principalmente el semiconductor TiO_2 , sin embargo, también se usa el semiconductor ZnO , ambos tienen características similares, pero el ZnO presenta mayores sitios activos durante el proceso de fotocatalisis. El ZnO es un semiconductor tipo n, su banda prohibida es de 3.37 eV, tiene múltiples aplicaciones como, celdas solares (Udom et al., 2013), sensor de gas (D. Li et al., 2018), material piezoeléctrico (Zhang et al., 2011), fotodetectores (Chen et al., 2009), en fotocatalisis (Chang, 2016). También tiene cualidades sobresalientes tales como, no costoso, amigable con el ambiente, no tóxico, transparente, abundante en la naturaleza y es estable mecánicamente (Pearton et al., 2005).

En la Figura 2, se visualizan las tres estructuras cristalinas posibles del ZnO : sal de roca, blenda y wurtzita, La wurtzita es la más estable termodinámicamente bajo condiciones

normales, la sal de roca necesita altas presiones para fabricarlo (Morkoç & Özgür, 2009) y la blenda solo se sintetiza en sustratos cúbicos (Alarfaj & Subahi, 2015). La fase cristalina hexagonal wurtzita tiene los siguientes parámetros de red: $a = 3.2495 \text{ \AA}$ y $c = 5.2069 \text{ \AA}$ con una relación de $c/a = (8/3)^{1/2} = 1.633$ y pertenece el grupo espacial C^4_{6v} , tiene una configuración tetraédrica es decir por cada átomo de zinc está rodeado por 4 átomos de oxígeno (Udom et al., 2013).

Figura 2.

Estructura cristalina de óxido de zinc: a) cubica sal de roca, b) cubica zinc blenda, c) hexagonal wurtzita



Nota: Adaptación de (Morkoç & Özgür, 2009).

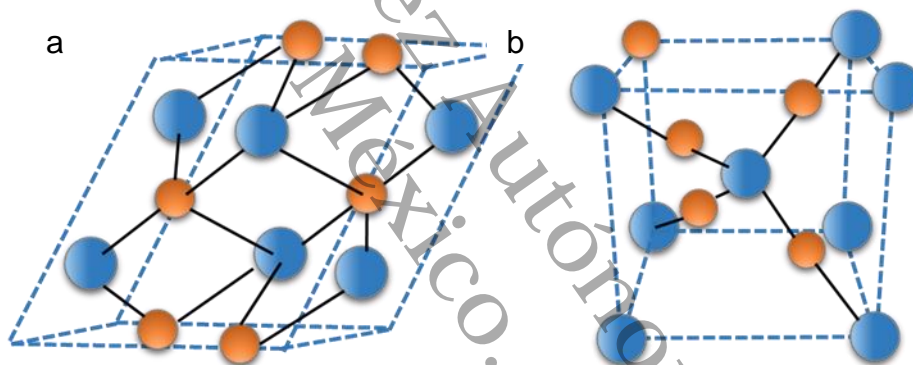
La estructura cristalina más estable es la wurtzita, por lo tanto, es la comúnmente usada en fotocatalisis, pero tiene la misma limitación que el TiO_2 , ambos necesitan ser irradiado de luz UV para llevar a cabo el proceso de fotocatalisis, para mejorar esa limitante se usan otros materiales para mejorar las propiedades del ZnO, el semiconductor de CuO es atractivo para solucionar las limitantes del ZnO.

2.2.3 Óxido de Cobre (CuO)

El CuO es un semiconductor abundante en la naturaleza, económico, con alto coeficiente de absorción, no tóxico y con buenas propiedades ópticas y eléctricas (Goodarzi & Eshghi, 2018). En los últimos años se ha aplicado como: biosensor (R. Li et al., 2012), batería de litio (Yin et al., 2012), supercapacitor (Jarlborg, 2007) y celda solar (haq et al., 2017). En la Figura 3 se muestran las dos fases cristalinas que tiene el CuO: monoclinica tenorita (CuO) y cúbica cuprosa (Cu₂O).

Figura 3.

Estructuras cristalinas del óxido de cobre a) CuO y b) Cu₂O



Nota: Adaptación de (Oku et al., 2011).

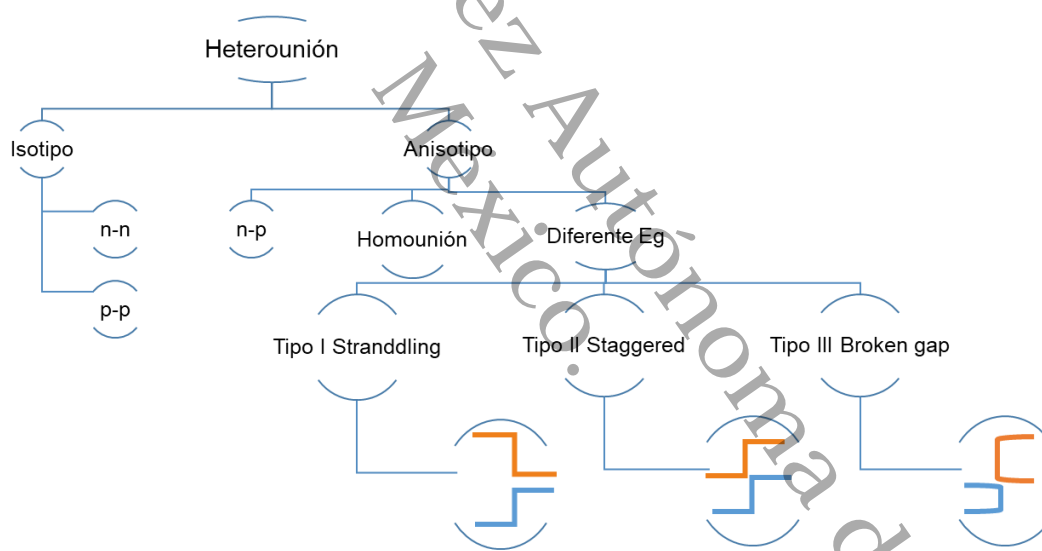
El CuO es un semiconductor tipo p, con una banda prohibida indirecta de 1.2 – 1.5 eV, su estructura cristalina es monoclinica con los siguientes parámetros de red $a = 4.6837 \text{ \AA}$, $b = 3.4226 \text{ \AA}$, $c = 5.1288 \text{ \AA}$ y el Cu₂O también es un semiconductor tipo p, con una banda prohibida indirecta de 2.1 eV con una estructura cristalina cúbica $a = 4.27 \text{ \AA}$ (Balamurugan & Mehta, 2001). El CuO en comparación con el ZnO tiene diferentes características como: banda prohibida, tipos de cargas (n y p), niveles en la escala del vacío y estructuras cristalinas, estos elementos en conjunto factibles para una heterounión entre ellos, permitiendo mejorar las propiedades del ZnO.

2.2.4 Heterounión.

La heterounión es una interfaz entre dos semiconductores con diferentes estructuras cristalinas, bandas prohibidas y propiedades fisicoquímicas. La función principal es separar la generación del par electrón-hueco entre capas y así prolongar la vida útil de los portadores de carga (Fang et al., 2019). En la Figura 4 se muestra la clasificación con base a su tipo de dopaje. Se dividen en isotipo: cuando ambos materiales tienen el mismo dopaje (n-n o p-p) o en anisotipo cuando los materiales son de diferente dopaje (n-p).

Figura 4.

Clasificación de las heterouniones y su forma de bandas prohibida



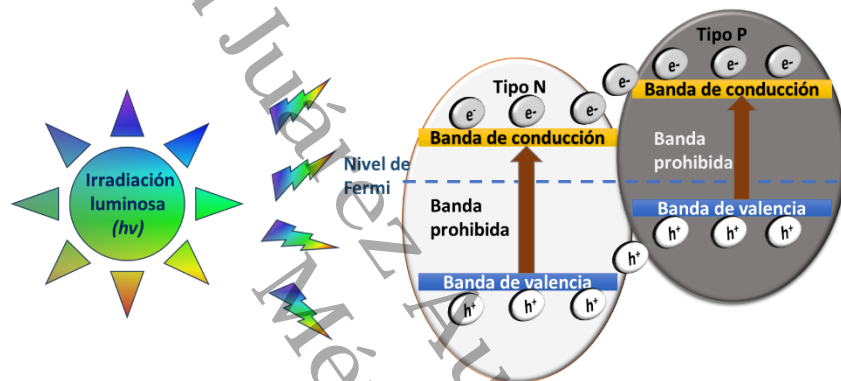
Nota: Adaptación de (Kroemer, 2002).

Las heterouniones anisotipo presentan corriente rectificadora y no lineal, el voltaje depende de la capacitancia, al igual que una homounión (la unión de un mismo material con un diferente dopaje n-p). Las formas de las bandas prohibidas de los anisotipo con respecto a la escala del vacío, se dividen en tipo I Straddling o Symmetric, tipo II Staggered y tipo III Broken gap (Kroemer, 2002) (Phys & Amin, 2019).

La forma y la posición en la escala en el vacío lo definen las funciones de trabajo y las afinidades electrónicas al formar la unión, las bandas prohibidas se alinean como los niveles de Fermi y entran en equilibrio, aumentando las propiedades de los materiales, a como se muestra en la Figura 5 (Skromme & Sujan, 2018).

Figura 5.

Dos semiconductores con diferente banda prohibida, formando un equilibrio al nivel de Fermi



Nota: Adaptación de (Mubeen et al., 2023).

2.2.5 Heterounión de ZnO/CuO

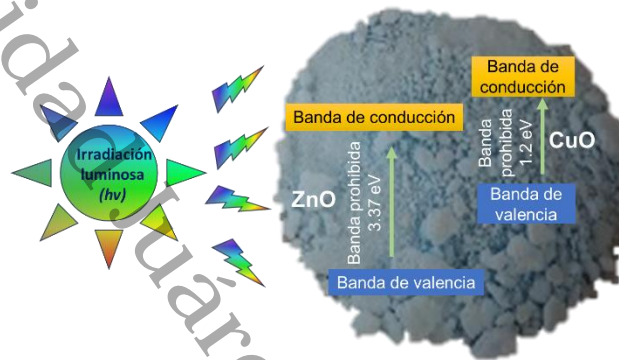
La heteroestructura de ZnO y CuO, es una estructura cristalina formada por capas de ZnO y CuO, entre estas capas hay una interfaz que está construida por enlace covalente y están ordenadas como un solo cristal. En la Figura 6 muestra una representación de la interfaz de la heterounión, el ZnO y el CuO tienen bandas prohibidas de 3.33 eV y 1.2 eV respectivamente.

La banda de conducción y valencia de ambos materiales entran en un relativo equilibrio, la posición de las bandas prohibidas está con respecto en la escala en el vacío, la banda de valencia del ZnO es la más baja y la banda de conducción del CuO es la más alta, por lo tanto, se encuentra más cerca la banda de valencia del CuO a la banda de conducción

del ZnO, esta forma de heterounión es la clasificación tipo II Staggered o también conocida como tipo escalón.

Figura 6.

Heterounión tipo escalón formada por ZnO/CuO



Nota: Adaptación de (Mubeen et al., 2023).

Esta estructura formada por ZnO y CuO es producto de la combinación del desplazamiento de la banda prohibida del material anfitrión (por su composición), es decir la interfaz de la energía de la banda (determinada por el nivel de Fermi) se ajusta solo si las bandas se doblan, la banda prohibida final es creada por espacio de cargas, productor de la transferencia de electrones de ZnO a CuO (Rogalski & Palmer, 2014).

Los bordes de las bandas prohibidas funcionan como barreras de los electrones, entonces los electrones y huecos son empujados por la barrera desde la banda prohibida de ZnO a CuO, este flujo permite la separación de carga, proporcionando más tiempo para la recombinación y el aprovechando el espectro de en la región visible (Behera et al., 2022).

2.2.5.1 Heterounión de ZnO/CuO en fotocatalisis

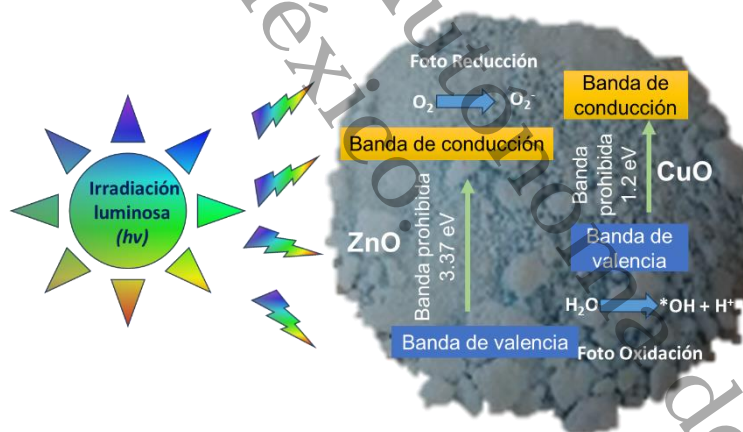
El proceso de fotocatalisis de la heterounión de ZnO/CuO para la degradación de contaminantes, se muestra en la Figura 7, donde la luz ($h\nu$) irradia la superficie del

semiconductor (SC), por lo tanto, el electrón (e^-) absorbe la energía del fotón y se transfiere a la banda de conducción del ZnO y a la banda de conducción del CuO, el electrón reduce la molécula del oxígeno (O_2) produciendo superóxidos (O_2^-).

Por otra parte, el hueco (h^+) producto por el desplazamiento del electrón de la banda de valencia del ZnO y de la banda de valencia del CuO, este oxida la molécula H_2O dando paso al radical hidroxilo, luego ambos productos, el superóxido y el radical hidroxilo reaccionan con la molécula de AM llevándolo a su mineralización (H_2O y CO_2) (Fouda et al., 2020)(Almehizia et al., 2022)(Diaz-Angulo et al., 2020).

Figura 7.

Proceso de fotocatalisis de la heterounión de ZnO/CuO



Nota: Adaptación de (Mubeen et al., 2023).

Las propiedades del material semiconductor proporcionan información de su posible comportamiento en la degradación del contaminante orgánicos, estas características se miden usando técnicas de caracterización. A continuación, se describen algunas técnicas de caracterización que proporcionan información del material semiconductor.

2.3 Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización se rigen por principios físicos, estos describen la interacción de la muestra o material con un tipo de energía en específico, el fenómeno producido es registrado y analizado por un software propio de la marca de cada equipo y el resultado analizado se muestra en: termogramas, espectros, micrográficas e isoterma, dependiendo de cada técnica de caracterización. A continuación, se describen las técnicas usadas en este trabajo.

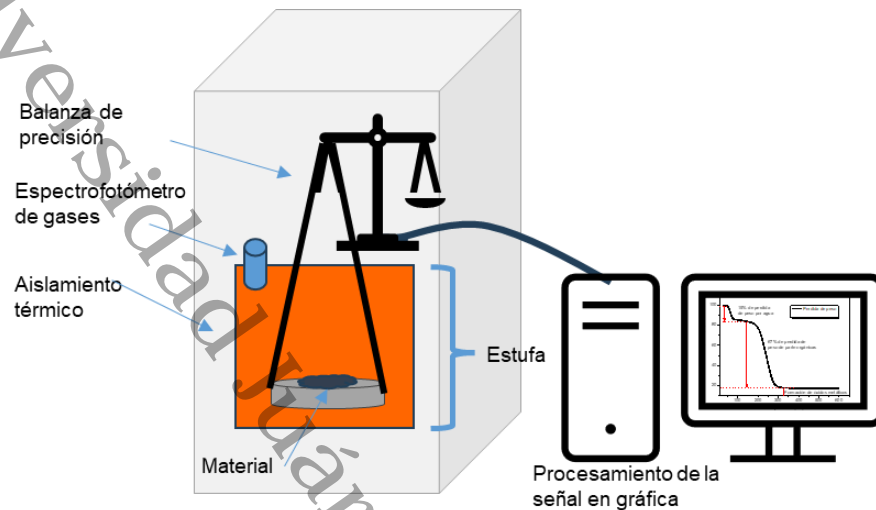
2.3.1 Técnica de Termogravimetría (TGA)

La técnica de termogravimetría (TGA, por sus siglas en inglés) mide las pérdidas de peso del material mientras se calienta, estos cambios son productos de las pérdidas de humedad, descomposición, oxidación, (Polini & Yang, 2017) etc. En la Figura 8 se muestra de forma conceptual las partes del equipo que usa la técnica de TGA, el equipo tiene una balanza, esta registra las pérdidas de peso del material.

El material se coloca en el crisol, el cual está aislado térmicamente de la balanza. La estufa puede llegar a temperaturas mayores a 1500 °C, el crisol tiene la función de bajar la temperatura, para un control más preciso de la temperatura, otro aditamento incorporado es un espectrómetro infrarrojo para la lectura de los gases emanados del material durante su calentamiento. Los datos son registrados y normalmente el resultado se representa en una gráfica de peso en porcentaje vs temperatura. (Polini & Yang, 2017).

Figura 8.

Concepto de los componentes principales de TGA



Nota: Adaptación de (Polini & Yang, 2017).

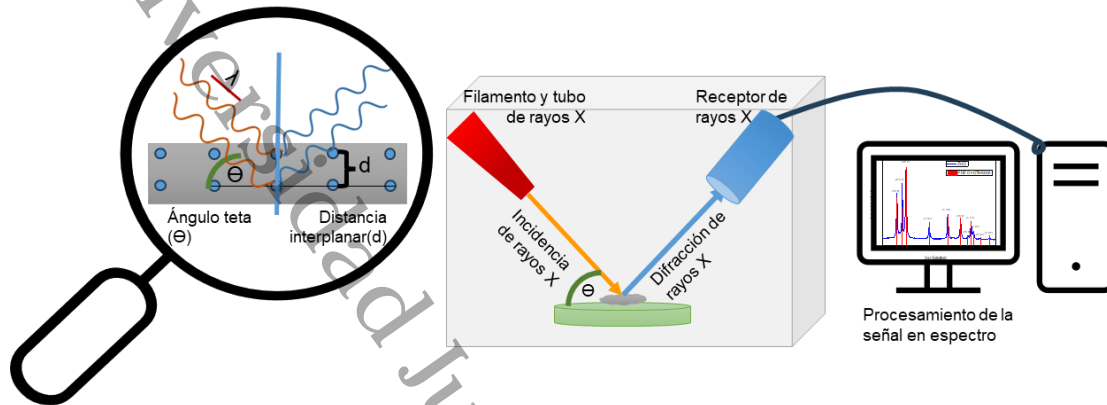
2.3.2 Técnica de Difracción de Rayos X (XRD)

La difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) es una técnica que brinda información de la fase cristalina del material, tamaño de cristal, orientación, imperfecciones y estrés del cristal, la forma de los resultados es un difractograma.

La técnica consiste en la interacción de rayos X y el material, el equipo usa un filamento, que comúnmente esta hecho de cobre, cobalto, molibdeno, cromo o tungsteno, y producen los rayos X generados por electrones, luego estos son acelerados con un alto voltaje (KV) a baja corriente (mA) y se impactan sobre un material, produciendo rayos difractados, estos rayos son detectados, cuantificados y luego analizados, en la Figura 9 se muestra de forma conceptual los elementos básicos de la XRD (Gonon, 2021).

Figura 9.

Concepto de los componentes principales de XRD



Nota: Adaptación de (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024).

La ley que rige el principio de XRD es la ley de Bragg esta permite entender el fenómeno de la difracción, la longitud de los rayos X λ , ingresan paralelamente a los planos reticulares del material que están separados a una distancia d , y aparece un ángulo de incidencia θ , por lo tanto, se interpretaría que los planos de la red funcionan como espejos ante la incidencia de los rayos X. En la Ecuación 1 se muestra la ley de Bragg.

$$n\lambda = 2d\text{sen } \theta \quad (1)$$

Cada material tiene difracciones con intensidades y ángulos particulares, con base en ello se compara con patrones e identifica la fase cristalina del material y las demás características mencionadas al inicio.

2.3.3 Técnica de Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS)

La técnica de Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS, por sus siglas en inglés), consiste en la incidencia de un rango de rayos X sobre la superficie del material. Estos

rayos X excitan a los electrones que están en la periferia del núcleo del átomo, si los electrones escapan del material, se emite una energía cinética (E_k), y está representada en la Ecuación 2

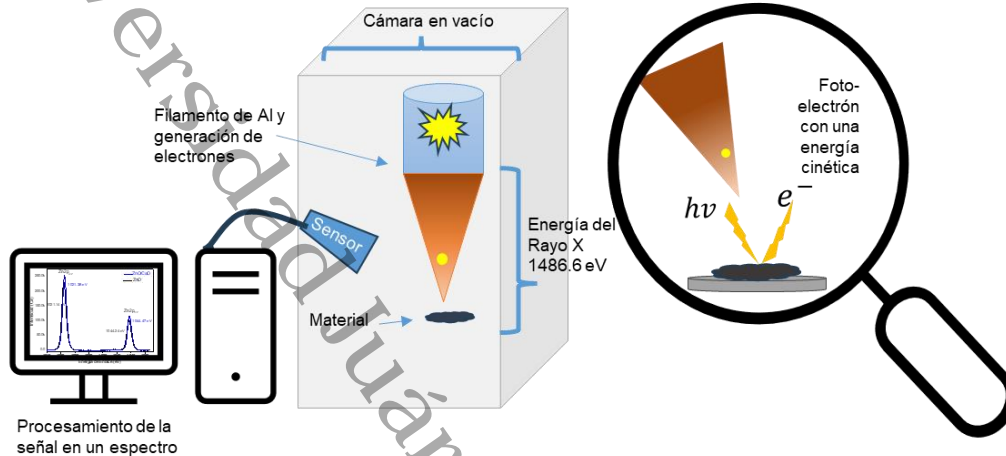
$$E_k = hv - E_b - \varphi \quad (2)$$

Donde hv es la energía del fotón de los rayos X, E_b es la energía de enlace del electrón y φ es la energía necesaria para que el electrón salga a la superficie, también conocida como función de trabajo (Castner & Ratner, 2018). Los átomos y los orbitales tienen diferente energía de enlace, de la misma forma los fotoelectrones emanados tienen diferente energía cinética, ese es el principio físico de la técnica.

El equipo de XPS recolecta y analiza la energía cinética de los electrones, el resultado es un espectro de la intensidad del fotoelectrón vs la energía cinética, esta información brinda la composición elemental, energía de enlace, estados de oxidación, del material (Cleaning, 2007). En la Figura 10 se muestra las partes principales de la técnica de XPS.

Figura 10.

Representación conceptual de la técnica de XPS



Nota: Adaptación de (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024).

2.3.4 Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Esta técnica muestra la morfología del material, la magnificación de análisis del equipo comúnmente tiene un rango de $1\ \mu\text{m}$ a $1\ \text{nm}$, la técnica también tiene la espectroscopía de energía dispersiva (EDS) presenta la composición elemental en la superficie del material (Singh & Singh, 2022).

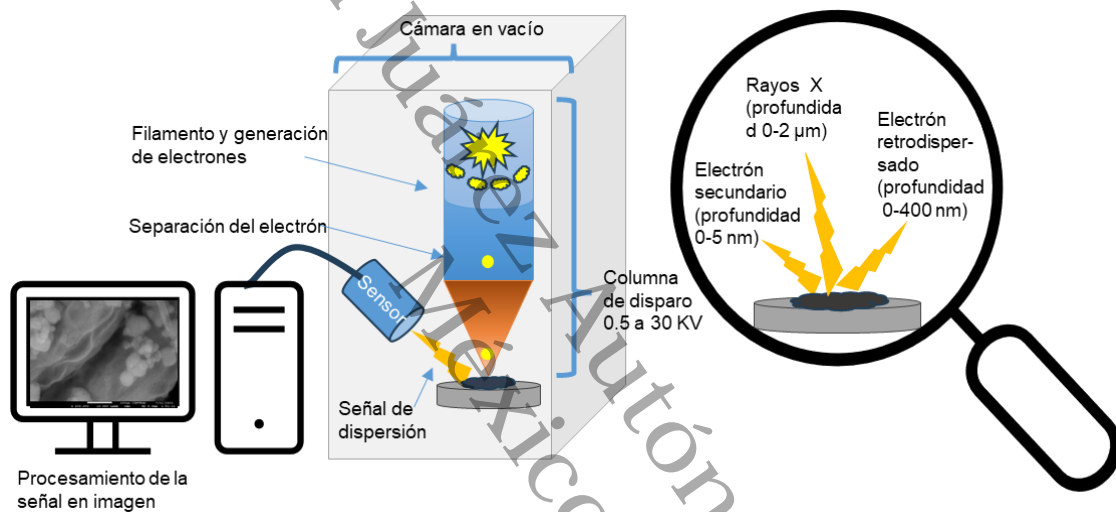
En la Figura 11 se muestra de forma conceptual las partes principales del equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), el SEM consiste en incidir un haz de electrones desde la columna de disparo del equipo hasta la superficie del material, debe haber un vacío en la cámara, debido a que los electrones recorren distancias cortas en el aire.

En la interacción entre los electrones y el material provoca la dispersión de señales provenientes del material, algunas de ellas son electrones Auger, electrones secundarios,

electrones retrodispersados, rayos X, luz, calor, etc. Las señales dispersas llegan a los sensores del equipo y estos los convierte en señales eléctricas, luego son procesadas y analizadas por un software, la información final son imágenes o graficas de las características del material (de Assumpção Pereira-da-Silva & Ferri, 2017).

Figura 11.

Concepto de los componentes principales del SEM



Nota: Adaptación de (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024).

Las imágenes y datos extraídos por el SEM comúnmente son: topografía, contraste y composición elemental. La topología y el contraste del material se forma con base en los electrones secundarios (SEI) y los retrodispersados (BEI) respectivamente. El detector Everhart-Thornley es sensible a estos electrones, que son producto de los átomos del material, cuando una parte de la energía es consumida para extraerlos. Por último, se detecta espectros de rayos X (EDS) emitidos por los átomos del material que absorben la energía de los electrones (Singh & Singh, 2022).

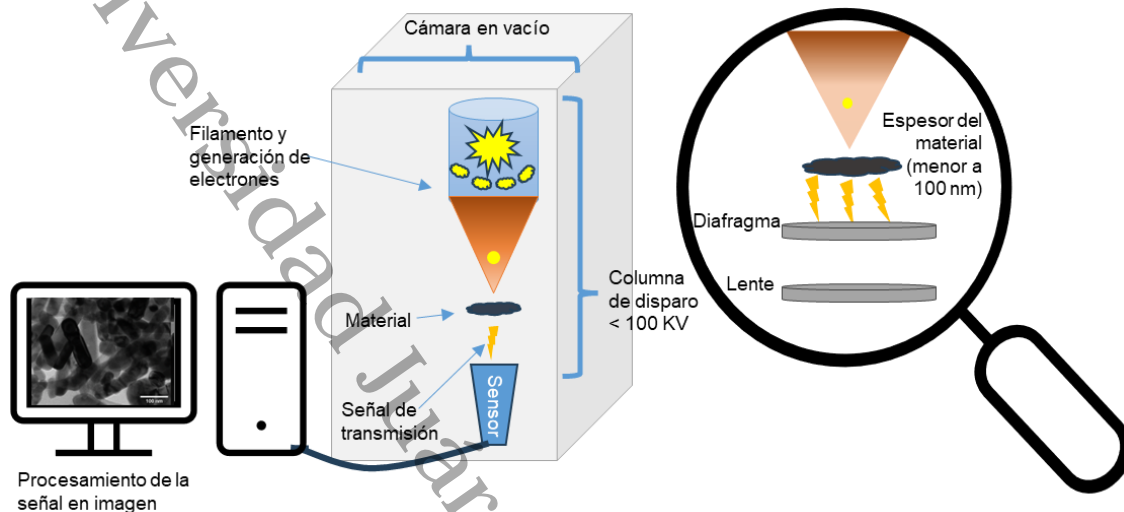
2.3.5. Técnica de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

La microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés), proporciona información de la morfología y estructura del material. El funcionamiento del equipo es similar al del SEM, usa una cámara de vacío, dentro de ella se coloca el material y la columna que genera el electrón, la diferencia es la energía (mayor a 100 KV) usada para inyecta el electrón a la muestra, otra es la interacción del electrón con la muestra mientras la atraviesa a una mayor resolución que el SEM. El electrón al tener mucha energía cruza al material, generando ondas que son detectadas por el equipo, en otras palabras, el SEM toma lecturas de la dispersión y el TEM toma lecturas de la transmisión.

El electrón debe de atravesar la muestra por lo tanto se recomienda que tenga un espesor menor a 100nm, las señales de la transmisión son detectados y analizados por un software, las imágenes obtenidas son afectadas por el espesor y la densidad del material. Las imágenes brindan información sobre la dispersión de las partículas, esto se obtiene por imágenes de campo libre (Song, 2017). En la Figura 12 se muestra de forma conceptual el TEM.

Figura 12.

Conecto de los componentes básicos del TEM



Nota: Adaptación de (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024).

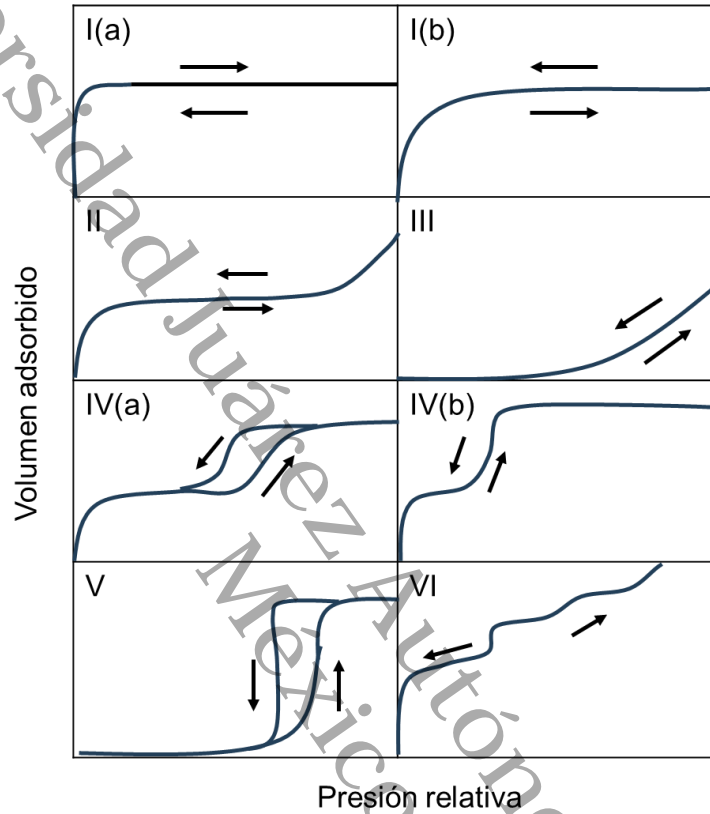
2.3.6 Técnica de Fisorción de Nitrógeno

La técnica de fisorción de nitrógeno (N_2) mide el área específica, porosidad y distribución de tamaño de poro del material, debido a que la técnica se basa en la adsorción física es decir un fenómeno de superficie. Es la interacción del adsorbtivo (gas disponible para adsorber) entra en la superficie del material (el adsorbente) y este gas atrapado en la superficie se denomina adsorbato (Thommes et al., 2015).

La determinación de los parámetros de superficie del material se obtiene por medio de isotermas de adsorción, este es el comportamiento del volumen del gas adsorbido con respecto a la presión relativa del gas a temperatura constante. Estas graficas se clasifican en seis grupos que están influenciados por la porosidad del material según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en ingles) y se presentan en la Figura 13. (Thommes et al., 2015).

Figura 13.

Clasificación de isothermas por la IUPAC (Thommes et al., 2015)

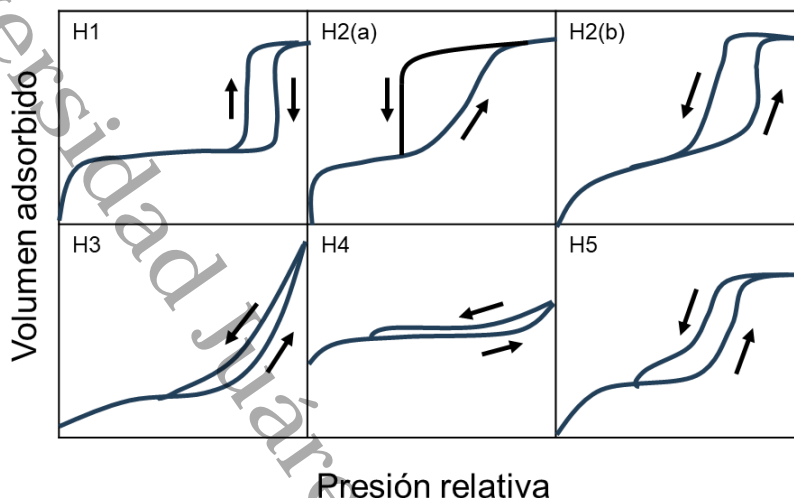


Nota: Tomado de (Thommes et al., 2015).

Después de la adsorción (alcanzado la saturación) se realiza la desorción, en algunos casos se presenta un lazo de histéresis, producto de la evaporación en los mesoporos a una presión más baja que en la condensación capilar. La IUPAC propone seis tipos característicos de lazos de histéresis, estos se aprecian en la Figura 14 (Thommes et al., 2015).

Figura 14.

Clasificación de las histéresis por la IUPAC (Thommes et al., 2015)



Nota: Tomado de (Thommes et al., 2015).

2.3.7 Técnica de Espectroscopía de luz Ultravioleta y Visibles de reflectancia difusa (UV-Vis)

Es una técnica para determinar las propiedades ópticas (absorción, reflectancia y transmitancia) del material, en otras palabras, mide las transiciones electrónicas del estado estable, al estado excitado de la molécula después de absorber ondas electromagnéticas en el rango de 200 a 800nm (Thambiratnam et al., 2020).

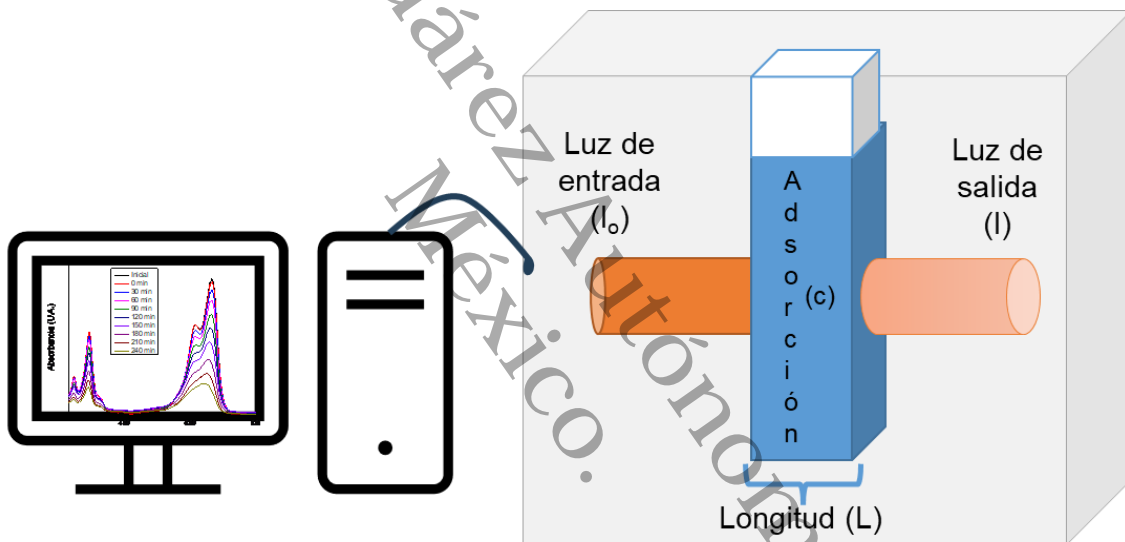
La técnica está regida por la ley de Beer-Lambert Ecuación 3, donde A es la absorbancia, I_0 es la intensidad luminosa entrante de cierta longitud de onda, I es la intensidad transmitida, a lo largos de una longitud L, que atraviesa la muestra, c es la concentración de la absorbancia y ϵ es la absortividad molar o coeficiente de extinción propia de cada material.

$$A = \log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right) = \epsilon cL \quad (3)$$

Los datos de la intensidad transmitida son detectado, analizados y presentados en forma de espectro, los picos en el espectro señalan la energía de enlace del material (Oluwafemi et al., 2021). En la Figura 15 se representa el conceptual de la técnica.

Figura 15.

Concepto de la absorción de una longitud de onda en un material



Nota: Adaptación de (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024).

Estas técnicas de caracterización nos muestran las características del material que influyen en la degradación de los contaminantes, en el capítulo 4 se realizará la discusión de cada una de ellas.

Una mejora física de la capacidad del material durante el proceso de fotocatalisis sería aumentar la irradiación y distribuirlo uniformemente en la superficie del material semiconductor.

Esto incrementa los sitios activos y así acelerar el proceso de mineralización del contaminante orgánico, todo esto se logra usando dispositivos de concentración solar como los reactores fotocatalíticos.

2.4 Reactores fotocatalíticos

Los concentradores solares se dividen en dos tipos, tipo imagen y tipo no imagen, los de tipo imagen necesita arreglos ópticos para generar imágenes de la fuente de luz en su receptor. Los de tipo no imagen concentran los haces de luz en un punto focal sin necesidad de recrear imágenes, alcanzando un mayor rendimiento energético ideal para reactores fotocatalítico (Arancibia-Bulnes et al., 2009).

Los reactores fotocatalítico son usados para aumentar la eficiencia de la fotocatalisis, como los CPC debido a su alto potencial para concentrar la energía solar y luminosa (Tian et al., 2018), (Otálvaro-marín et al., 2017); también su configuración cerrada evita la evaporación de los contaminantes al exterior (Ochoa-Gutiérrez et al., 2018) y no requiere el seguimiento solar (Arancibia-Bulnes et al., 2009).

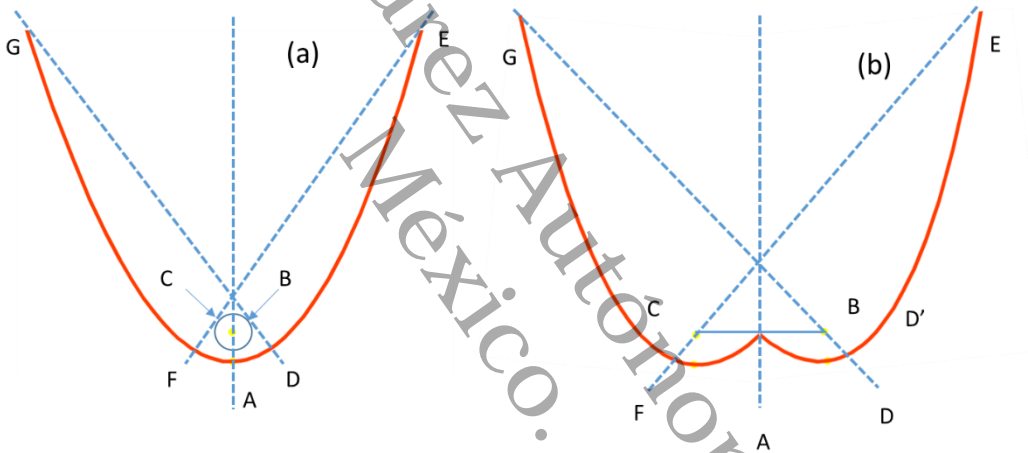
Los investigadores han estudiado el CPC en su diferentes tubos como: rendimiento térmico (Ustaoglu et al., 2016), eficiencia energética (Tang & Wang, 2013), rendimiento óptico con fondos planos (Y. Yu et al., 2014), con doble tubo receptor (Korres & Tzivanidis, 2018), con tubos en vacío (X. Li et al., 2013), con forma asimétrica en sus parábolas (Xuan et al., 2017). Sin embargo, esos estudios se enfocan poco: en el tubo receptor, en su diámetro y la altura de colocación dentro del colector.

2.4.1 Reactor fotocatalítico CPC

El CPC es una parábola con alta reflectancia, los rayos de sol llegan a la superficie del colector, luego son reflejados y concentrados. En la Figura 16 se contemplan trazos producto por las curvaturas generadas, a partir de líneas que pasan tangencialmente al absorbedor desde el colector, por lo tanto hay una relación entre las formas del absorbedor y colector; Winston y Rabl (Tian et al., 2018).

Figura 16.

Colector con absorbedor de forma a) cilíndrica y b) plana



Nota: Tomada de (Tian et al., 2018).

Otro punto importante en el diseño del CPC es la concentración, esta se define como la relación del área de la apertura del colector y el área del absorbedor, esta se muestra en la Ecuación 4.

$$C = \frac{A_{col}}{A_{abs}} \quad (4)$$

El vidrio es usado en el absorbedor, el colector normalmente está construido por láminas con áreas grandes y al estar expuesto por las inclemencias del clima, estos materiales son capaces de llegar a modificar la forma el CPC, por ello, se debe de considerar una región angular de tolerancia del colector con respecto al punto focal y se denomina ángulo de aceptación, este se considera en la Ecuación 4. Entonces la relación de concentración se representa en la Ecuación 5 (Alfragide et al., 1991):

$$C = \frac{1}{\sin \theta} \quad (5)$$

En la Figura 17 se muestra el CPC que está regida por la ecuación de la parábola Ecuación 6 donde la apertura (A) es 4 veces la altura del colector(H), al ingresar el ángulo de aceptación, las ecuaciones quedan de la siguiente forma Ecuacion 7 y 8 (Waghmare & Gulhane, 2016a).

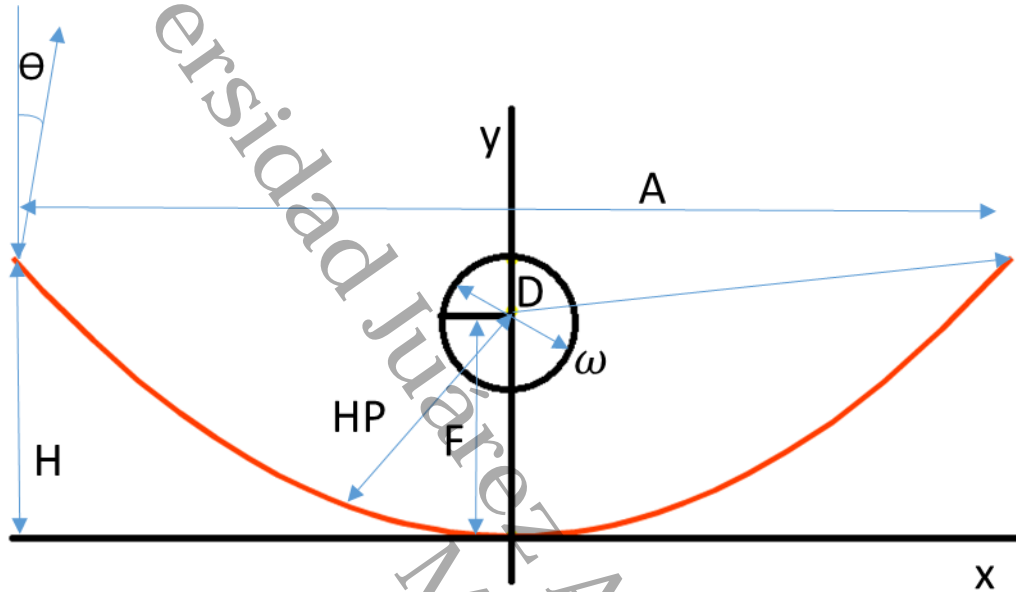
$$4fy = x^2 \quad (6)$$

$$H = HP \cos \theta \quad (7)$$

$$A = HP \cos \theta \quad (8)$$

Figura 17.

Diagrama esquemático del CPC



Nota: Adaptación de (Waghmare & Gulhane, 2016a).

La apertura de la parábola A, la altura de la parábola es H, la distancia focal es F, el ángulo de aceptación es Θ , el diámetro del tubo absorbedor es D, la distancia del focal con respecto a la superficie de la parábola es HP y ω es el ángulo formado por el límite de la parábola y el eje vertical que pasa por el foco (Alfragide et al., 1991). S.A. Waghmare et al, diseñan un CPC usando un análisis óptico por medio del algoritmo de ray tracing, debido a que simula la trayectoria de los rayos del sol con diferentes condiciones como: ángulo de aceptación, altura del CPC y ubicación del foco (Waghmare & Gulhane, 2016a).

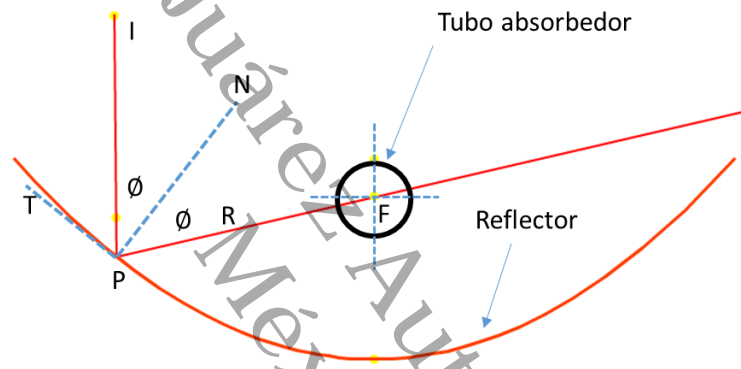
2.4.2 Concentración de la luz en el CPC

En la Figura 18 se muestra la trayectoria del rayo de luz en el CPC. El rayo incidente I, llega en un punto P del colector y se refleja R, hacia el foco F. El rayo llega al punto P,

creando un ángulo ϕ con una normal N , (perpendicular a la tangente de la curva en el punto P) en la curva de la parábola y el rayo reflejado tiene el mismo ángulo de incidencia ϕ (Waghmare & Gulhane, 2016a), esta descripción es el fundamento del algoritmo de Ray – Tracing. Los rayos reflejados dentro de la parábola determinan el diámetro del tubo receptor.

Figura 18.

Trayectoria del rayo de luz dentro del CPC



Nota: Adaptación de (Waghmare & Gulhane, 2016a).

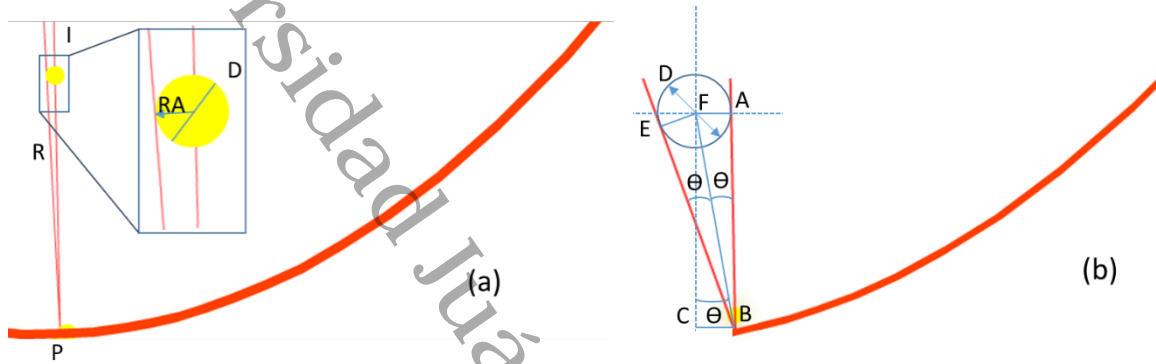
2.4.3 Diámetro del tubo receptor en el CPC

El diámetro mínimo del tubo receptor se determina cuando la trayectoria del rayo de luz cruza en el punto focal más corto de la parábola. En la Figura 19 (a) se presenta el rayo de luz I , que intercepta el foco y su reflexión R , pasa muy cerca del foco, esta es la distancia mínima, por lo tanto, es el diámetro mínimo.

En la Figura 19 (b) El rayo incide I en el punto P , en el borde de la parábola y considerando el ángulo de aceptación, entonces el diámetro mínimo del tubo receptor en el foco se expresa por la Ecuación 9 y se define como el diámetro donde los rayos pasan tangencialmente en el foco.

Figura 19.

(a) Radio y (b) Diámetro mínimo del tubo receptor



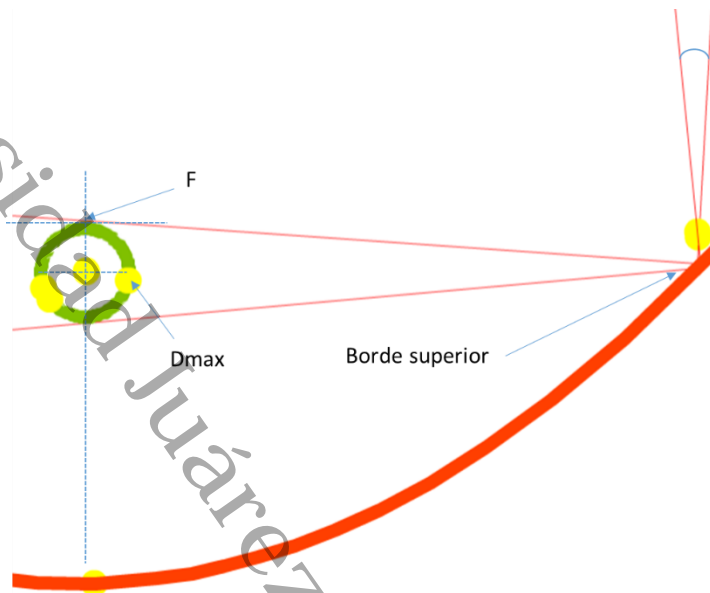
Nota: Adaptación de (Waghmare & Gulhane, 2016a).

$$Dm = 2HP \text{ sen } \theta \tag{9}$$

En la Figura 20, se determina el diámetro máximo del tubo receptor, es producto de la reflexión de los rayos, considerando el ángulo de aceptación en el borde superior de la parábola, el cual es donde se genera la distancia máxima entre la parábola y el foco. Se expresa con la Ecuación 10.

Figura 20.

Diámetro máximo del tubo receptor



Nota: Adaptación de (Waghmare & Gulhane, 2016a).

$$D_{max} = \frac{2D}{\cos 2\theta} \quad (10)$$

Como última parte en el diseño del CPC, es la colocación del tubo receptor donde reciba la mayor cantidad de rayos reflejados.

2.4.4 Ubicación del tubo receptor en el CPC

La ubicación del tubo receptor se define gráficamente, por medio del algoritmo de ray tracing. En la simulación se incide menos del 50% de los rayos sobre la parábola, para mejor visualización del fenómeno. En la Figura 21 se visualiza la reflexión de los rayos sobre el tubo receptor a diferentes posiciones del eje vertical de la parábola.

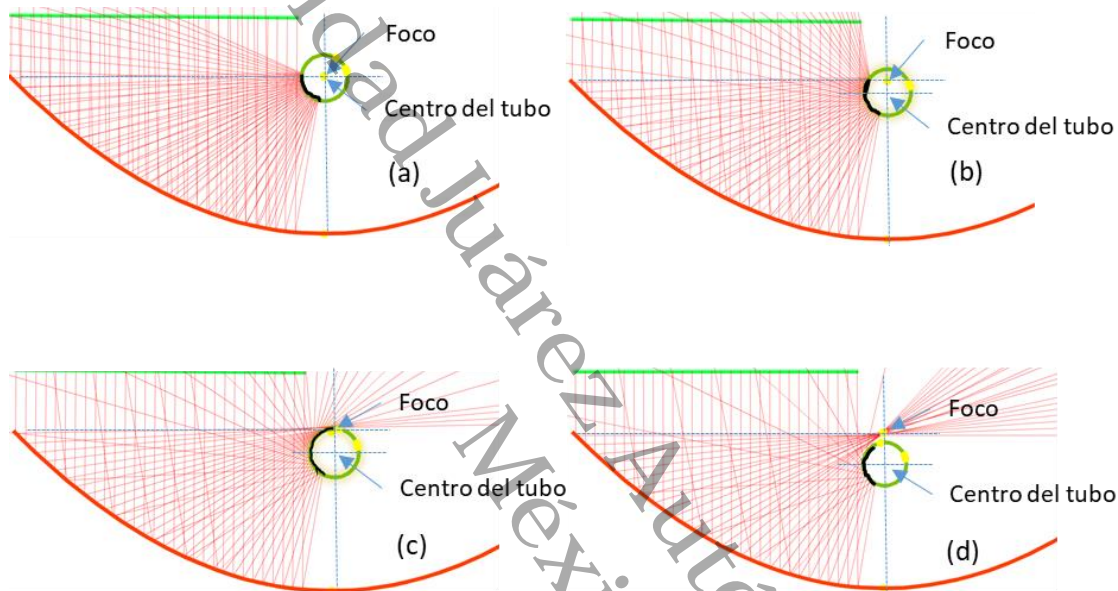
En la Figura 21(a) el centro del tubo receptor está posicionado en el foco de la parábola, los rayos reflejados cubren el perímetro marcado de color negro, el cual es aproximadamente el 50% de la superficie del tubo receptor. En la Figura 21(b), el foco se encuentra a $\frac{3}{4}$ del diámetro del tubo receptor; el perímetro incidente por la reflexión cubre más del 70%.

En la Figura 21(c), el arco superior del tubo receptor se encuentra en el foco de la parábola y rayos reflejados cubren aproximadamente más del 90%. Por último, en la Figura 21(d) el arco superior del tubo receptor se encuentra $\frac{1}{4}$ del diámetro fuera del foco y se contemplan algunas reflexiones no aprovechadas. Por lo tanto, en la Figura 21(c) es la posición donde el tubo receptor aprovecha mejor las reflexiones de los rayos del sol.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Figura 21.

Tubo receptor ubicado con respecto al foco, (a) centrado, (b) desfasado en vertical a $\frac{3}{4}$ de diámetro hacia abajo, (c) Arco superior centrado al foco, (d) $\frac{1}{4}$ de diámetro separado entre el tubo y el foco



Nota: Adaptación de (Waghmare & Gulhane, 2016a).

2.5 Control del CPC

El CPC tiene su máxima captación, cuando los rayos del sol están perpendicular al colector (Waghmare & Gulhane, 2016b), los haces de luz del sol cambian de dirección durante el día por la oblicuidad eclíptica de la trayectoria del sol, por lo tanto, se requiere un mecanismo que siga la trayectoria del sol (Jamroen et al., 2020).

Existen varios mecanismos de seguimiento solar (tracking), en la Figura 22 se muestran algunos de los sistemas de seguimiento que usan: mecanismos donde se comprimen los fluidos y/o por inducción térmica haciendo que la estructura adopta una forma, por otro lado, están los que usan microcontroladores, drives, cajas de engranajes y motores para orientar la

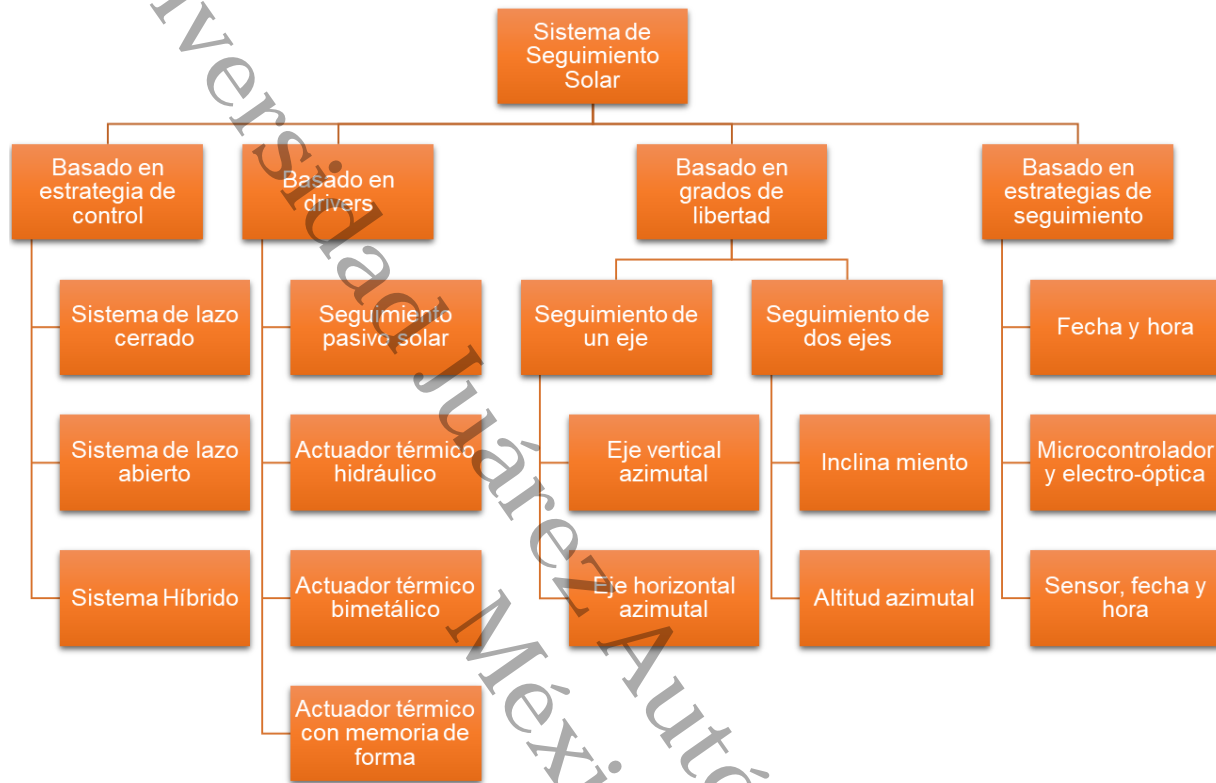
estructura, también están los que usan registros de elevación y ángulos azimutales del sol para orientar la estructura, estos últimos son impulsados por motores o manualmente.

Por último, está el sistema de estrategia de control, el cual tiene mayor capacidad de control durante el seguimiento solar, por consiguiente, es mayor su eficiencia y se clasifica en: seguimiento de lazo abierto y seguimiento de lazo cerrado (Al-Amayreh & Alahmer, 2022; Awasthi et al., 2020; de la Cruz et al., 2012; Ghassoul, 2018; Mpodu et al., 2019, 2019; Rawat et al., 2020, 2020)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Figura 22.

Clasificación de los sistemas de seguimiento solar



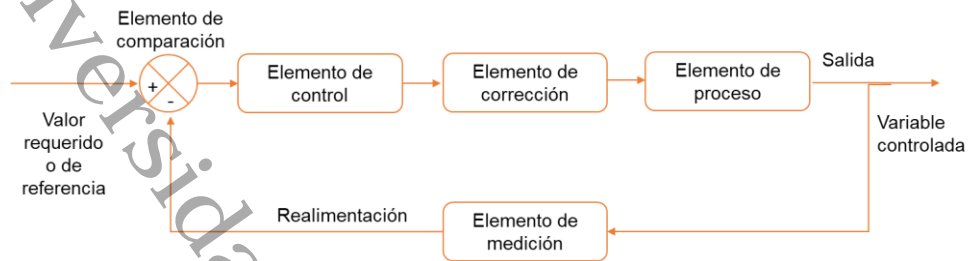
Nota: Adaptación de (Awasthi et al., 2020).

El seguimiento de lazo abierto: el sistema envía la señal a los motores con base a los datos de los sensores, operados por el algoritmo, este sistema no cuenta con un ajuste de error como en el caso de seguimiento solar de lazo cerrado y por lo tanto es menos costoso.

El seguimiento solar de lazo cerrado usa un algoritmo para calcular la trayectoria del sol y es comparado con los sensores que detectan la posición del sol, luego se envía la información a un microcontrolador para ajustar el error del sistema y los motores mueven el sistema a la posición correcta, con esa forma el sistema trabaja con el principio del sistema de control retroalimentado (Awasthi et al., 2020). En la Figura 23 se muestra el esquema básico de un sistema de lazo cerrado.

Figura 23.

Diagrama de bloque de un sistema de control de lazo cerrado



Nota: tomado de (Bolton, 2013).

En la Tabla 4 se describe el sistema propuesto para el control tracking.

Tabla 4

Descripción de cada elemento de control para el sistema tracking

ítem	Elemento del sistema de control	Descripción del elemento
1	Variable para controlar	En el seguimiento solar se desea tener un control sobre la inclinación y orientación del colector, por lo tanto, la variable a controlar es la posición angular.
2	Elemento de proceso	Controlar la posición angular del colector.
3	Elemento de medición	Un potenciómetro acoplado al motor, para medir su posición, con el objetivo de corregir las perturbaciones de la señal.
4	Valor requerido o referencia	También conocido como set point, es la entrada del proceso, para este caso se usó un circuito tracking acoplado a potenciómetro junto con un acondicionador de señal. Los parámetros de set point son de 0% a 100% para 0° a 290° respectivamente.
5	Elemento de comparación	Un amplificador diferencial, como comparador entre la señal del set point y la señal del elemento de medición y como resultado será un error, el cual será corregido en el elemento de control.
6	Elemento de control	Controlador P, PI o PID.
7	Elemento de corrección	Un amplificador inversor.

Hay reportes donde del sistema de seguimiento solar de un eje tiene un 15 a 25% de mejora de la eficiencia del aprovechamiento solar (Awasthi et al., 2020; Munanga et al., 2020) y hasta un 33 a 43 % de mejora para los seguimientos solares de dos ejes (Mpodu et al., 2019). Por lo tanto, en este trabajo se usó el seguidor de dos ejes.

Un sistema de control de seguidor solar permite que el CPC este perpendicular a los rayos del sol, de esta forma se aprovecha mejor los rayos de sol. Como se mencionó anteriormente el CPC y el control mejoran la degradación fotocatalítica, hay otra forma de mejorarlo a un más, consiste en buscar las condiciones de operación, es decir seleccionar las condiciones adecuadas para el funcionamiento del CPC, por lo tanto, se propone un diseño de experimento con el fin de saber los factores que afectan la degradación dentro del CPC.

2.6 Diseño de experimento para el CPC (DE)

Un diseño de experimento es una herramienta de análisis de datos experimentales, en este caso se usa para las pruebas de validación del reactor CPC, por medio del estudio de los efectos de las entradas o variables involucradas en el CPC (factores) en la salida o la degradación (respuesta).

Este diseño de experimento está orientado a determinar los factores que influyen en la degradación, en otras palabras, es para determinar la media que es estadísticamente más significativa que las demás dentro de un grupo de medias, también se podría decir que señala cual factor y/o nivel minimiza o maximiza el impacto en la degradación (Alqahtani et al., 2023; Román-Ramírez & Marco, 2022; Streb et al., 2022).

El diseño de experimento es un proceso secuencial como se muestra en la Figura 24, el primer paso es determinar el problema, el cual variable es más significativa en el reactor

fotocatalítico. El segundo paso es el objetivo del problema, en este caso es obtener la degradación del contaminante en el menor tiempo posible.

Figura 24.

Pasos de un diseño de experimento



Nota: Adaptación de (Gutiérrez, Pulido Humberto de la Vara Salazar, 2008).

El tercer paso es seleccionar los factores y sus niveles, los cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Los factores y sus niveles para las series de los experimentos

Factor	Nivel 1	Nivel 2
Flujo	1L/min	4L/min
Irradiación	10:00 h	12:00 h

El primer factor es el flujo de agua, debido a que en el interior del tubo receptor del CPC se realizará la degradación de los contaminantes orgánicos, la velocidad de flujo de agua permite que el contaminante y el material fotocatalítico estén más tiempo en presencia de los rayos del sol para llevar a cabo la degradación, también el flujo mantiene una temperatura estable durante el proceso de degradación, por lo tanto, tener dos niveles permitirán tener una diferencia de temperatura que afectará la degradación.

El segundo factor es la irradiación, porque a mayor cantidad de rayos de sol concentrados en el tubo receptor, aumentará la cantidad de sitios activos del ZnO/CuO y por

ello aumentará la degradación del contaminante orgánico. Dos horarios diferentes permitirán una diferencia de la irradiación que afectará a la velocidad de degradación y también habrá una diferencia de energía eléctrica usada por el control de seguidor solar. En conjunto se obtendrá las condiciones de operación para mejorar CPC durante la degradación de contaminantes orgánicos.

El cuarto paso es la selección del diseño de experimento, para este caso se realizarán todas las posibles combinaciones de los factores y sus niveles, es decir full factorial y está regido por la Ecuación 11, donde N es el número de experimentos, L es el número de niveles y f es el número de factores. En los diseños factoriales, las réplicas mínimas son dos experimentos de cada una de las combinaciones, por lo tanto, en este caso serán 8 pruebas ($8 = 2(2^2)$)

$$N = L^f \quad (11)$$

El quinto paso, es realizar los experimentos del diseño de experimento, pero se recomienda realizar algunas pruebas preliminares para garantizar la correcta selección de los niveles de los factores y posterior a ello es realizar las experimentaciones.

El sexto y último paso, se realiza un análisis de varianzas de los datos obtenidos, los pasos se plasman en la Figura 25, el producto final es el valor de la F calculada y se compara con un valor crítico. El valor crítico se obtiene de las tablas de F de Fisher, la intersección de su valor requiere las siguientes consideraciones, establecer un nivel de significancia, denotado como $\alpha = 0.05$, nivel de confianza, el número de grupo y el número de datos. Las condiciones de la diferencia son si la F calculada $>$ F crítica, entonces se rechaza la hipótesis nula, en caso contrario si la F calculada $<$ F crítica, no se rechaza la hipótesis nula. La hipótesis

nula significa que todas las medias son iguales, con ello se logra obtener las conclusiones y se puede determinar el factor que impacta más en la degradación del contaminante en el CPC.

Figura 25.

Proceso de obtención de análisis de varianza



Nota: Adaptación de (Gutiérrez, Pulido Humberto de la Vara Salazar, 2008).

2.7 Instrumentación electrónica y medición *in situ* CPC

El seguidor solar y el diseño de experimentos requieren los valores de las variables de: posición angular, temperatura, irradiancia, flujo y CO₂, esto se obtiene por medio de la instrumentación electrónica. En la Tabla 6 se muestran los elementos electrónicos y sus funciones para instrumentar el CPC.

La función del primer elemento de la Tabla 6 se describe a continuación debido a que se requiere su explicación más amplia, este elemento es usado para la medición *in situ* del CO₂. En la degradación de un contaminante orgánico por medio de la fotocatalisis hay probabilidad que se generen subproductos, los cuales se degradan a la par del contaminante principal. Se

debe demostrar la completa degradación del contaminante inicial y todos sus compuestos intermedios. Existen una variedad de mediciones químicas que determinan la mineralización de los contaminantes; las más importantes son (Arte, n.d.; Bendicho et al., 2017):

DQO. Demanda química de oxígeno, mide el oxígeno requerido para oxidar un material orgánico o inorgánica, cada muestra se mezcla con dicromato de potasio por 2 h a 150 °C se mide en un UV-Vis. Las variables que influyen son pH, concentración de material inocuo, intensidad de la muestra (Karchiyappan & Karri, 2021).

DBO. Demanda bioquímica de oxígeno, mide la cantidad oxígeno utilizado en una biodegradación de un material orgánico o inorgánico. El periodo de tiempo común de la prueba son 5 días (Giri et al., 2022).

COT. Carbono orgánico total, mide la cantidad de CO₂, producto de la mineralización del carbono orgánico (Priya et al., 2020).

La determinación de productos inorgánicos, medición de pH o iones inorgánicos como, clorato, nitrato, nitrito, fosfato, amonio, sulfato, etc. Son productos del proceso oxidativo de los contaminantes.

Con base en esta información, el prototipo en su interior tiene la instrumentación electrónica para medir la degradación del contaminante modelo. El modelo de la medición será el COT, es decir la medición de CO₂, debido a que es más rápida que DQO y DBO.

Tabla 6*Listado de elementos requeridos para instrumentar un CPC*

Elemento	Descripción
MQ135	Sensor de concentración de CO ₂ en un rango de 10 ppm a 1000 ppm, la detección es en modo gaseoso. La alimentación eléctrica es de 5V.
DS18B20	Sensor de temperatura de un hilo, adaptado para condiciones húmedas, cubierta de acero inoxidable, a prueba de agua, rango de detección de -55 °C a 125 °C, resolución de 12 bits y alimentación de 5V.
Bomba de diafragma	Bomba de diafragma de 12 V, con un diámetro del tubo de 3/8". Con un caudal de flujo de 5 L/min.
YF-S201B	Caudalímetro, rango de medición de 1-30 L/min, 450 pulsos por litro, alimentación eléctrica de 5 V.
Motor de CD	Motor de corriente directa, conectado a engranajes reductores para mover la estructura del seguidor solar.
Esp32	Microcontrolador fungirá como tarjeta de adquisición de datos de los sensores, y controlador de suministro de energía eléctrica a las tarjetas de control del seguidor solar.
LM741	Amplificadores operaciones, usados como acondicionadores de señal del set point y como controlador analógico del sistema de control.
Potenciómetro de 5 K Ω	Fungirá como sensor de posición angular del set point y del colector del CPC.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

3.1 Síntesis de ZnO

La síntesis de ZnO fue hecha con base a la metodología de Bharathi y colaboradores (Bharathi et al., 2019a), el proceso se muestra en la Figura 26, inicia con la preparación de una concentración molar de 0.2 M de acetato de zinc ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en 50 mL de agua desionizada, luego se agitó por 10 min, posteriormente se agregó gota a gota hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración molar de 0.2 M, alcanzando un pH de 6.1 y por último se calentó a 90 °C por una hora. La muestra obtenida se etiquetó como Z1.

Figura 26. *Proceso de la síntesis de ZnO*



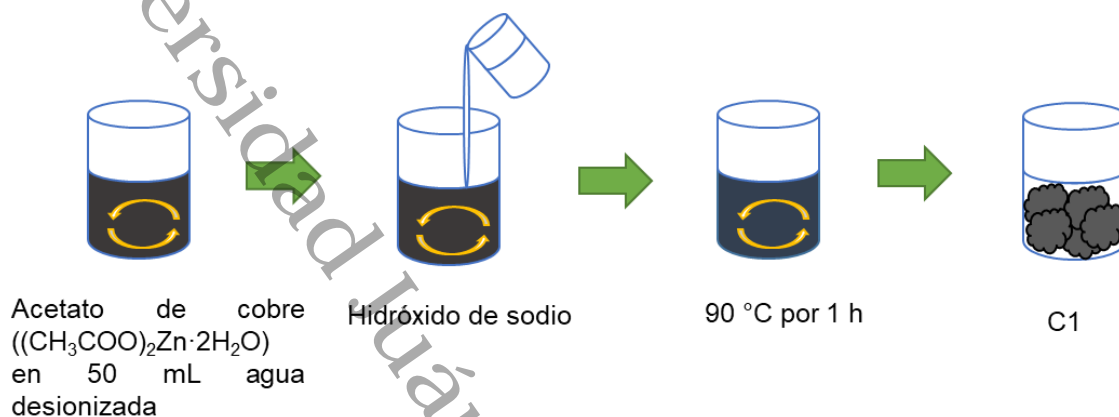
Nota: Adaptación de (Bharathi et al., 2019b).

3.2 Síntesis de CuO

La síntesis de CuO fue realizada con la misma metodología que la síntesis de ZnO, en la Figura 27 se presenta la síntesis para el CuO, inicia con una concentración molar de 0.2 M de acetato de cobre ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) en 50 mL de agua desionizada y agitado por 10 min, luego se agregó gota a gota NaOH con una concentración molar de 0.2 M y se calentó a 90 °C por

una hora. El resultado fue una mezcla espesa, luego fue separada usando papel filtro y se etiquetó como la muestra C1.

Figura 27. Síntesis de CuO

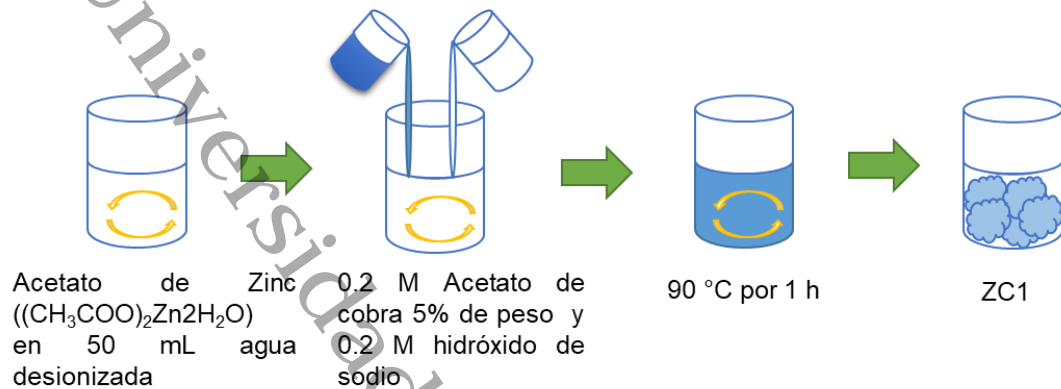


Nota: Adaptación de (Bharathi et al., 2019b).

3.3 Síntesis de ZnO/CuO

La síntesis de ZnO/CuO es producto de la síntesis de ZnO y CuO, en la Figura 28 se muestra la secuencia, esta consistió en mezclar acetato de zinc $((\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ a 0.2 M en 50 mL de agua desionizada, con agitación durante 10 minutos, a la mezcla se añadió gota a gota acetato de cobre $(\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2)$ a 0.2 M y 0.2 mol / L de NaOH y la solución tuvo un pH de 5.6 y fue calentada a 90 ° C bajo agitación constante durante una hora. Por último, el polvo obtenido se etiquetó como ZC1.

Figura 28. Síntesis de ZnO/CuO



Nota: Adaptación de (Bharathi et al., 2019b).

3.4 Condiciones de los equipos usados para la caracterización de ZnO, CuO y ZnO/CuO

TGA Marca TA INSTRUMENTS modelo DISCOVER

Rampa	10.00 °C/min
Rango de temperatura	30 a 600 °C
Ambiente	Nitrógeno

XRD Marca BRUKER modelo D-8 Advance

Tiempo de paso	0.5 s
Tamaño de paso	0.02 grados
40kV 30 mA.	Tubo Cu Kalfa1

XPS Marca THERMO FISCHER SCIENTIFIC modelo K-ALPHA

Tiempo de adquisición	2 min 16.1 s
Fuente del cañón	Al K Alpha
Área de muestreo	400 μm
Paso de energía	1.000 eV
Numero de pasos	1361

SEM Marca JEOL modelo JSM-7601F

TEM Marca JEOL modelo JEM-2200FS

UV-VIS

Rango 250 a 900 nm

FISISORCION Marca BEL JAPAN modelo BELSORP-MAX-LP

Desgasificación 200°C por 3 h

3.5 Prueba fotocatalítica

La prueba consistió en preparar una solución de AM a 18 ppm en 80 mL y se agregó 24 mg del material sintetizado, luego a esta mezcla se ingresó en un baño ultrasónico por 30 min para la correcta adsorción y desorción de las moléculas de AM en la superficie del catalizador (Smazna et al., 2019). Después se colocó la fuente de luz y se tomaron alícuotas cada 30 min para medir la absorbancia del AM, las alícuotas fueron centrifugas y medidas en un espectrofotómetro UV-Vis.

3.6 Prueba fotocatalítica en CPC

Las condiciones para las pruebas fueron las siguientes, la trayectoria de inclinación CPC fue referenciado de norte a sur y la trayectoria de orientación fue referenciado de este a oeste. La medición del consumo eléctrico del CPC durante la prueba fue medida por un wattímetro. El contaminante modelo AM fue preparado a 18 ppm en 500mL y con 150 mg de ZnO/CuO, en la Tabla 5 "Los factores y sus niveles para la experimentación" se muestran los horarios y velocidad del flujo para las pruebas.

3.7 Diseño de experimento

La validación del CPC es fundamental para obtener la mayor degradación en el menor tiempo posible. El diseño de experimento es usado en este caso para analizar las condiciones de operación del CPC (variable de entrada) que tienen efectos en la velocidad de degradación (variable de salida). En la sección 2.6 Diseño de experimento para el CPC (DE), se considera como variables de entrada: la velocidad de fluido y la irradiación, también se propone la Tabla 5.

Tabla 5

Los factores y sus niveles para las series de los experimentos

Factor	Nivel 1	Nivel 2
Flujo	1L/min	4L/min
Irradiación	10:00 h	12:00 h

El diseño de experimento requerido es factorial debido que se requiere determinar los factores que tienen relación con la degradación dentro del CPC, por lo tanto, se debe de realizar todas las condiciones posibles entre los niveles de los factores. Este modelo es 2^2 , dos factores con dos niveles, el mínimo de replicas son 2 y con base en la Ecuación 11 (mostrada en la sección 2.6) y se deben hacer 8 pruebas en total.

El cálculo de los efectos principales de cada factor y su combinación, son:

$$A = \frac{1}{2^n} [(ab - b) + (a - (1))] \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{2^n} [(ab - a) + (b - (1))] \quad (13)$$

$$AB = \frac{1}{2*n} [(ab - a) + ((1) - b)] \quad (14)$$

El modelo del diseño es:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (15)$$

Donde μ es el efecto de promedio global, τ es el efecto del nivel i -ésimo del factor A , β_j el nivel j -ésimo del factor B , $(\tau\beta)_{ij}$, el efecto de la interacción entre τ_i y β_j y ϵ_{ijk} , el error aleatorio: con $i = 1,2; j = 1,2; k = 1 \dots n$.

Para el análisis de varianza se calcula los contrastes de los factores o efectos totales, con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Contraste}_A = ab + a - b - (1) \quad (16)$$

$$\text{Contraste}_B = ab + b - a - (1) \quad (17)$$

$$\text{Contraste}_{AB} = ab + (1) - a - b \quad (18)$$

La suma de los cuadrados de los contrastes marca la importancia de los efectos principales, esto es igual al cuadrado del contraste dividido por el número de muestras de cada

total multiplicado por la suma de cuadrados de los coeficientes de los contrastes, estas se muestran en las ecuaciones 19, 20, 21.

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (19)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (20)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (21)$$

Los datos se pueden se puede concentrar en la Tabla 7 ANOVA

Tabla 7

Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadros Medios	Fexp
Entre grupos	Suma de cuadrados totales entre tratamientos (SCTR)	I-1	Cuadrado medio entre tratamientos (CMTR= SCTR/(I-1))	CMTR/CMR
Dentro de grupos	Suma de cuadrados dentro de los tratamientos o residual (SCR)	n-I	Cuadrado medio residual (CMR= SCR/(n-I))	
Total	Suma de cuadrados total SCT	n-I	Cuadrado medio total (CMT= SCT/(n-I))	

Adicionalmente a los cálculos de las fórmulas es importante la interpretación de las gráficas de efectos de los factores y sus combinaciones. Los resultados serán sometidos a un análisis de varianzas con ayuda del software Minitab, para determinar si se rechaza o se

acepta la hipótesis nula, esta es que no hay factor que impacte significativamente en la degradación dentro del CPC.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Los resultados y discusión se mostrarán en dos partes, la primera corresponde al material fotocatalítico y la segunda al diseño, construcción y control del CPC, ambas en conjunto para mejorar la degradación del contaminante orgánico.

4.1 Termogravimetría (TGA)

En este caso, la técnica de degradación térmica se usó para encontrar la temperatura del tratamiento térmico de ZC1. En la Figura 29 se contemplan los escalones de las pérdidas de peso. En la primera etapa (antes de los 90°) hay una pérdida de peso del 15%, se posible atribuirse a la evaporación, de la humedad y el agua adsorbida que se encuentra en la superficie del material (Surendra et al., 2022).

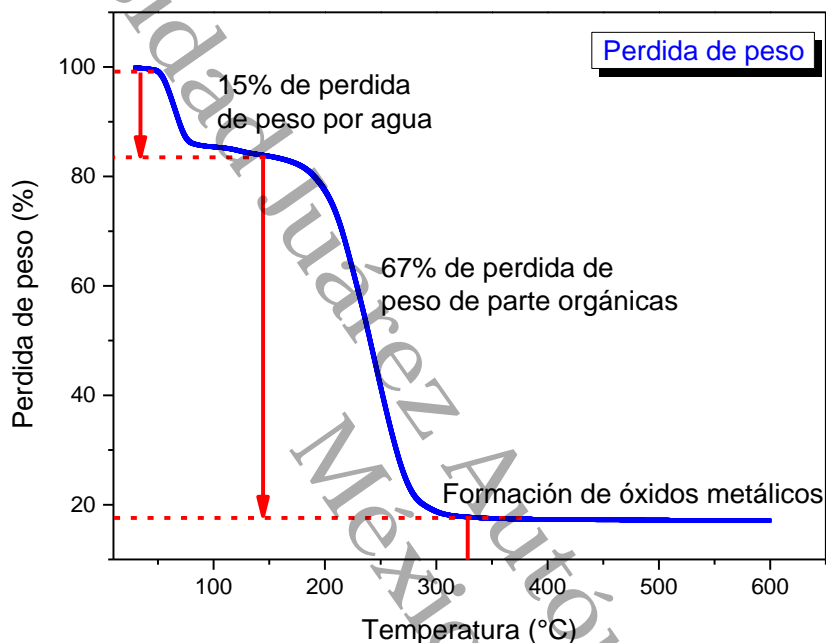
En la segunda etapa (entre 145 - 340 °C) corresponde a una pérdida de peso de 67%, similar a lo reportado por Saravanan et al (2013) y Munguti et al. (2020) ambos se atribuyen a la degradación de los componentes orgánicos de los precursores y da paso a la formación de los óxidos metálicos (Saravanan et al., 2013) (Munguti & Dejene, 2020). Esto se atribuye al deterioro de los grupos etóxido debido al incremento de la temperatura y provocan a la disociación de $Zn(C_2H_5)_2$ a ZnO. (Ali et al., 2024) y se confirma con resultados obtenidos en XRD y XPS

Después de los 340 °C no hay presencia de pérdida de peso, indicando solo la presencia de ZnO/CuO, debido a que no hay más reacciones químicas, demostrando la estabilidad térmica del material marcando la temperatura adecuada para la calcinación del material. Es por lo anterior que las muestras Z1, C1 y ZC1, fueron calcinadas a 400 °C con base al análisis al TGA, ya que el aumento de la temperatura de calcinación mejorar la calidad

del material, debido a que los átomos absorben energía de activación y migran a sitios más estables de la red cristalina (Ruangon et al., 2018)(Muchuweni et al., 2017).

Figura 29.

Termogravimetría de la muestra ZC1

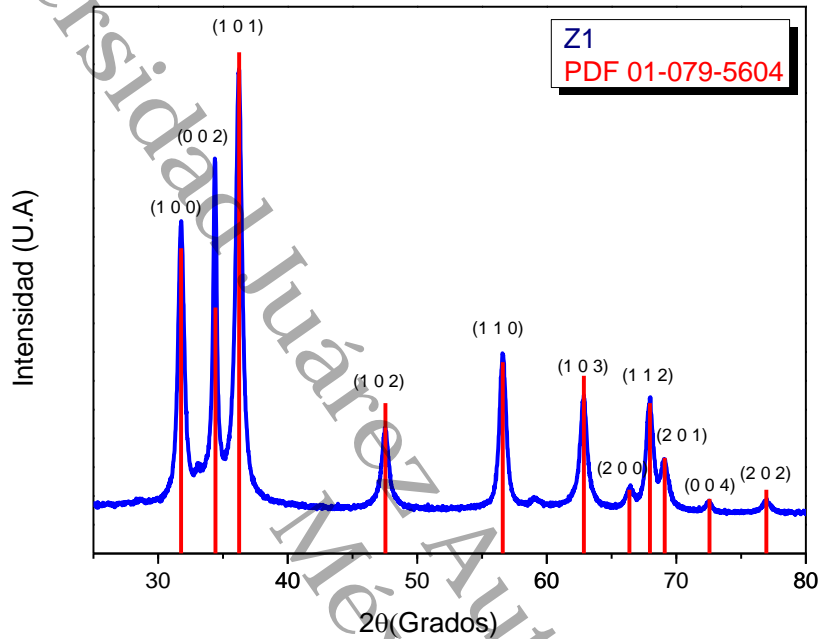


4.2 Difracción de Rayos X (XRD)

La estructura cristalina de las muestras Z1, C1 y ZC1 se determinó por difracción de rayos X, en la Figura 30 se observan las intensidades principales de la muestra de Z1 en $2\theta = 31.77^\circ, 34.37^\circ, 36.22^\circ, 47.53^\circ, 56.59^\circ, 62.85^\circ, 66.45^\circ, 67.99^\circ, 69.03^\circ, 72.55^\circ, 76.99^\circ$ los cuales pertenecen a los siguientes planos difractados (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202) perteneciente a la tarjeta PDF No. 01-079-5604, esto determina que la muestra Z1 es la fase hexagonal wurtzita del ZnO (Shubha et al., 2022).

Figura 30.

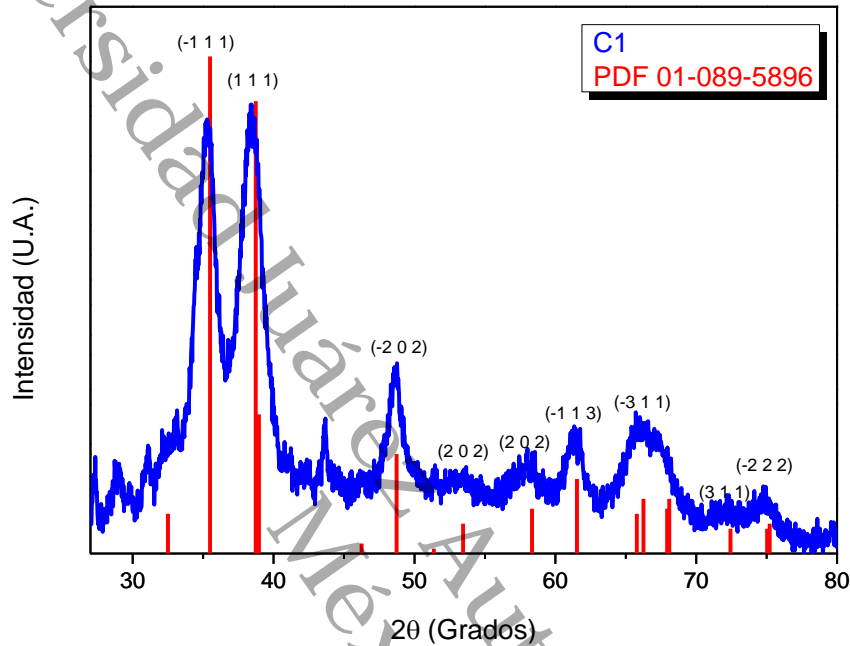
Difracción de Rayos X de la muestra de Z1 comparado con el estándar PDF 01-079-5604 de ZnO



La Figura 31 muestra la difracción de Rayos X de la muestra de C1, el difractograma tiene intensidades en $2\theta = 35.51^\circ, 38.64^\circ, 48.76^\circ, 53.43^\circ, 58.36^\circ, 61.25^\circ, 66.18^\circ, 72.27^\circ, 74.88^\circ$ correspondientes a los planos difractados $(\bar{1}11), (111), (\bar{2}02), (020), (202), (\bar{1}13), (\bar{3}11), (311), (\bar{2}22)$, por ende, la muestra C1 perteneciente a la fase monoclinica del CuO (PDF No. 01-089-5896) (Ávila-López et al., 2021).

Figura 31.

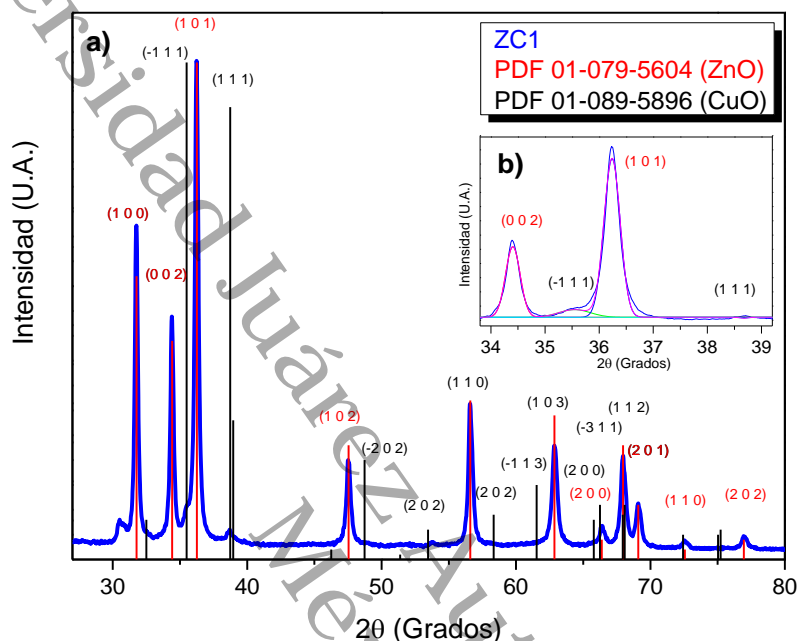
Difracción de Rayos X de la muestra de C1 comparado con el estándar PDF 01-089-5896 de CuO



En la Figura 32 a) es la difracción de Rayos X de la muestra ZC1, sus intensidades principales pertenecen a la fase hexagonal wurtzita del ZnO, la Figura 32 b) es un inserto de la deconvolución en los picos principales, donde se presentan las intensidades en $2\theta = 35.55^\circ$ y 38.82° perteneciente a los planos $(\bar{1}11)$ y (111) de la fase monoclinica de CuO, por lo tanto, en la muestra ZC1 se corrobora el compuesto de ZnO/CuO.

Figura 32.

a) Difracción de Rayos X de la muestra ZC1 comparado con el estándar de ZnO y CuO, b) deconvolución de ZC1 para mostrar los planos de CuO



Los resultados de la dirección de Rayos X confirmaron la obtención de ZnO, CuO y ZnO/CuO para Z1, C1 y ZC1 respectivamente. Los planos difractados de ZnO/CuO no tiene desplazamientos en 2θ con respecto ZnO, indicando que no hay presencia de dopamiento de CuO en ZnO, en consecuencia, se presume una posible heterounión entre ZnO y CuO. En el difractograma solo hay un cambio en la intensidad en el plano (0 0 2) y con un desplazamiento en 2θ , el cual se visualizan en la Tabla 7, es probable atribuirse a la molécula de O, el cual será confirmado y explicado en XPS.

La estimación del tamaño de cristalito se determinó por la Ecuación 22 de Debye-Scherrer (Sanakousar et al., 2021), donde D es el tamaño de cristalito, λ es la longitud de onda de la radiación del rayo X (1.5418 Å) de $\text{CuK}\alpha$, K es la contante de forma 0.9 y β es la altura media máxima (FWHM), el resultado está en la Tabla 7.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (22)$$

Tabla 8

Tamaños de cristalito de ZnO, CuO y ZnO/CuO

Material	2θ	β	D nm	h k l
ZnO	31.77	0.62722	13.2	1 0 0
	34.37	0.44756	18.6	0 0 2
	36.22	0.70996	11.8	1 0 1
CuO	35.51	0.4369	19.1	0 0 2
	38.64	0.5016	16.8	-1 1 1
ZnO/CuO	31.76	0.30654	26.9	1 0 0
	34.41	0.32846	25.3	0 0 2
	36.24	0.35769	23.4	1 0 1
	35.55	0.68618	12.2	-1 1 1
	38.82	0.16799	50.2	1 1 1

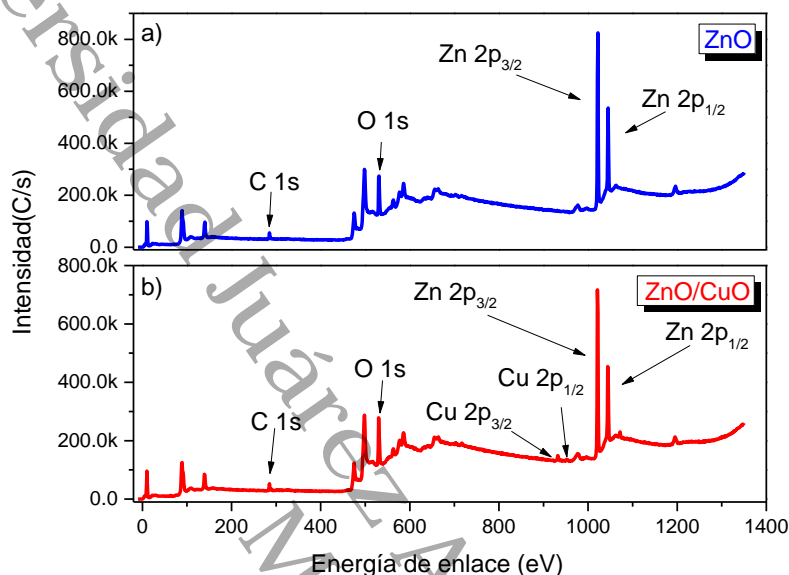
Al calcular los tamaños de cristalitos hay un crecimiento de ZnO/CuO comparado con ZnO y CuO, este cambio confirma un compuesto, constituido por la contribución de CuO y de ZnO (Fouda et al., 2020).

4.3 Espectroscopía Fotelectrónica de Rayos X (XPS)

La composición elemental y la energía de enlace de los elementos fueron analizados por espectroscopía fotelectrónica de rayos X (XPS). En la Figura 33 se confirma la presencia de Zn, O y Zn, O, Cu en las muestras de ZnO y ZnO/CuO respectivamente, esto se correlaciona con lo observado en los resultados de XRD, donde no hay presencia de otros elementos y demostrando la pureza de las muestras. También permite asegurar la presencia de los óxidos metálicos mostrado en TGA, es decir sin los residuos de los precursores en la síntesis durante el tratamiento térmico de las muestras.

Figura 33.

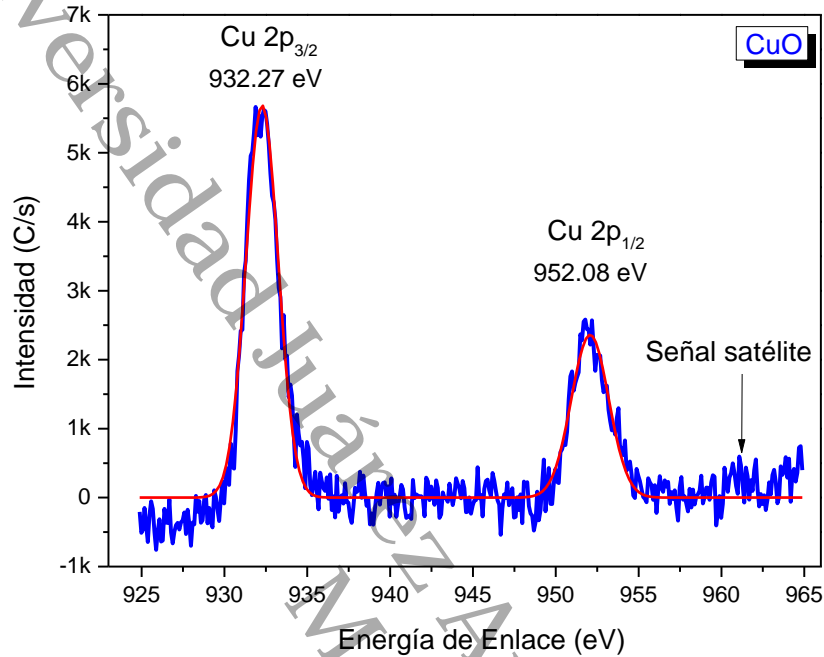
Survey XPS de a) ZnO y b) ZnO/CuO, resaltando la presencia de la energía de enlace de Zn, Cu, y O



La Figura 34 se muestra el nivel de núcleo de Cu 2p con dos picos en 945.08 eV para Cu 2p_{1/2} y 932.27 eV para Cu 2p_{3/2}, la división del espín orbital es de 23.09 eV, estos datos son propios de Cu⁺². Una característica de Cu⁺² es la presencia de señales satélites, las señales satélites normalmente son dos para Cu⁺², en este caso, se visualiza la presencia de una señal satélite perteneciente a Cu 2p^{1/2}, se capaz de atribuirse debido a la baja concentración de CuO (5% de peso) en ZnO, la señal satélite se incrementa con mayor concentración de precursor CuO durante la síntesis (Huang et al., 2009)(Fouda et al., 2020), sin embargo, se confirma el Cu⁺² por lo plano difractado en (-1 1 1) y (2 2 2) en XRD.

Figura 34.

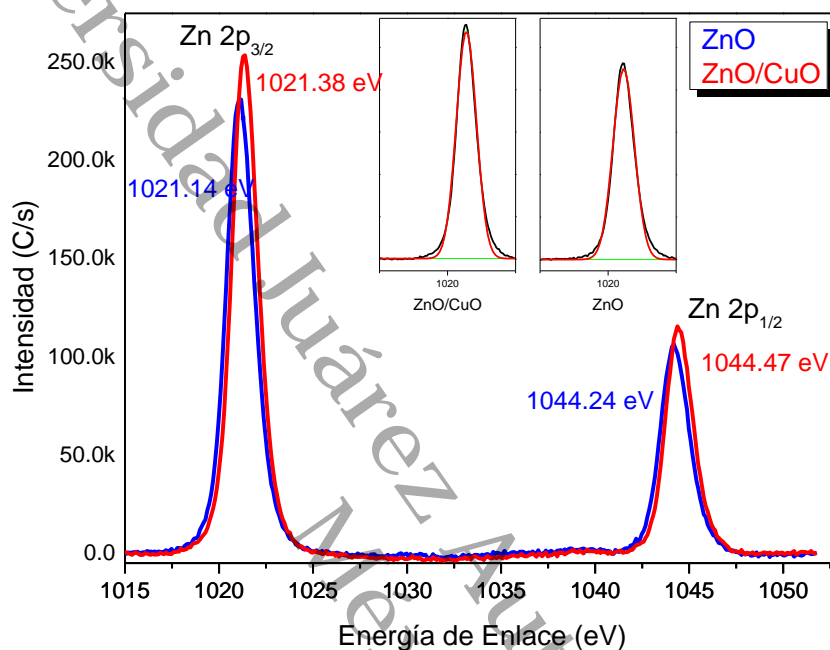
Espectro XPS, presencia del estado de oxidación de Cu^{+2} y señal satélite de la muestra CuO



En la Figura 35 se muestra Zn 2p de ZnO con picos de intensidad en 1021.14 eV y 1044.24 para Zn 2p $\frac{3}{4}$ y Zn 2p $\frac{1}{2}$ respectivamente, lo cual indica Zn^{+2} , este estado de oxidación se confirma con la forma e intensidad de los picos que se muestra en la deconvolución del inserto de la gráfica. Se muestra un desplazamiento de la energía de enlace en Zn 2p de ZnO/CuO, esto sugiere una reacción en la interfaz de CuO y ZnO. En el cual los intercambios electrónicos (extracción de electrones) son producto de las diferentes electronegatividades de Zn (1.7) y Cu (2.0) provocando una heterounión debido al doblamiento de bandas prohibidas que tratan de equilibrarse por el nivel de Fermi (Ed et al., 2005; Huang et al., 2009; X. Wang et al., 2020). Esto también es la causa del no desplazamiento de los planos difractados de ZnO/CuO con respecto a ZnO mostrado en el análisis de XRD.

Figura 35.

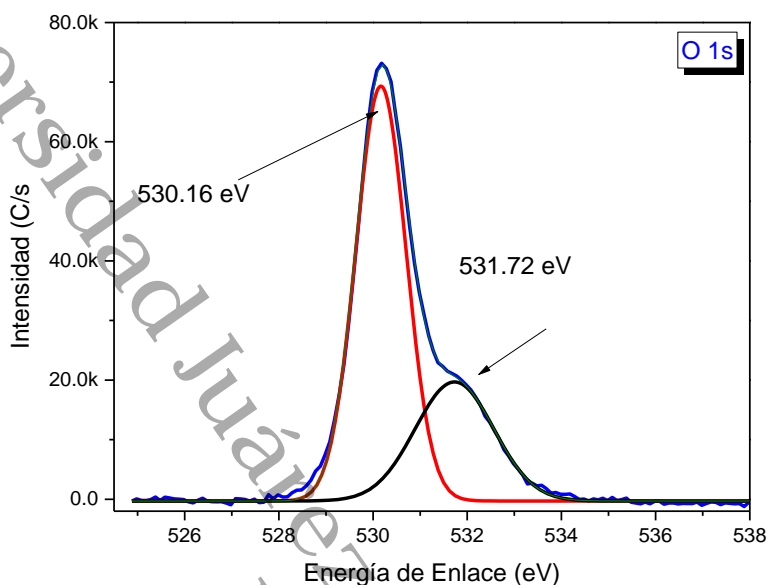
Espectro XPS, desplazamiento de la energía de enlace de Zn en las muestras de ZnO y ZnO/CuO



En la Figura 36 se muestra la energía de núcleo de O 1s, la deconvolución muestras 2 picos, 530.16 eV y 531.72 eV. En 530.16 eV pertenece a la modificación en la red de O de CuO y ZnO (Weng et al., 2021), esta modificación es por el átomo de O, el cual está siendo compartido entre los dos óxidos metálicos como parte de la interfaz y por ello en XRD hay un cambio de intensidad y en el desplazamiento del plano (0 0 2) de ZnO/CuO. En 531.72 eV se puede atribuir a la vacancia de oxígeno (Jiang et al., 2021a), mejora la eficiencia degradación de contaminantes orgánicos, debido a que la energía de la vacancia de oxígeno sirve como estados donantes de electrones que contribuye a la reducción del banda prohibida (Jiang et al., 2021b) y a su vez impacta a la separación de cargas del par electrón hueco el cual es importante para la fotocatalisis, porque se incrementa el tiempo para poder realizar las reacciones de oxidación y reducción.

Figura 36.

Deconvolución del espectro XPS de O 1s



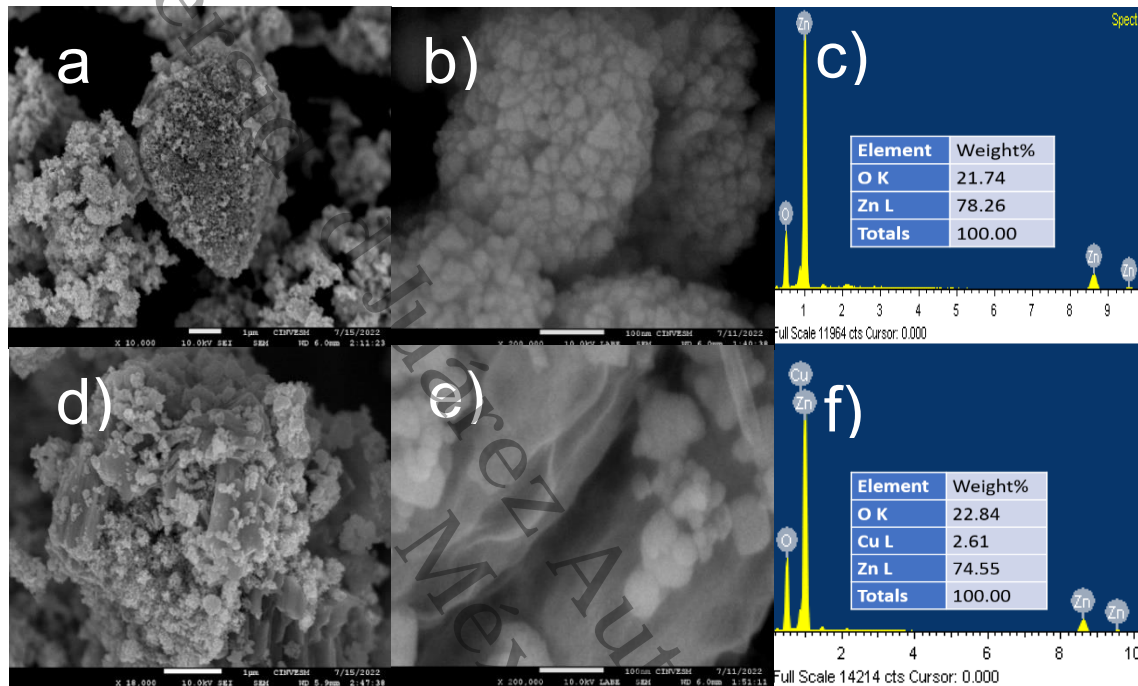
4.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La morfología de ZnO y ZnO/CuO se muestra en la Figura 37, en ambos casos, la morfología porosa de las partículas se puede atribuir a la evaporación de los componentes orgánicos de los precursores durante el proceso del tratamiento térmico (Ma et al., 2022). En el EDS solo hay presencia de Zn, O y Cu, no se detecta algún otro elemento en las muestras, mostrando la pureza de los materiales, esto se correlaciona con el espectro de XRD y el survey del XPS. (Akbar Jan et al., 2021).

La distribución homogénea de los óxidos metálicos en el composito permite una mejor actividad fotocatalítica, debido a que se obtiene más sitios activos de interacción para la separación de cargas del par electrón-hueco, en presencia del contaminante.

Figura 37.

Micrografía SEM de ZnO a diferentes magnificencia (a,b) y ZnO/CuO (d,e). EDS de ZnO (c) y ZnO/CuO (f)

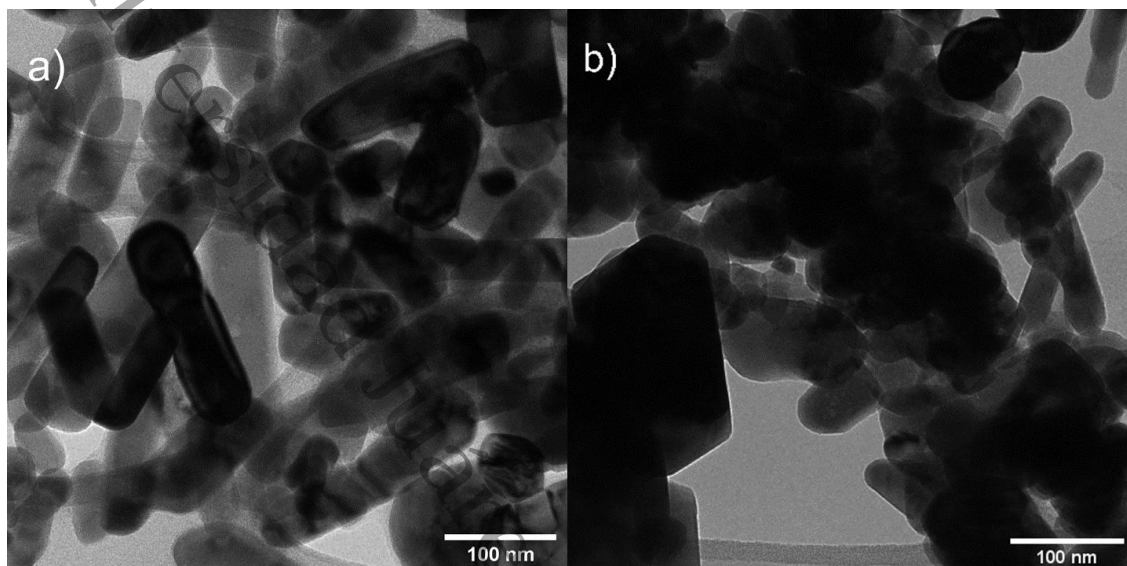


4.5 Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

En la Figura 38 a) se presenta las partículas de ZnO con la forma tipo cilindro, tienen un rango de 46 nm a 62 nm de diámetro y una media de 145 nm de longitud, en la Figura 38 b) se muestra el CuO unido en los bordes de ZnO (Sathishkumar et al., 2011), en el composito se continua apreciando la forma tipo cilindro de ZnO, pero hay aglomeración de partículas por parte de CuO, mostrando una variedad morfológica (Al Baroot et al., 2022). La micrografía también muestra una dispersión con menos aglomeración en ZnO (Figura 38 a), comparada con ZnO-CuO (Figura 38 b), debido a la incorporación de CuO y tiene una tendencia a formar grandes grupos, producto de las fuerzas de atracción electrostática (Fouda et al., 2020).

Figura 38.

Micrografía TEM de a) ZnO y b) ZnO/CuO



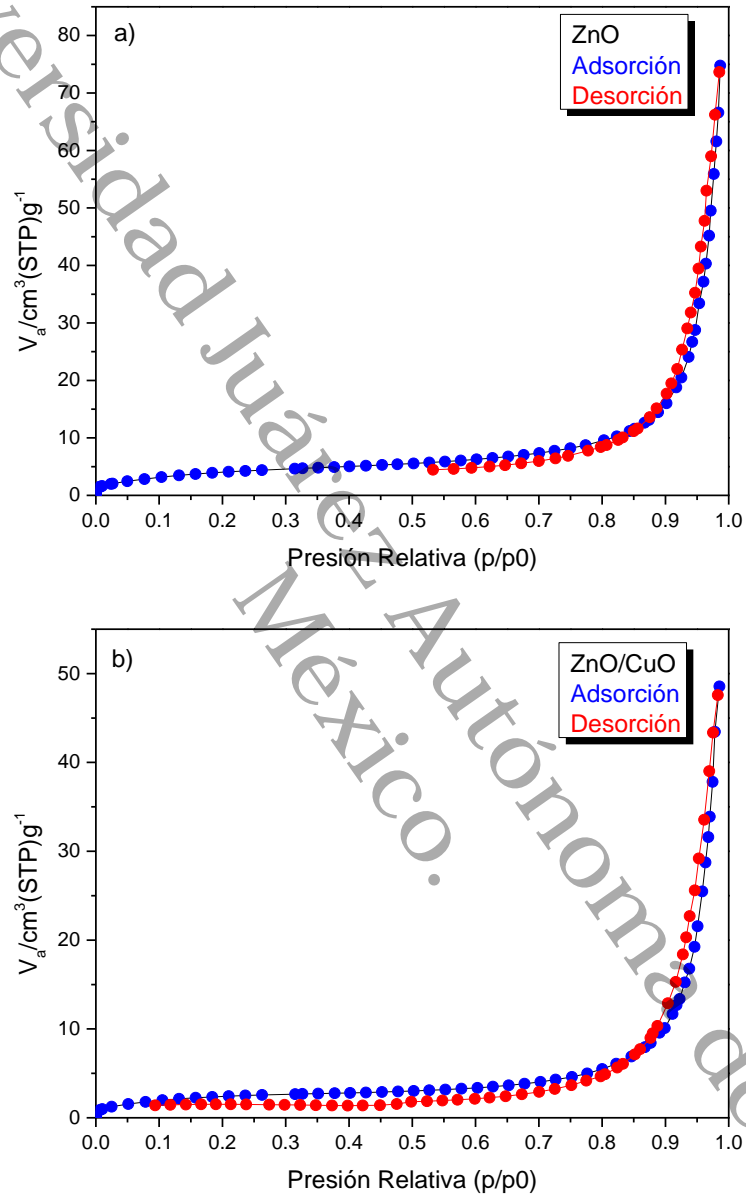
4.6 Fisorción de Nitrógeno

El área específica y la porosidad de ZnO y ZnO/CuO fue analizado usando Brunauer-Emmett-Teller (BET). En la Figura 39 se observa las isotermas de adsorción y desorción de ZnO y ZnO/CuO, las formas de las isotermas son de tipo IV y la adsorción sucede a presiones relativamente bajas (P/P_0), confirmando que son materiales mesoporosos. Las estructuras mesoporos mejoran el ingreso a sitios activos del ZnO/CuO y a su vez mejora la actividad fotocatalítica en la degradación del contraminente, también estas estructuras ayuda a la reutilización en fotocatalisis (Gindose et al., 2024).

el tipo de lazo para las dos histéresis son de tipo H1 y empiezan a formarse con poros mayores a 4 nm.

Figura 39.

a) el ZnO y b) el ZnO/CuO tiene Isotermas tipo IV y ambas con presencia de macroporos



La forma de la rama de desorción en los dos casos no presenta bloqueo en el poro de la red, sin embargo, tienen un retardo controlado, se atribuye debido a el ancho del cuello en el poro tenga un tamaño similar a la anchura del poro. En la Tabla 8 se muestran las

características texturales de ZnO y ZnO/CuO (Castañeda et al., 2022; Mahato et al., 2021; Thommes et al., 2015).

Tabla 9

Características texturales de ZnO y ZnO/CuO

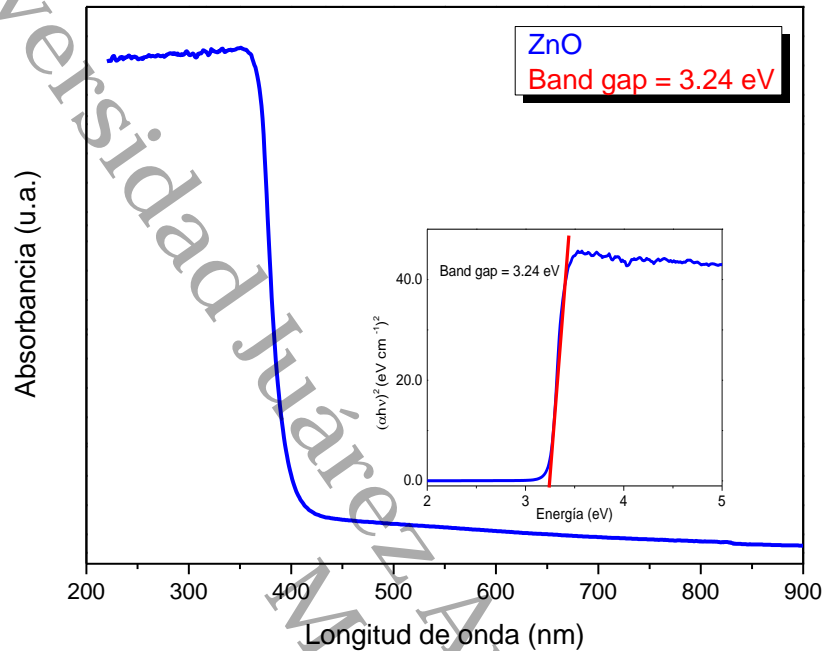
Material	Diámetro del poro (nm)	Área específica (m ² g ⁻¹)	Volumen total del poro (cm ³ g ⁻¹)
ZnO	28.74	1.60 E+01	1.15 E+01
ZnO/CuO	31.93	9.40 E+00	7.51 E-02

4.7 Espectroscopía de luz Ultravioleta y Visibles de reflectancia difusa (UV-Vis)

En la Figura 40 se observa el espectro UV-Vis del ZnO, la transición electrónica de ZnO sucede aproximadamente en 382 nm, es decir cuando la fuente de luz emite en esa longitud se genera el par electrón-hueco. La estimación banda prohibida fue de 3.24 eV (Kalaiyan et al., 2020; Zyoud et al., 2020).

Figura 40.

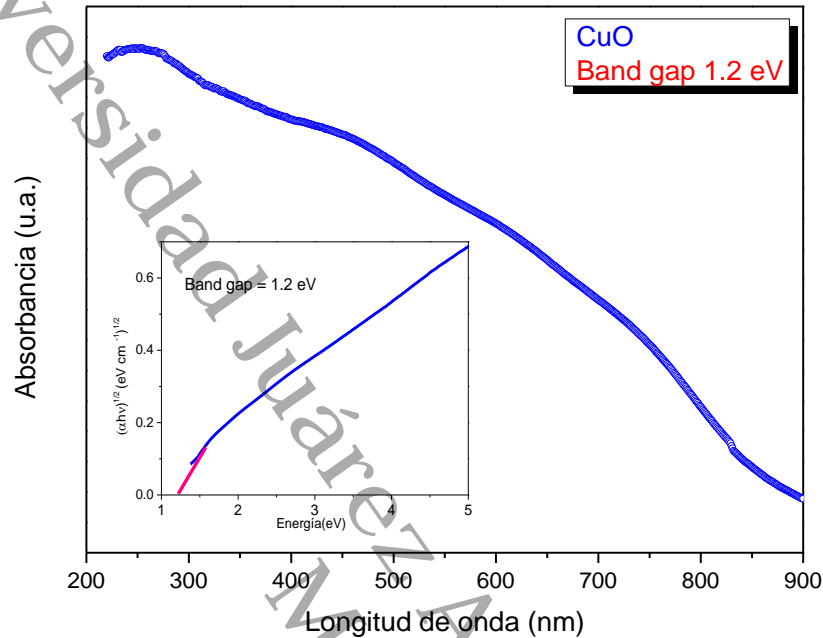
Espectro de absorbancia de ZnO y la estimación de su banda prohibida



El acoplamiento de un material semiconductor con una banda prohibida menor al del ZnO, permite mejorar el aprovechamiento de la luz visible, es decir, fotoactivar en ZnO con luz visible (Wetchakun et al., 2019). En la Figura 41 se muestra la espectroscopía del CuO, el cual absorbe la región UV y gran parte del espectro electromagnético de la región visible de la luz, las transiciones electrónicas se realizan en la región visible, lo cual es importante para sensibilizar el ZnO en esa región. El cálculo de la banda prohibida del CuO fue de 1.2 eV, donde la energía del fotón de luz debe ser mayor a 1.2 eV para que sea absorbido por el material semiconductor y la conductividad eléctrica aumentará debido a la generación el par electrón-hueco (Benaboud et al., 2017).

Figura 41.

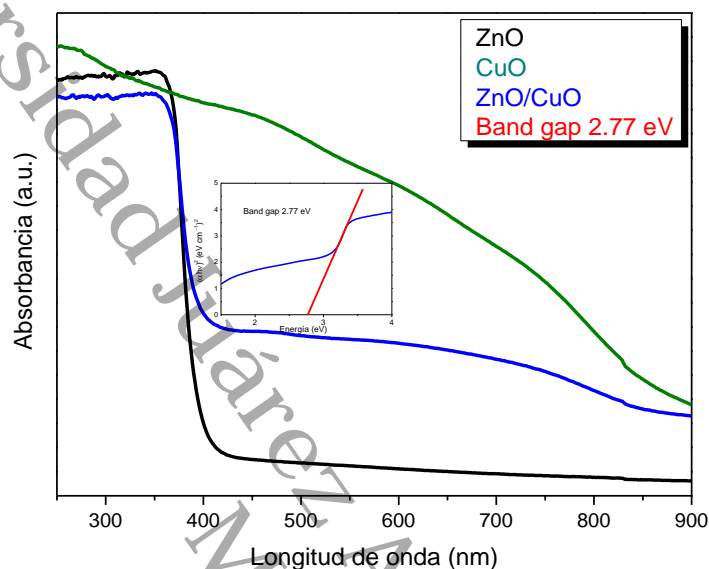
Espectro de absorbancia de CuO y la estimación de su banda prohibida



En la Figura 42 se muestra de nuevo la espectroscopia UV-Vis del ZnO y CuO en contraste con el acoplamiento del ZnO/CuO. En este caso se aprecia como el ZnO/CuO se fotoactiva en la misma región que el ZnO, pero absorbe en la región visible por la sensibilidad aportada por el CuO y se estimó la banda prohibida de 2.77 eV, este aprovechamiento de la absorción en el espectro visible es probable debido a la heterounión por el doblamiento de bandas que entran en equilibrio de ZnO y CuO.

Figura 42.

El espectro de ZnO/CuO es activa en la misma región del ZnO, pero absorbe en la región visible como CuO y la estimación de la banda prohibida de ZnO/CuO



Esta técnica de caracterización aporta la información sobre las longitudes de ondas que requiere el material para su fotoactivación en la prueba fotocatalítica. La técnica reveló que el ZnO realiza la actividad fotocatalítica en contra del contaminante usando una fuente de luz de emisión en la región UV y para ZnO/CuO requiere una fuente de emisión en la región del espectro visible haciendo factible el uso de luz solar.

4.8 Actividad fotocatalítica

La actividad fotocatalítica fue realizada para el ZnO y ZnO/CuO usando una lámpara fluorescente de UV y LEDs de emisión en el espectro visible respectivamente.

4.8.1 ZnO y ZnO/CuO en presencia de AM usando lámpara fluorescente UV

Las primeras pruebas fotocatalíticas fueron, AM en presencia de ZnO y AM en presencia de ZnO/CuO, usando la lámpara fluorescente marca Tecnolite, modelo Hel-

20W/BLB, de 20 W, con una longitud de onda principal en 380 nm, como se aprecia en la Figura 43 a). La lámpara se colocó a una distancia 10 cm sobre la solución de prueba (3.5 prueba fotocatalítica). En ambos casos la primera alícuota fue denominada "inicial", se tomó después del baño ultrasónico, luego la alícuota denominada "0" se tomó en oscuridad y las siguientes muestras se tomaron cada 30 min hasta llegar a los 240 min en total. Cada muestra fue previamente centrifugada para su medición en el espectrofotómetro.

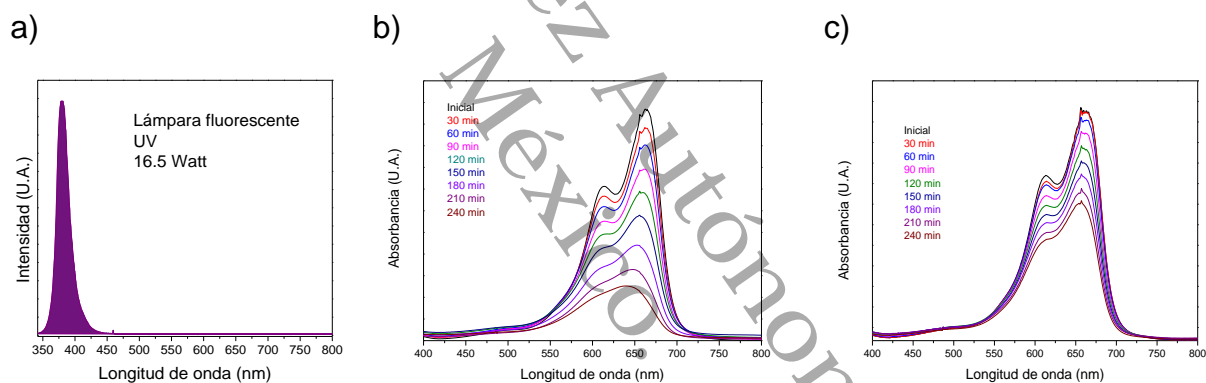
En la Figura 43 b) y c) se muestran los espectros de absorbancias de ZnO y ZnO/CuO respectivamente, el valor la absorbancia en cada alícuota decrece, indicando una reducción en la concentración de la muestra, producto de la degradación del AM en presencia de ZnO y ZnO/CuO. Sin embargo, se produce mayor la degradación en ZnO que en ZnO/CuO, debido a que el ZnO aprovecha mejor el espectro UV que el ZnO/CuO. El mecanismo de degradación de ZnO se muestra a continuación (Hieu et al., 2018):



El ZnO absorbe longitudes de onda en la región UV y se produce el par electrón-hueco (Ecuación 23), entonces los electrones y huecos se desplazan a la superficie del semiconductor. Los electrones reducen la superficie absorbida del oxígeno formando radical superóxido (Ecuación 24), los huecos oxidan la superficie absorbida del agua en radicales hidroxilos (Ecuación 25). Ambos radicales atacan la molécula del colorante de AM llevándolo a su degradación (Ecuación 26 y 27) (Sahu et al., 2020).

Figura 43.

a) Lámpara fluorescente UV usada en las pruebas fotocatalíticas en b) ZnO y en c) ZnO/CuO

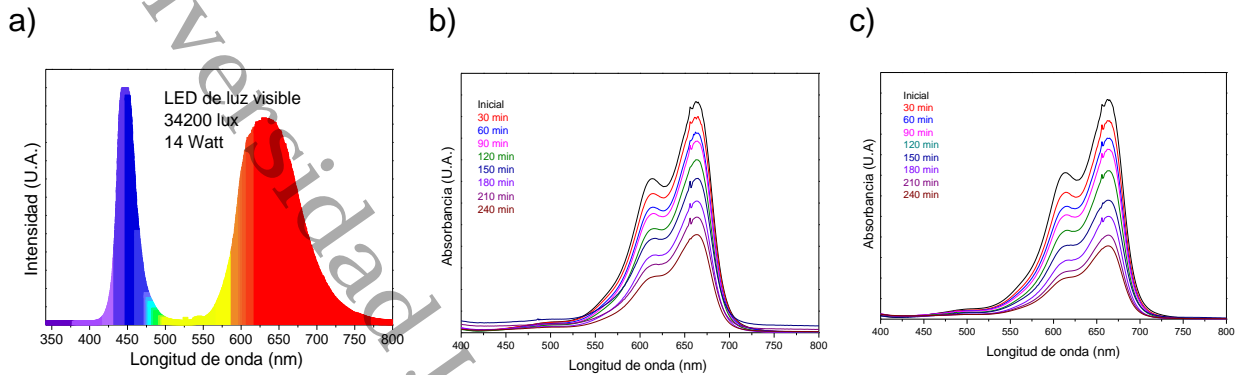


4.8.2 ZnO y ZnO/CuO en presencia de AM usando LEDs

En las siguientes pruebas se usó LEDs marca Ipower, modelo Grow de 14 W, el cual emite luz en el espectro visible (420 nm a 800 nm) como se muestra en la Figura 44 a) y con un consumo energético de 3.5 W. Los LEDs se colocaron a una distancia de 10 cm sobre la solución de prueba, como en la sección anterior. En este caso la prueba de la Figura 44 c) tuvo mejor resultado en la prueba fotocatalítica, esto se debe a que el ZnO/CuO aprovecha mejor el espectro en la región visible para la degradación del AM.

Figura 44.

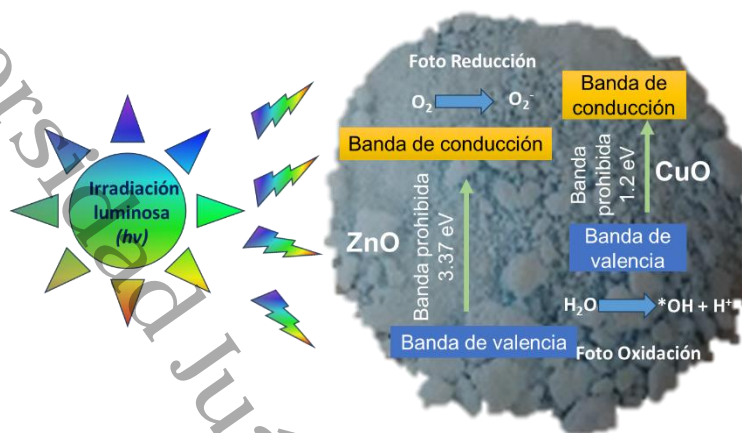
a) LEDs usados para prueba fotocatalítica en b) ZnO y c) ZnO/CuO



La degradación se muestra en la Figura 45, donde la luz ($h\nu$) irradia la superficie del semiconductor (SC), por lo tanto, el electrón (e^-) absorbe la energía del fotón y se transfiere a la banda de conducción del ZnO y a la banda de conducción del CuO, el electrón reduce la molécula del oxígeno (O_2) produciendo superóxidos (O_2^-) por otra parte el hueco (h^+) producido por el desplazamiento del electrón de la banda de valencia del ZnO y de la banda de valencia del CuO, oxida la molécula del agua (H_2O) dando paso al radical hidroxilo, luego el superóxido y el radical hidroxilo reaccionan con la molécula de azul de metileno (AM) llevándolo a su mineralización (H_2O y CO_2) (Fouda et al., 2020)(Almehizia et al., 2022)(Diaz-Angulo et al., 2020), el mismo proceso se muestra el mecanismo de degradación propuesto.

Figura 45.

Proceso de degradación de AM en presencia de ZnO/CuO



Nota: Adaptación de (Mubeen et al., 2023).



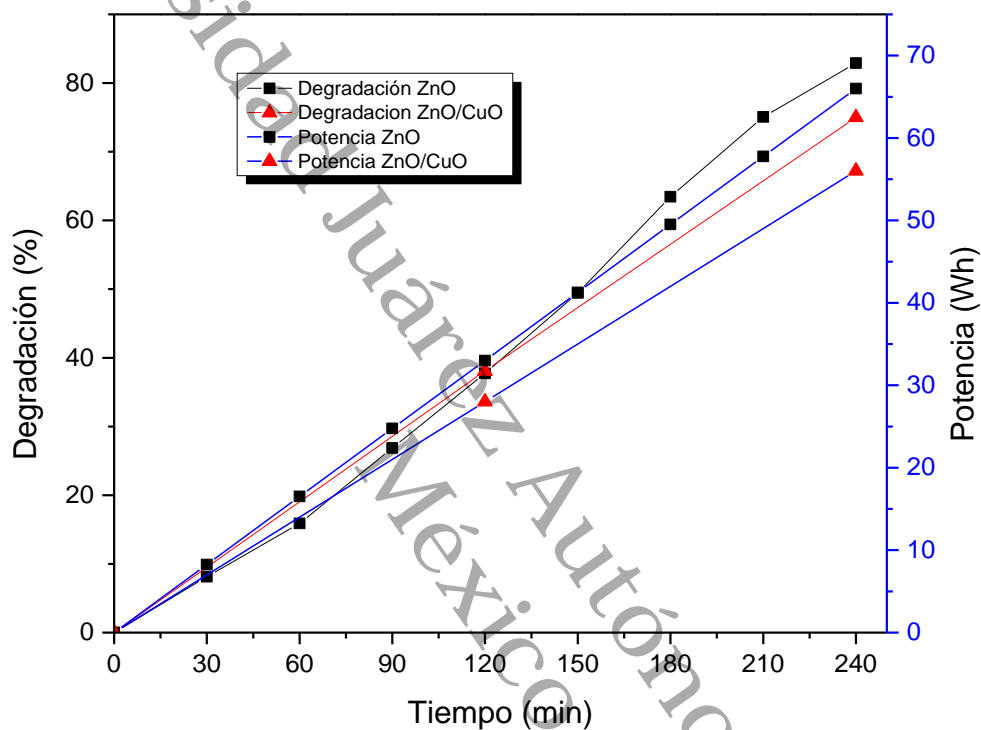


La mayor degradación obtenida con la lámpara fluorescente UV fue con ZnO y con los LEDs fue ZnO/CuO, para comparar cuál de los dos es más eficiente, se debe determinar un común denominador, esta es la potencia eléctrica consumida por las fuentes luminosas.

4.8.3 Comparación de la degradación de UV con ZnO y LEDs con ZnO/CuO

La potencia eléctrica consumida durante la degradación se muestra en la Figura 46, la relación de potencia consumida y degradación del AM, la potencia consumida fue de 66.04 W/h y 56 W/h para el ZnO y el ZnO/CuO respectivamente.

Figura 46. Comparación de potencia eléctrica, degradación con respecto al tiempo de ZnO y ZnO/CuO



En la Tabla 10 se muestra la comparativa de las condiciones y el resultado de la prueba de degradación de algunos autores y este trabajo. Este trabajo modificó la metodología de Bharathy y se logró reducir en consumo energético de 55.2 % al llegar a un aproximado del 75 % de la degradación de AM en presencia de ZnO/CuO.

Tabla 10

Comparativa del consumo energético en la degradación de AM en presencia de ZnO/CuO.

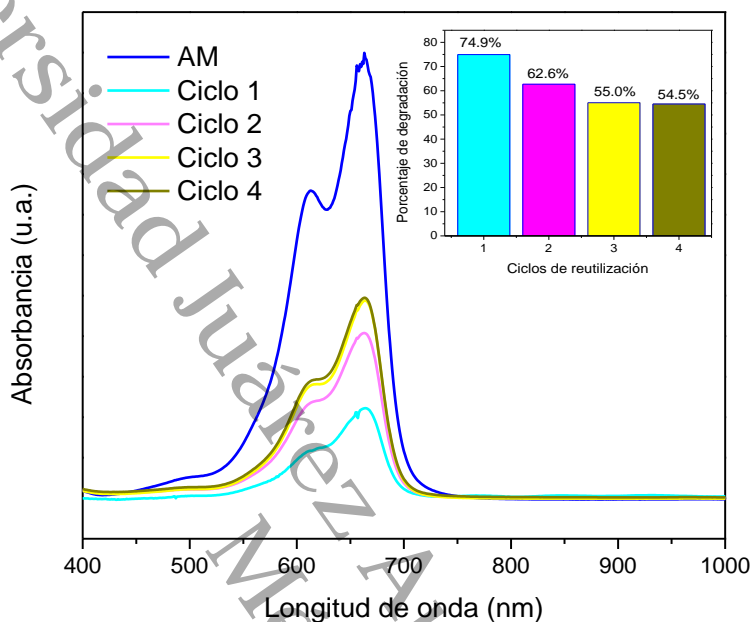
Autor	Concentración	Catalizador en mg	Solución de AM en mL	Lámpara en W	Tiempo de degradación a 80%	Potencia Eléctrica Wh
Acedo-Mendoza A.G. et al. (2020)	—	150	450	400	10 min	66.66
Munguti et al. (2020)	20 mmol/L	30	60	150	5h	750
Harish S. et al. (2017)	10 ppm	—	—	500	3 min	25
Bharathi P. et al. (2019)	10 ppm	50	50	500	15 min	125
Este trabajo (2024)	18 ppm	24	80	14	240 min	56

4.9 Reutilización de ZnO/CuO

La estabilidad y reciclamiento del material fue puesto a prueba 4 veces, como se presenta en la Figura 47, cabe señalar que en otros trabajos reportados, las metodologías de reutilización consiste en el lavado del material con agua desionizada y con un solvente, luego son secado para ser reutilizados (Patil et al., 2021), sin embargo para este trabajo se no lavo con el fin de aumentar la dificultad de desorción del material (Fouda et al., 2020), aun así se observa la reducción de la absorbancia en las muestras por cada ciclo, confirmando que el material continua degradando.

Figura 47.

Pruebas de reutilización de ZnO/CuO en AM



El porcentaje de la efectividad de los ciclos fue por medio de la Ecuación 36.

$$\% \text{ degradación} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (36)$$

Donde el porcentaje de degradación o eficiencia de degradación está dada por: C_0 es la concentración y absorción de la solución de AM antes de la irradiación de la luz y C_t es la concentración y absorción de la solución del AM después de cada ciclo de utilización (Xu et al., 2019b). Los porcentajes de degradación por cada ciclo fueron 79.4% 62.6%, 55.0% y 54.5% para primer, segundo, tercer y cuarto ciclo respectivamente.

Estas pruebas de degradación y reutilización apoyan en la factibilidad de usar el ZnO/CuO en un CPC para aprovechar la luz solar, con el fin de degradar un contaminante orgánico lo más rápido posible.

4.10 CPC

En esta sección se muestra el diseño, construcción y control del CPC, usando la luz del sol.

4.10.1 Simulación del CPC

El material empleado para el CPC debe tener una alta reflectancia, en los trabajos reportados usan acero inoxidable, aluminio, también con recubrimientos como: platino, níquel y oro (Tian et al., 2018). En este caso se usó el aluminio, debido a que el aluminio tiene una alta reflectancia y la maleabilidad que permite adoptar la forma deseada.

El parámetro inicial fue el diámetro del tubo receptor que corresponde al D_{max} , con un diámetro de 19 mm y aplicando las Ecuaciones 6-10 se obtiene las dimensiones del CPC, estas se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Parámetros iniciales del CPC.

D_{max}	D_m	A	Θ	HP	Concentración
19 mm	9.5 mm	360 mm	3 °	90 mm	5.7 Soles

Los datos fueron ingresados en un software de simulación para comprobar los parámetros del CPC. El software usado fue SolTrace versión 3.0, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) del departamento de energía de Estados Unidos, el cual usa el algoritmo de Ray-Tracing.

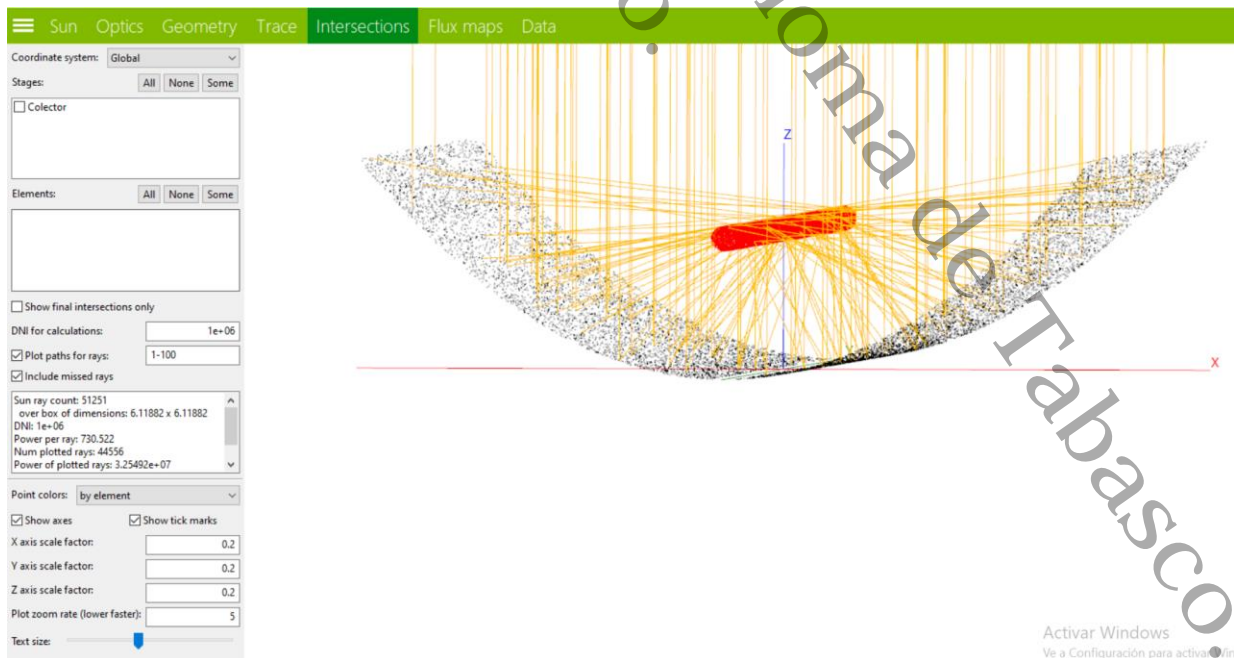
Las condiciones de la simulación fueron:

- Las coordenadas de la ubicación.
- Reflectancia.
- Dimensiones, área y superficie del colector y del tubo receptor.
- Un millón de haces de luz y una visualización del 75%

En la Figura 48 se presenta la simulación, con las condiciones anteriores y la ubicación del tubo receptor con base en el análisis mostrado en el punto 2.4.4 y se confirma que el tubo receptor del CPC recibe la mayoría de los haces reflejados en el colector. La simulación confirma el correcto funcionamiento de los datos del diseño, ahora da paso a la construcción del CPC.

Figura 48.

Simulación del CPC con el software SolTrace



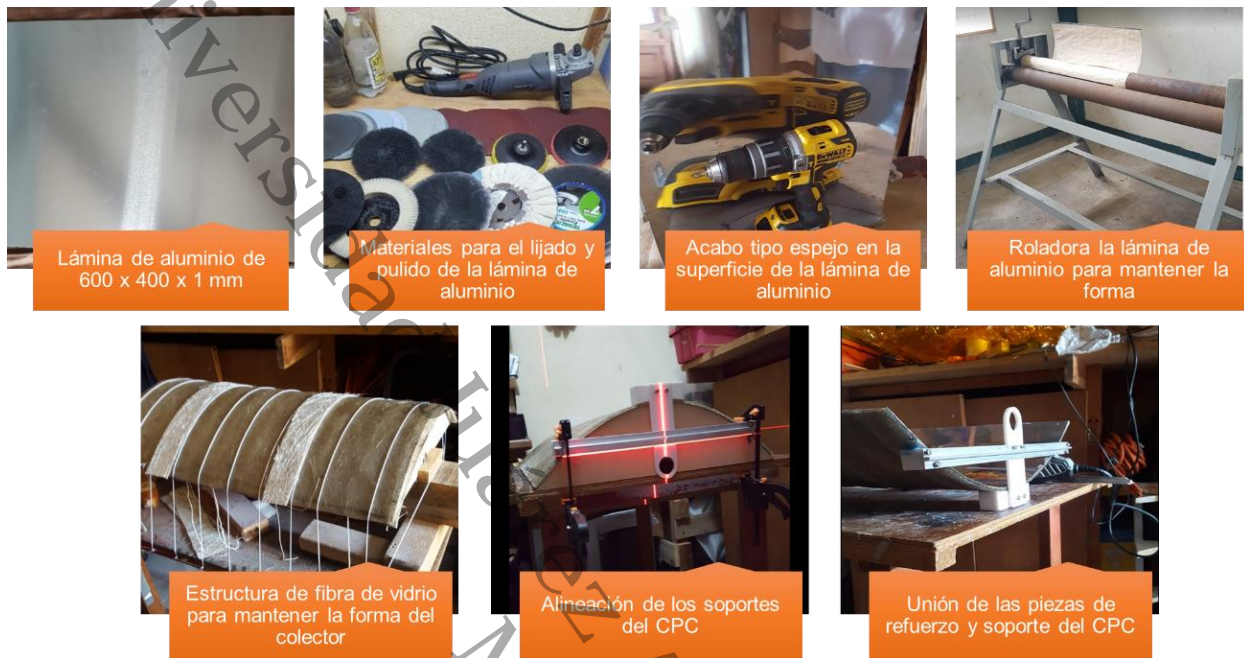
4.10.2 Construcción del CPC

El proceso de construcción del colector se muestra en la Figura 49, inicia con la forma del colector, para ello se usó una lámina de aluminio, por su alta reflectancia y con un espesor de 1 mm para su fácil maleabilidad.

La lámina de aluminio fue lijada con lijas al agua de granos de 600, 1000, 1500, 2000, 3000 y 5000, luego fue pulida con pastas abrasivas y borlas de diferentes materiales, después se llevó a una roladora de lámina (roladora de lámina perteneciente al laboratorio de máquinas y herramientas de la DAIA) para adoptar la forma deseada.

La lámina de aluminio ya con el acabado tipo espejo se unió a un soporte hecho con fibra de vidrio, este tipo de estructuras permite tener curvaturas rígidas y ligeras que mantienen la forma deseada del absorbedor y también soporta las condiciones climáticas del estado. Después se fijaron los refuerzos a la base, luego se le unieron los soportes del tubo receptor, los dos soportes fueron alineados a la estructura del colector y reforzados con un riel de aluminio.

Figura 49. *Proceso de la construcción del colector*



Después de la construcción del colector se debe comprobar su forma, como se hizo en la simulación del software SolTrace, los rayos del sol se deben reflejar en la superficie del colector y concentrarse en el tubo receptor. La comprobación del colector consistió en usar una fuente de luz puntual en un soporte que se desplaza paralelo al colector. La luz se proyectó de forma perpendicular a la superficie del colector y se desplazó en forma vertical para comprobar la mayoría de la superficie del colector.

En la Figura 50 se presenta una serie de imágenes donde se desplaza un haz (flecha amarilla) de forma perpendicular a la superficie del colector y su reflejo (flecha naranja) incide sobre el tubo receptor. Con este arreglo se visualiza las trayectorias de los haces de luz, los cuales fueron igual a los que se obtuvieron con la simulación (Figura 48). Esto se debe a la forma del colector, que permite concentrar los haces de luz en un punto focal, para que todos los haces de luz sean reflejados y concentrado al tubo receptor, como se observa en la

simulación y en la verificación, el borde superior del tubo receptor debe estar ubicado por debajo del foco.

Figura 50. *La comprobación del CPC se dio cuando un haz de luz puntual (flecha amarilla) se proyectó en varias zonas del colector y su reflexión (flecha naranja) siempre se dirigió en la superficie del tubo receptor*



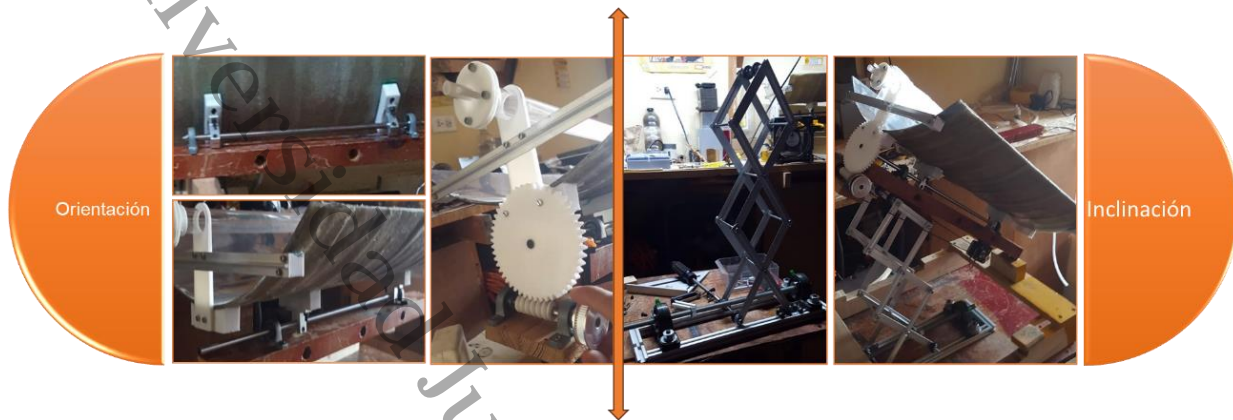
4.10.3 Soporte de CPC (ejes de orientación e inclinación)

En la Figura 51 se muestra el soporte del CPC, el cual se divide en dos: orientación e inclinación. La estructura de orientación consiste en abrazaderas de aluminio, la varilla de acero y rodamientos de piso, el cual le permite girar sobre su eje, dándole la libertad de moverse con respecto a la horizontal de -46° a 46° grados, para mantener la posición adecuada se instaló un engranaje tipo gusano de 50 dientes.

En el caso de la estructura de inclinación, primero se fijó un extremo del CPC en un soporte general, de esa forma se reduce el esfuerzo del movimiento de inclinación, para su movimiento se construyó un sistema de elevación construido con perfiles y rieles de aluminio, rodamientos de piso, rodamientos con caucho, tornillos, arandelas y tuercas de seguridad. Esta estructura le permite alcanzar desde 0 a 60° de inclinación.

Figura 51.

Mecanismo de orientación e inclinación



Con las estructuras de orientación e inclinación del CPC, se captará de forma eficiente los rayos del sol, para la fotocátalisis, ahora se abordarán los elementos necesarios para llevar a cabo la recirculación del AM en presencia del ZnO/CuO dentro del CPC.

4.10.4 Diseño y Construcción de bridas

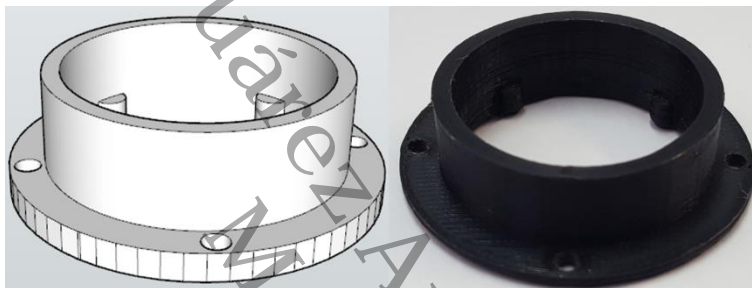
El tubo de cuarzo del CPC debe tener una entrada y una salida para la mezcla de AM con ZnO/CuO, para ello se instaló bridas con base a la norma ASME B16.5, el diseño seleccionado fue Socket weld, debido a que tiene mayor estabilidad al tener dos cordones de soldaduras en el cuello de la brida y un tope de soporte, también sirven para alinear y centrar la tubería; las tuberías con presiones bajas de trabajo, tienen cara FF (Flat Face) y normalmente usan empaques hechos de metal maleable o neopreno, en caso contrario, para presiones altas (600 psi) deben usar caras RJ (Ring Joint) y por ende usan o-ring como empaques.

Las bridas se diseñaron con base a la norma, sin embargo, esas medidas están en relación con la presión de operación de 150 psi, en nuestro reactor tendrá una presión teórica de 10 psi por lo tanto se redujo las dimensiones de los espárragos, espesor y el diámetro de la cara. En la Figura 52 se muestra el diseño en Sketchup y las piezas fueron hechas en una

impresora 3D. El diámetro interno es de 19 mm, con un espesor de 2 mm, el cuello tiene 12 mm de alto y para los espárragos se usó tornillo milimétrico M3. Para comprobar la integridad mecánica de las piezas construidas en la impresora 3D, se realizó una simulación en un software de análisis de esfuerzos en tuberías de la compañía BENTLEY AUTOPIPE.

Figura 52.

Diseño y construcción de la brida



El reactor en su funcionamiento tendrá esfuerzos y fatigas que van a recorrer a lo largo de la tubería y en sus accesorios, estos ejercen puntos de concentración de fuerzas que son capaces de provocar fugas en uniones o juntas de bridas, el estudio ayuda a ubicar y escoger de forma adecuada los soportes en el sistema y proponer cambios en el diseño si el mismo resulta deficiente.

El análisis consta de 3 etapas: flexibilidad, esfuerzo y esfuerzos permisibles. De esta forma el análisis de flexibilidad involucra al análisis de esfuerzos y con una herramienta determinar el grado de flexibilidad del sistema que permiten encontrar la configuración óptima. La herramienta es el programa de análisis de esfuerzos en tuberías de la compañía BENTLEY AUTOPIPE edición 2004, verifica que los esfuerzos estén dentro de los rangos permisibles según la norma ASME B31.3.

Para poder estudiar el comportamiento de los cuerpos sólidos, es necesario establecer modelos matemáticos con el fin de determinar su comportamiento mecánico ante la imposición de cargas (fuerzas, presiones, desplazamientos, entre otras). Para el análisis, la teoría es la elasticidad lineal, aplicada al estudio de las tuberías sujetas a esfuerzos y/o deformaciones con las siguientes restricciones:

- El material se considera isotrópico y homogéneo, requiriéndose para su análisis, las constantes elásticas del módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

- Las deformaciones deberán ser infinitesimales ($\epsilon = \delta/L$).

Para fines del análisis por medio del MEF, se definirá por los siguientes aspectos: geometría, propiedades del material, condiciones de frontera y sistema total de fuerzas aplicadas. Las características del material se muestran en la Tabla 12.

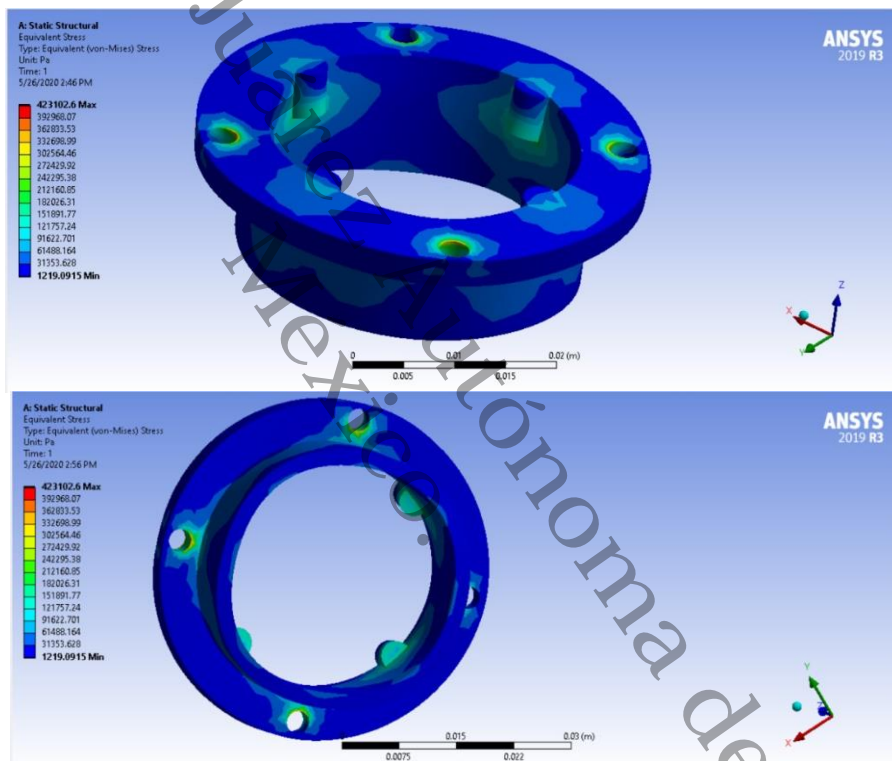
Tabla 12

Propiedades del material empleado para la construcción de la brida.

Propiedades del material	
Densidad	1.25g/cm ³
Módulo de elasticidad (Yong)	3.5 Gpa
Elongación a la rotura	6%
Módulo de flexión	4 Gpa
Resistencia a la flexión	80 Mpa
Temperatura de transición vitrea	60 °C
Temperatura de deflexión de calor (a 455kPa)	65 °C
Comienzo de fusión	160 °C
Módulo de corte	2.4 Gpa
Capacidad calorífica específica	1800 J/kg-K
Relación fuerza-peso	40 kN-m/kg
Resistencia a la tracción (UTS)	50 MPa
Conductividad térmica	0.13 W/m-K

Con base en las propiedades del material y los criterios de condiciones de 20 psi (el doble de la presión teórica del reactor) y un fluido de crudo amargo (este es más denso que el agua que se usará) se obtiene la Figura 53 donde se marca los esfuerzos que se generan en la brida durante la operación. La pieza va a deformarse cuando la presión sea de aproximadamente 30.74 psi, por lo tanto, la pieza soportará los esfuerzos dentro del reactor.

Figura 53. Puntos de esfuerzos de la brida del CPC



Este análisis de esfuerzos permite conocer la confiabilidad del material usado en la impresora 3D. Con la brida instalada en el tubo receptor del CPC se debe conectar al tanque de almacenamiento y la bomba para recircular.

4.10.5 Tubería del CPC

La tubería es el medio de conexión, por donde el ZnO/CuO y el AM van a recircular dentro del CPC. La tubería debe soportar las condiciones internas y externas del CPC y también no debe interferir en el proceso de degradación, para cumplir con dichos requerimientos se adquirió un tubo flexible de silicón de grado alimenticio con las siguientes características:

- Hecho de silicona libre de BPA y plomo, seguro para alimentos.
- Temperatura de trabajo de -50 a 200 °C
- Resistencia a la corrosión, al envejecimiento, resistencia al ácido y disolventes.
- Resistente a los rayos UV, al deterioro al aire libre y tiene una superficie interna lisa para su fácil limpieza.

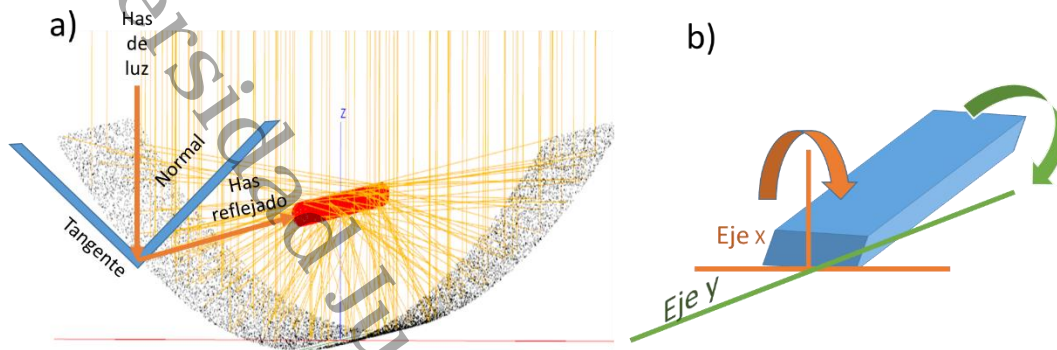
La tubería y las bridas del CPC son adecuadas para realizar las pruebas fotocatalíticas, ahora se requiere que siempre el CPC este perpendicular al sol, por lo tanto se inicia el sistema de seguidor solar.

4.10.6 Control del seguidor solar

La máxima captación de los haces de luz sucede cuando llegan de forma perpendicular al colector solar (Waghmare & Gulhane, 2016b)(Al-Amayreh & Alahmer, 2022) (Figura 54 a), sin embargo, debido a la trayectoria del sol durante el día, se necesita un seguidor solar automático de en el eje x y eje (Figura 54 b).

Figura 54.

Los haces de luz llegan perpendicular a la superficie del colector, b) ejes X y Y del seguidor solar



Los seguidores solares captan 40% más haces de luz con respecto a un sistema estático (Ghassoul, 2021). Los sistemas actuales (sistemas digitales) usan convertidores analógicos a digitales (A/D) para digitalizar la señal analógica de un sensor, la digitalización consiste en particionar la señal analógica y almacenarla, en algunos casos se producen pérdidas de la lectura de la señal y retrasos en el tiempo de respuesta.

La señal digitalizada es analizada en un algoritmo para realizar una acción, la acción pasa por un convertidor digital a analógico (D/A), posiblemente se genera pérdidas de la señal y retardos. Este funcionamiento es el principio de los microcontrolares, microprocesadores y PLC (Das, 2021). En sistemas de control normalmente usan los microcontroladores, servomotores y/o motores de paso. Los cuales están energizados durante el proceso para saber la posición en la que se encuentran (Tutu et al., 2022).

La solución a la pérdida de lectura del sensor, al retardo de tiempo de respuesta y al energizado constante de los servomotores y/o motores de paso, es la electrónica analógica, debido que no necesita convertidores A/D y D/A, tampoco necesita ingresar a un algoritmo para

realizar una acción bajo ciertas condiciones, debido a que usa un amplificador (circuito integrado) dedicado a una acción, por último, este sistema comúnmente sustituye a los servomotores y/o motores de paso por motorreductores.

Este trabajo se diseñó un sistema con la confiabilidad de la señal y bajo consumo eléctrico. En la Tabla 13 se aprecia el de consumo eléctrico de un sistema digital y el sistema analógico. El sistema analógico consumió un 23% de la potencia usada por un sistema digital, por lo tanto, consideró usar la electrónica analógica por su bajo consumo de potencia eléctrica y la confiabilidad de las señales.

Tabla 13

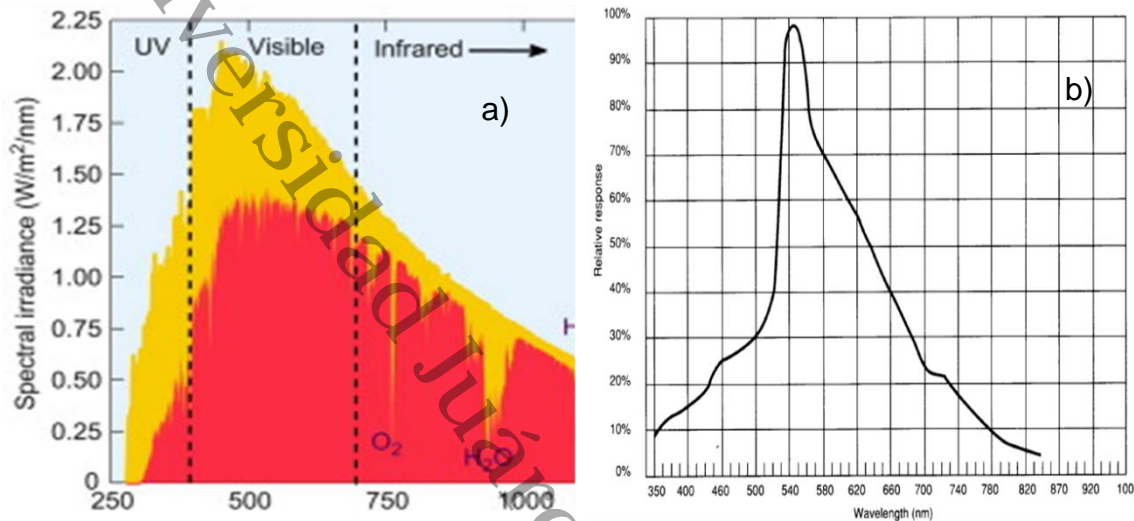
Comparativo de consumo eléctrico entre un sistema digital y uno analógico.

Descripción	Sistema digital			Descripción	Sistema analógico		
	Voltaje (V)	Corriente (I)	Potencia (W)		Voltaje (V)	Corriente (I)	Potencia (W)
LDR	5	0.002	0.01	LDR	5	0.002	0.01
Microcontrolador	5	0.05	0.25	Amplificador	5	0.002	0.01
Driver y motor a pasos	12	1.4	16.8	Motorreductor	10	0.4	4
Potenciometro	5	0.002	0.01	Potenciometro	5	0.002	0.01
		Total	17.07			Total	4.03

El set point, fue construido por fotorresistencia (LRD), que detectan la intensidad (10 a 1000 lux) de la luz solar, en la literatura se ha usado los LDR como sensores para el tracking (Awasthi et al., 2020)(Munanga et al., 2020)(Ghassoul, 2021), los LDR son elementos sensible a la intensidad de luz visible del sol, en la Figura 55 se muestra el rango de sensibilidad del LDR y las longitudes de onda que emite el sol. El valor de la resistencia de los LDR cambia proporcional a la intensidad de la luz visible; por lo tanto, son usados como sensores de luz.

Figura 55.

a) Longitudes de onda en el espectro visible emitidas por el sol y b) respuesta del LRD a la luz



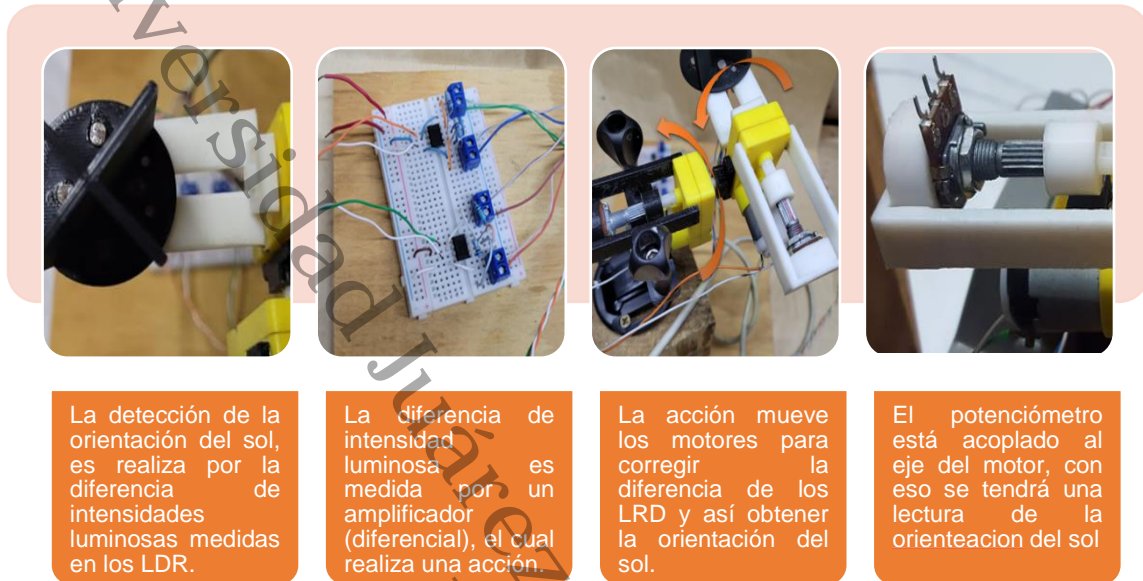
Nota: Tomado de a) (L. Wang & Yu, 2023), b) (Datasheet LDR)

En la Figura 56 se muestran los componentes usados para el set point, este circuito permite detectar los cambios de la trayectoria del sol sin retardo u error de medición, caso contrario a lo que sucede en una tarjeta de adquisición de datos digital. Sin embargo, el circuito no mide la orientación del sol, por lo tanto, se necesita acoplar un elemento que indique la orientación del sol.

El potenciómetro, es un dispositivo que cambia el valor de la resistencia en proporción al giro del vástago que tiene, su rango de operación es de 0° a 290°, por lo tanto, este elemento se acopló al set point para medir el cambio de su resistencia en proporción al giro del set point, de esa forma se indicó la posición del sol y fue el elemento final para completar el circuito tracking.

Figura 56.

Set point del sistema de control de seguimiento solar



El sistema de control del seguidor solar será de lazo cerrado, por lo tanto, se necesitan los sensores que van a retroalimentar una señal del sistema, para este caso en el eje del motorreductor se acopló un potenciómetro que fungirá como sensor, el mecanismo del seguidor solar genera una torsión al potenciómetro, modificando así el valor de su resistencia y con ello determina la orientación del sol, esta sección del sistema de control se muestra en la Figura 57.

Figura 57.

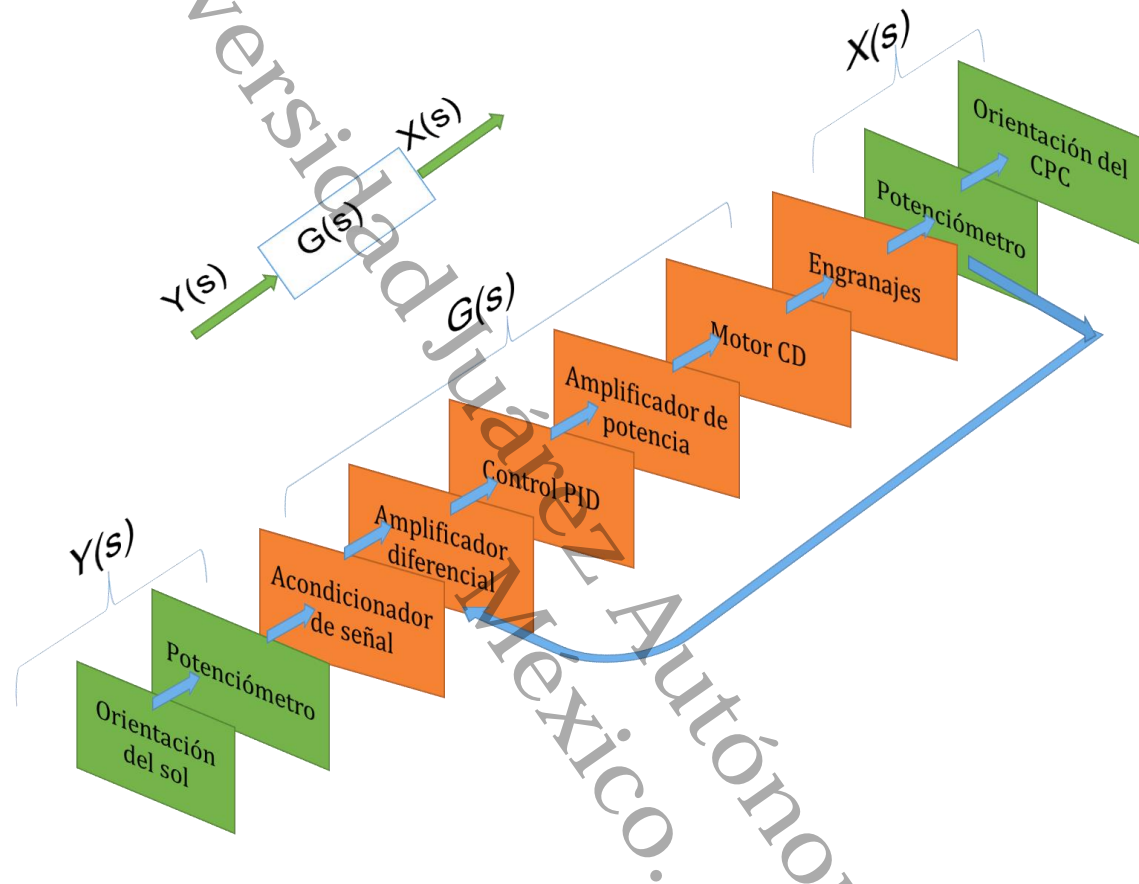
Retroalimentación del sistema de control del seguidor solar



El control del sistema de describe en la Figura 58, se muestra la ganancia, representada por $G(s)$, la entrada del sistema es $Y(s)$ y la salida del sistema es $X(s)$, tanto $Y(s)$ y $X(s)$ describen el comportamiento del sistema y su relación es $G(s)$. También en la Figura 58 se muestra cada elemento de todo el sistema de control del seguidor solar.

Figura 58.

Sistema de control para el seguidor solar en el CPC

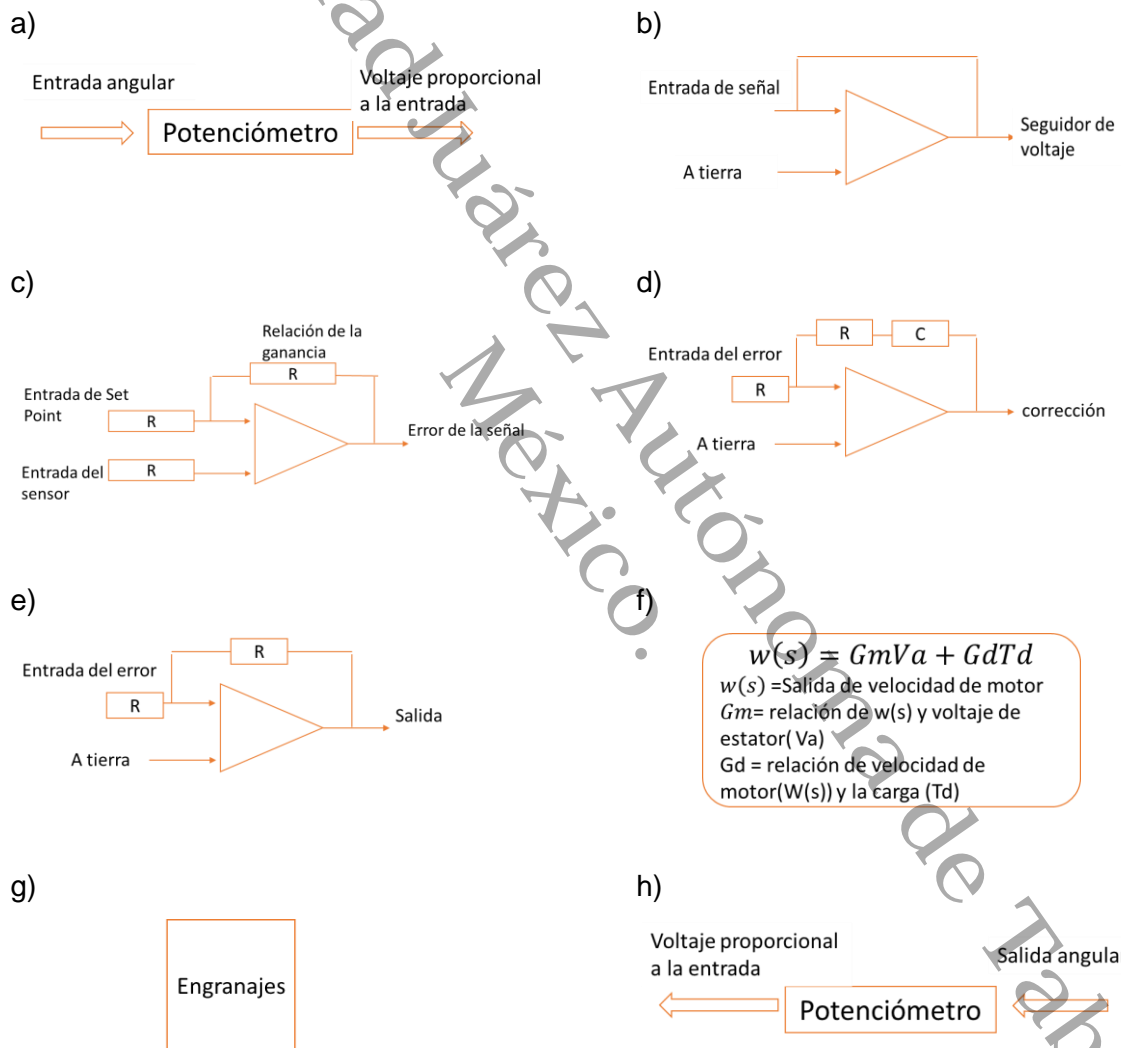


La cada equivalencia del sistema de control se describe en la Figura 59. La sección inicial es el potenciómetro, es decir el set point ingresa un voltaje proporcional a la orientación del sol (Figura 59 a), después esta señal se condiciona para mejorar la confiabilidad de la respuesta del potenciómetro (Figura 59 b), después de ello la señal de retorno del sistema, se compara con la señal de set point por medio de un amplificador de ganancia unitaria (Figura 59 c), su producto es el error del sistema, que alimenta al controlador PID para ser ajustado (Figura 59 d), la señal resultante es muy pequeña, por lo tanto se amplifica su potencia (Figura 59 e), esa potencia es necesaria para hacer girar el motor en un sentido u otro dependiendo el error del sistema (Figura 59 f), el motor tiene que mover la carga del CPC, entre el motor y la

carga hay un sistema de engranaje (Figura 59 g) y por último, el eje de orientación del CPC esta acoplado al sensor, que es un potenciómetro y su señal retorno del sistema (Figura 59 h).

Figura 59.

Elementos de procesos que forman parte del sistema de control del seguidor solar



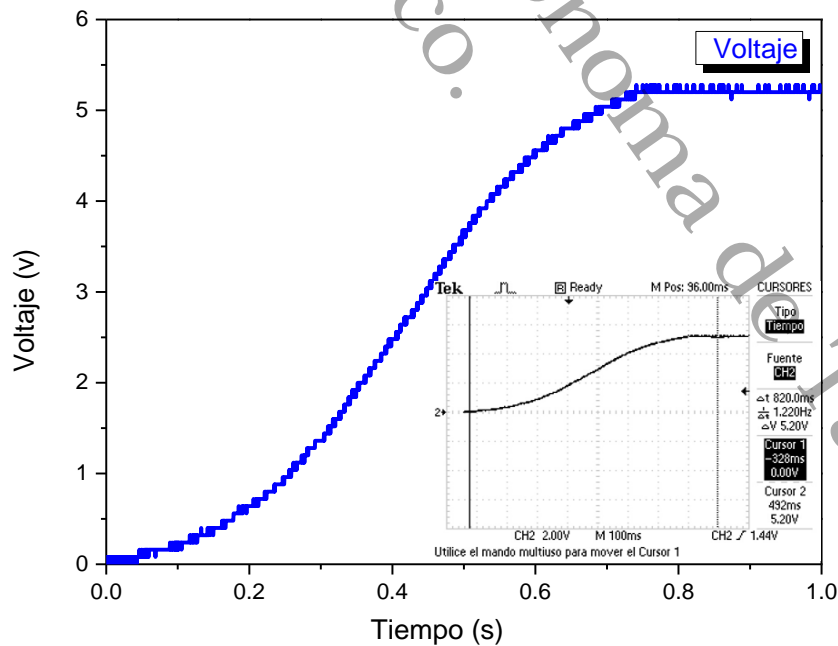
En todo este sistema hay más factores pequeños capaces de alterar el sistema de control, como la resistencia mecánica de los potenciómetros (set point y sensor), tensión de la

banda de transmisión, las resistencias que cambia su valor debido al calor del ambiente y/o de la corriente que fluye por cada elemento, etc. Por lo tanto, para que la función de transferencia represente lo más preciso al sistema de control físico, se debe considerar la gran mayoría de los factores principales y los mínimos.

Un método que considera todos los factores del sistema es la caracterización experimental de todos los elementos funcionado en conjunto, este método consiste activar el set point a una posición arbitraria, luego se mide el voltaje y el tiempo que requiere el CPC hasta llegar a la posición del set point, para esta medición se requirió el uso de un osciloscopio Tektronix modelo 1012B y el resultado se muestra en la Figura 60, y en su inserto se aprecia la configuración del osciloscopio.

Figura 60.

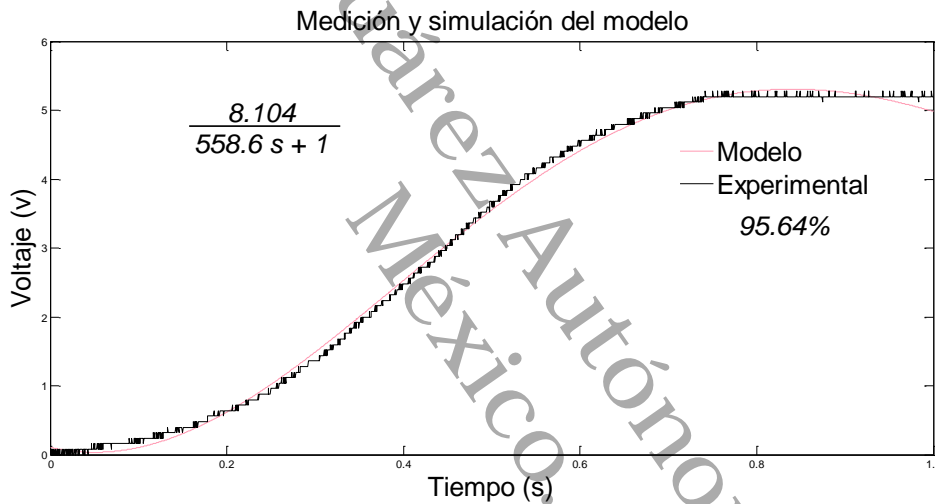
Respuesta del voltaje del potenciómetro al momento de girar el CPC



Los datos obtenidos fueron analizados con la curva de reacción de procesos método de Ziegler Nichols (Shetty & Prabhu, 2017) y estos fueron ingresados al módulo "ident" del Matlab. En la Figura 61 se visualiza el estimado del modelo matemático, el cual tiene una aproximación del 95.64% a la medición.

Figura 61.

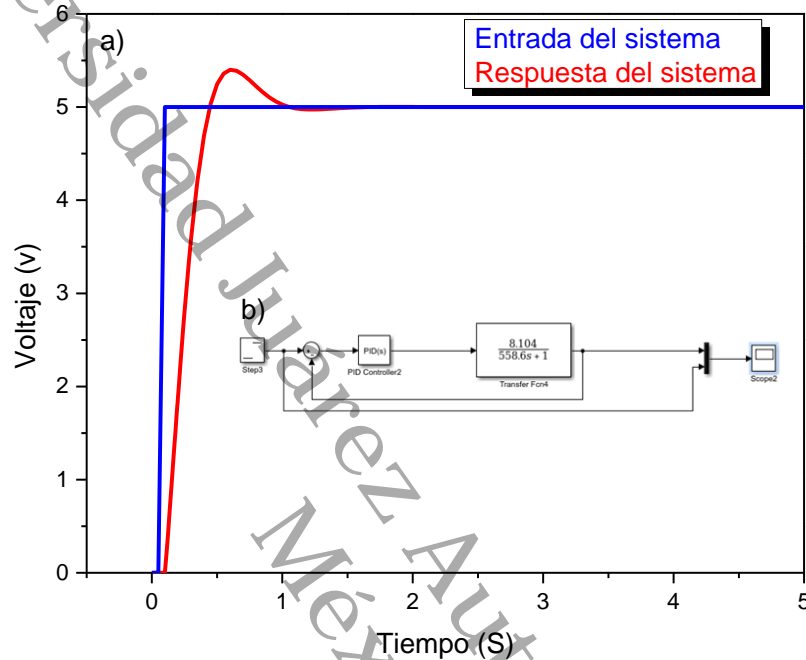
Función de transferencia con un 95.64% de aproximación con el respecto a la medición experimental



En simulink de Matlab se construyó un diagrama de bloque como se muestra en la Figura 62 b), donde se ingresó la función de transferencia y el resultado del comportamiento del sistema de control se presenta en la Figura 62 a).

Figura 62.

a) Simulación de la respuesta del modelo matemático y b) diagrama a bloques hechas en Simulink



Como se comentó al inicio, para el sistema de control se consideró usar un sistema analógico, este utiliza amplificadores operaciones, por lo tanto, se uso el modo de control de dos tiempos, los controladores electrónicos se rigen por los controles proporcional, derivativo e integral, que son K_p , K_i y K_d respectivamente.

Los datos de K_p , K_i y K_d fueron obtenidos por las Ecuaciones 37 al 39, para seleccionar los valores de resistencia y capacitancia (Patel & Kumar, 2015), se consideró un parámetro inicial de una capacitancia para C_I de $220 \mu\text{F}$ y con base en ello se determinó la resistencia, en la Tabla 14 se muestran los resultados del sistema de control del seguidor solar.

$$Kp = \frac{RI}{R+RD} \quad (37)$$

$$Kd = RD * CD \quad (38)$$

$$Ki = \frac{1}{RI*CI} \quad (39)$$

Tabla 14

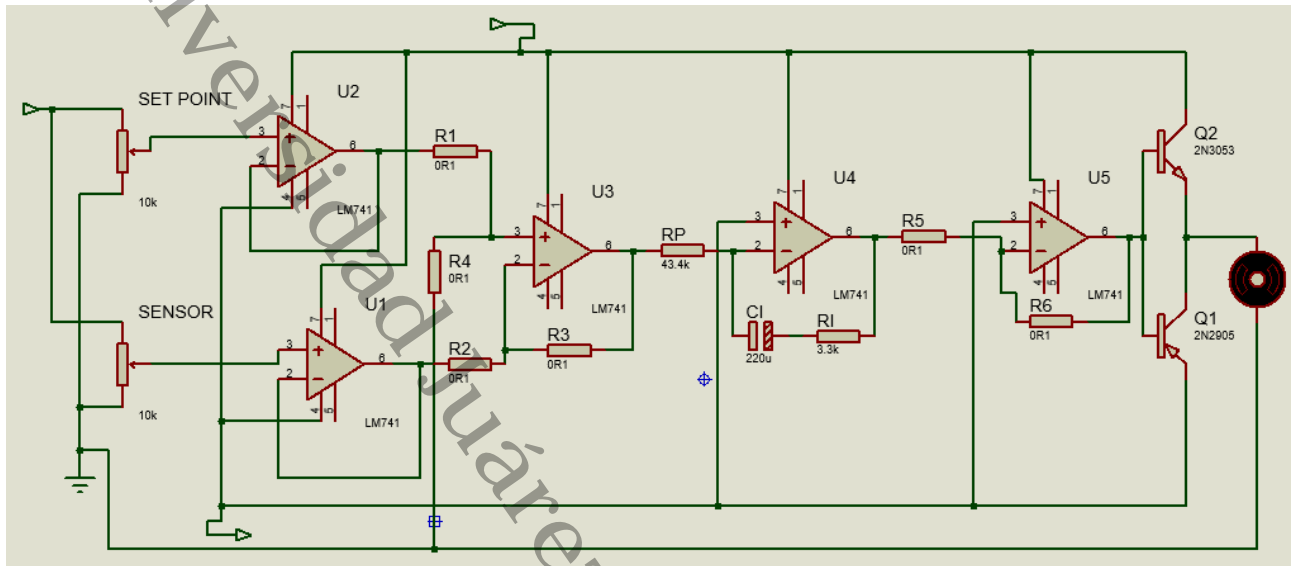
Valores de los elementos del control del seguidor solar.

Kp	0.485	µf
Ki	1.116	µf
Kd	0	µf
Kp	0.485	µf
RI	4,073	Ω
RD		
RP	8,398	Ω
KI	1.116	µf
CI	220	µf
RI	4,073	Ω

En la Figura 63 se presenta el diagrama final del sistema de control analógico.

Figura 63.

Diagrama final del sistema de control del seguidor solar

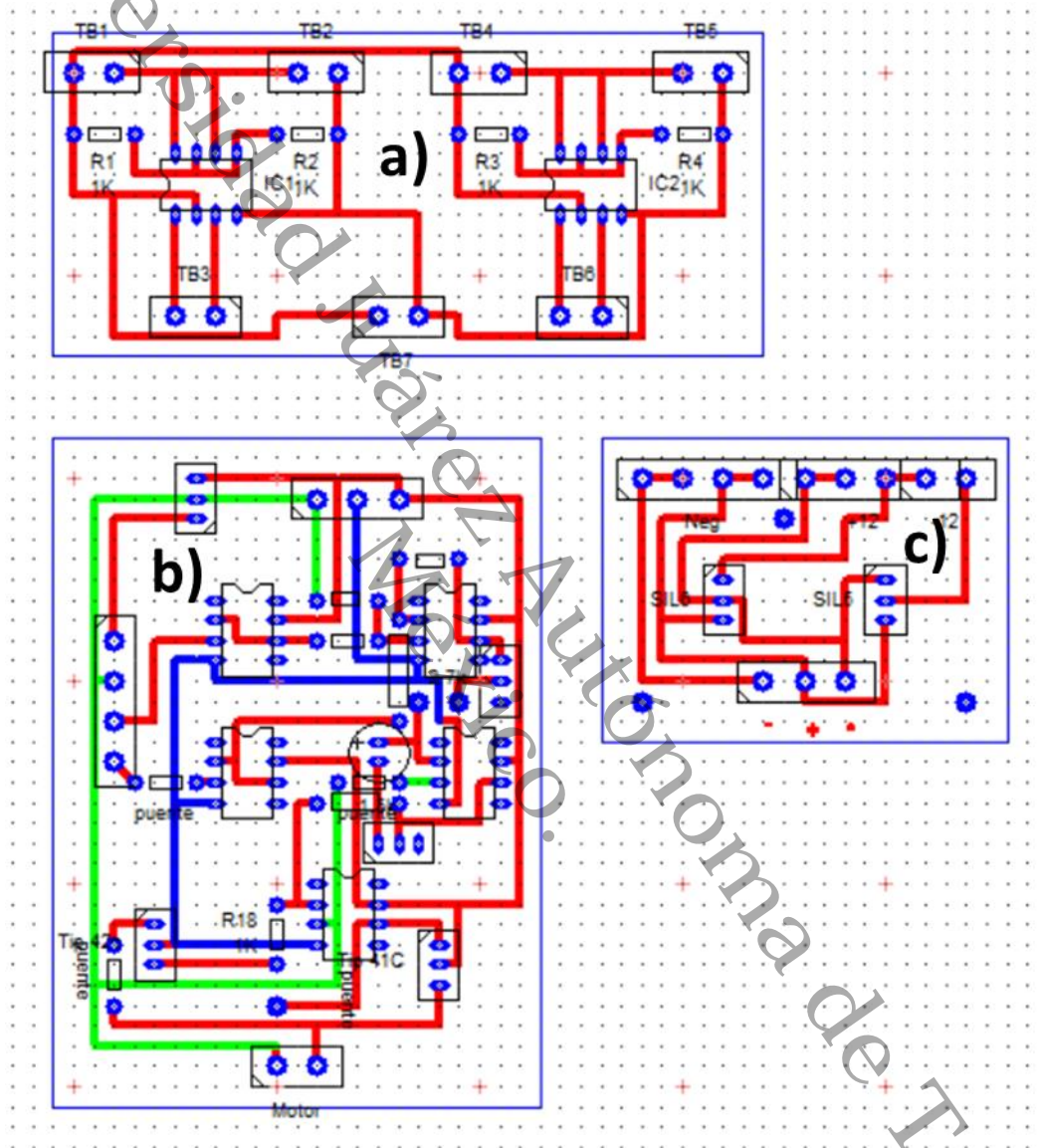


La construcción del sistema de control debe de tener la confiabilidad para su correcto funcionamiento, por lo tanto, se decidió construir las tarjetas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en ingles). Se usó el control numérico computarizado (CNC) (Sathyakumar et al., 2018) para la fabricación de la PCB que no contamina durante su fabricación.

En la Figura 64 se muestra el diseño esquemático del PCB, el cual fue realizado en un software en su versión libre para estudiante, llamado PCB Wizard.

Figura 64.

a) Diseño PCB del set point, b) PCB del control del seguidor solar y c) PCB de conectores de alimentación eléctrica (+3.3V, +5V, +12V, -12V y GND)

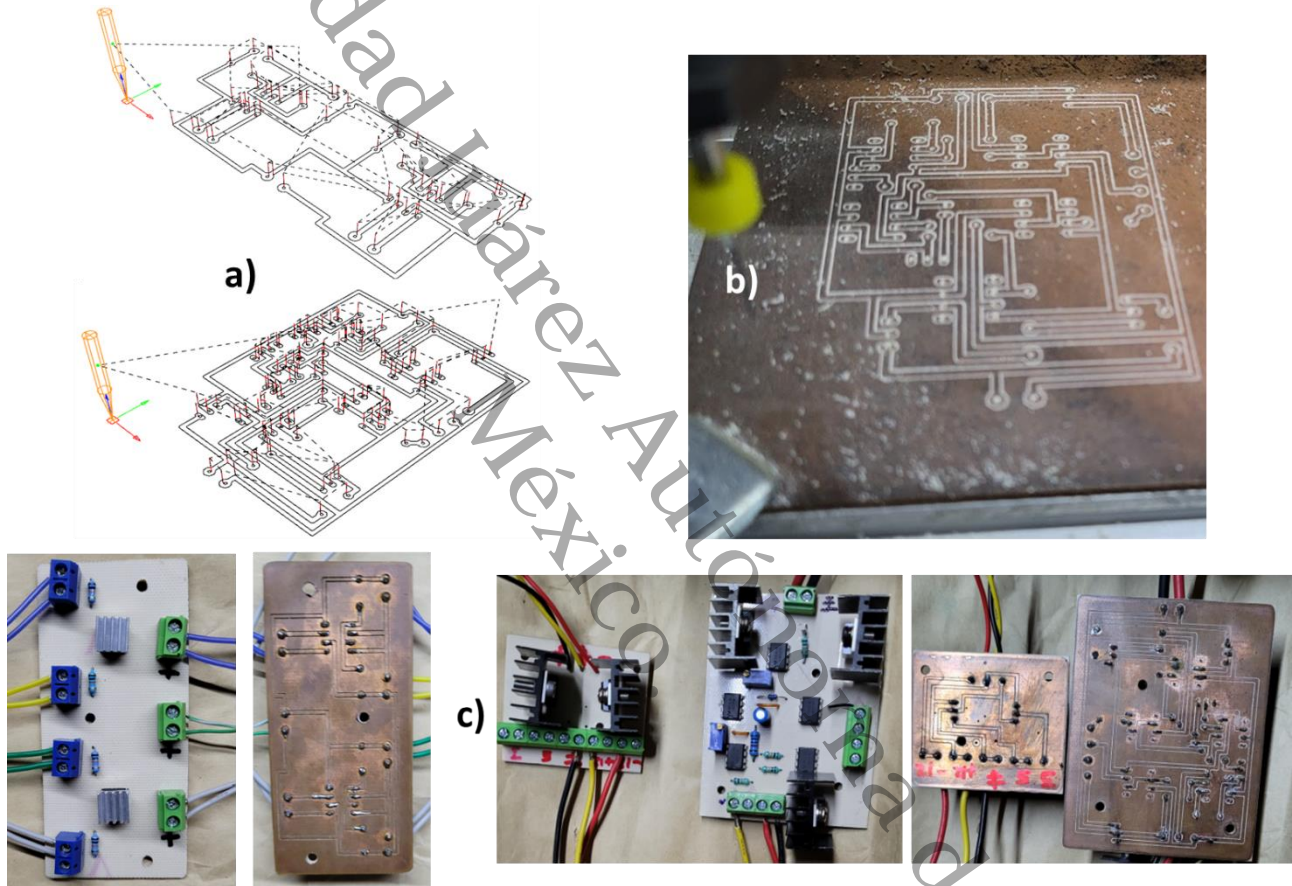


El diseño del PCB debe ser guardado en formato imagen (JPG, JPEG O BMP), luego el software Aspire digitaliza el diseño y se genera un código G (Figura 65 a), luego el código G es enviado al CNC. En la Figura 65 b) se muestra el maquinado de la baquelita usando el CNC y

por último en la Figura 65 c se visualiza los PCB con los elementos soldados, todo en conjunto son el control del seguidor solar del CPC.

Figura 65.

a) Código G de la PCB wizard, b) Maquinado de la baquelita con un CNC usando código G y c) resultado final de las PBC usada en el sistema de control del seguidor solar



4.10.7 Instrumentación del CPC

El prototipo en su interior tiene la instrumentación electrónica para medir CO_2 de la degradación del contaminante modelo. El sensor usado para medir CO_2 es el modelo MQ135 de la marca Hanwell Electronics, el cual tiene un consumo eléctrico de menos de 800 mW, con una alimentación de 5 V y con un rango de 10 ppm a 1000 ppm, sus cualidades en la que

destacan el sensor son: la rápida y sensible respuesta, estabilidad y de larga duración y es usado en equipos de calidad de aire (ELECTRONICS, n.d.).

Los datos del sensor MQ135 serán leídos por una tarjeta ESP32, en la Figura 66 se muestra el código usado para leer los datos del sensor. En el bloque (a) del código se declaran las librerías, las condiciones del pin de entrada y la variable globales del CO₂, en el bloque (b) se usa una función que apunta a la librería del sensor, también se establece la ecuación que rige la adquisición del CO₂ (con base a la gráfica del fabricante $y = 110.47x^{-2.862}$) y se inicializa el sensor.

En el bloque (c) se calibra el sensor, luego en el bloque (d) se verifica las condiciones de conexión para la seguridad del sensor y por último en el bloque (e) se manda a llamar los datos de la concentración de CO₂ y se envía a la pantalla serial para ser visualizado.

Figura 66.

Código de lectura de un sensor MQ135

```
#include <MQUnifiedSensor.h>
#define placa "ESP-32"
#define Voltage_Resolution 5
#define pin 32
#define type "MQ-135"
#define ADC_Bit_Resolution 12
#define RatioMQ135CleanAir 3.6
double CO2 = (0);
MQUnifiedSensor MQ135(placa, Voltage_Resolution, ADC_Bit_Resolution, pin, type);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  MQ135.setRegressionMethod(1);
  MQ135.setA(110.47);
  MQ135.setB(-2.862);
  MQ135.init();
  Serial.print("Calibrando");
  float calcR0 = 0;
  for(int i = 1; i<=10; i++) {
    MQ135.update();
    calcR0 += MQ135.calibrate(RatioMQ135CleanAir);
    Serial.print(".");
  }
  MQ135.setR0(calcR0/10);
  Serial.println("Calibrado");
  if(isinf(calcR0)) { Serial.println("Circuito abierto, verifique la alimentación eléctrica"); while(1);}
  if(calcR0 == 0){Serial.println("Posible corto circuito"); while(1);}
  MQ135.serialDebug(false);
}
void loop() {
  MQ135.update();
  CO2 = MQ135.readSensor();
  Serial.print("CO2: ");
  Serial.println(CO2);
  delay(1000);
}
```

a

b

c

d

e

La instrumentación electrónica continua con la medición del temperatura y flujo de agua. en la Tabla 6 se muestra la descripción de dichos sensores.

En la Figura 67 se muestra el código de programación de los sensores de temperatura y flujo de agua, en la sección (a) muestra las librerías de comunicación de los sensores y la asignación de los pines de entrada del sensor DS18B20 y YF-S201B, también la declaración de las variables. La sección (b) manda a llamar una función establecida del sensor de flujo de agua y cuenta los pulsos generados por el paso del agua dentro del sensor, después la

velocidad de comunicación en baudios del ESP32 y los valores iniciales de las variables. La sección (c) es el ciclo infinito, donde se manda a llamar los datos de lectura del sensor de temperatura, después las variables son asignadas en valores milis, debido a la forma en el cual el dispositivo censa el flujo de agua, después se ajusta los valores para ser mostrados en mL/min y un contador total, por último, datos de temperatura y flujo de agua son enviado para ser visualizados y almacenado.

Figura 67.

Código de lectura para los sensores de temperatura y flujo de agua

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define DS18B20 14
#define SENSOR 27
OneWire oneWire(DS18B20);
DallasTemperature Sensor(&oneWire);
float temp;
long actualMillis = 0;
long pasadoMillis = 0;
int intervalo = 1000;
float factorcali = 4.5;
volatile byte cuentapulso;
byte pulsoiseg = 0;
float relaflujo;
unsigned int flujomL;
unsigned long totalmL;

void IRAM_ATTR pulseCounter()
{
  cuentapulso++;
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Sensor.begin();
  pinMode(SENSOR, INPUT_PULLUP);
  cuentapulso = 0;
  relaflujo = 0.0;
  flujomL = 0;
  totalmL = 0;
  pasadoMillis = 0;
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR), pulseCounter, FALLING);
}
```

```

void loop()
{
  Sensor.requestTemperatures();
  temp = Sensor.getTempCByIndex(0);

  actualMillis = millis();
  if (actualMillis - pasadoMillis > intervalo) {
    pulso1seg = cuentapulso;
    cuentapulso = 0;
    relaflujo = ((1000.0 / (millis() - pasadoMillis)) * pulso1seg) / factorcali;
    pasadoMillis = millis();
    flujomL = (relaflujo / 60) * 1000;
    totalmL += flujomL;
    Serial.print("DATA,TIME, ");
    Serial.print(temp);
    Serial.print("°C, ");
    Serial.print(relaflujo);
    Serial.print("L/min, ");
    Serial.print("\t");
    Serial.print(totalmL / 1000);
    Serial.println("L");
  }
}

```

C

Los datos de los sensores serán usados para las pruebas del diseño de experimento, con ello se determinará los niveles y factores óptimos para obtener la máxima degradación.

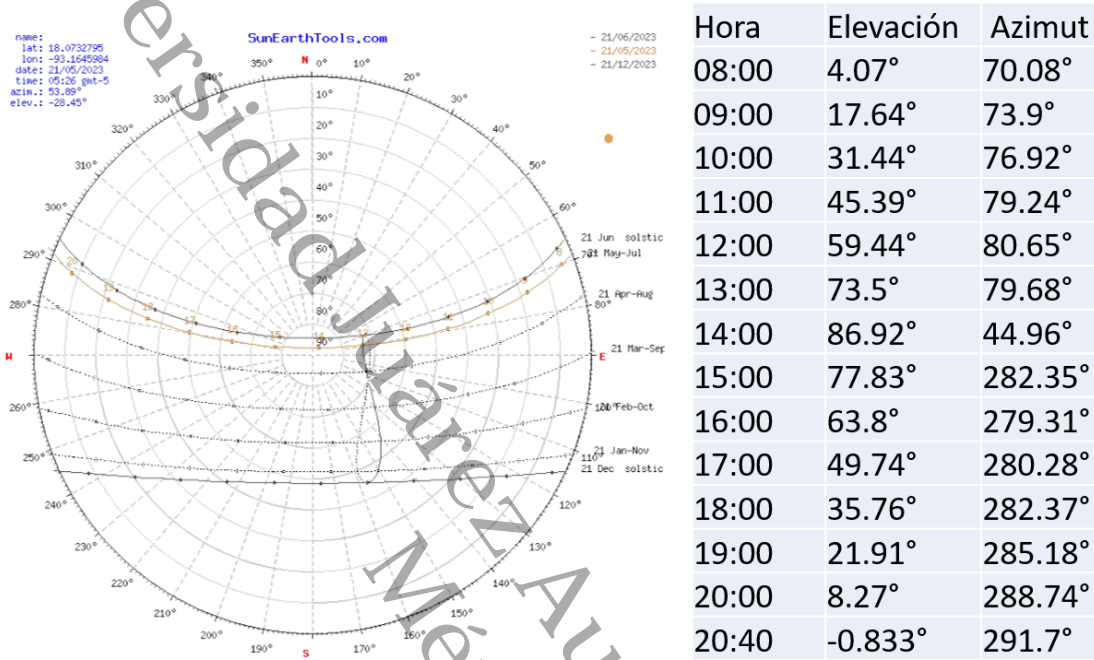
4.10.8 Prueba de operación del CPC

La correcta orientación del CPC es cuando se encuentra de forma perpendicular a los rayos del sol, eso permite captar su máxima capacidad de los haces de luz del sol y con ello se mejora la degradación del contaminante.

En la Figura 68 se aprecia la gráfica solar con la elevación y la dirección de la trayectoria de los rayos del sol (azimut), esta grafica solar fue generada para la ubicación del CPC a un costado del edificio de electrónica (18° 4' 23.806" N, 93° 9' 52.554" W).

Figura 68.

Grafica solar construida en SunEarthTool.com para a la ubicación 18° 4' 23.806" N, 93° 9' 52.554" W y datos de elevación y azimut por hora



Nota: Tomado de la Pág. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

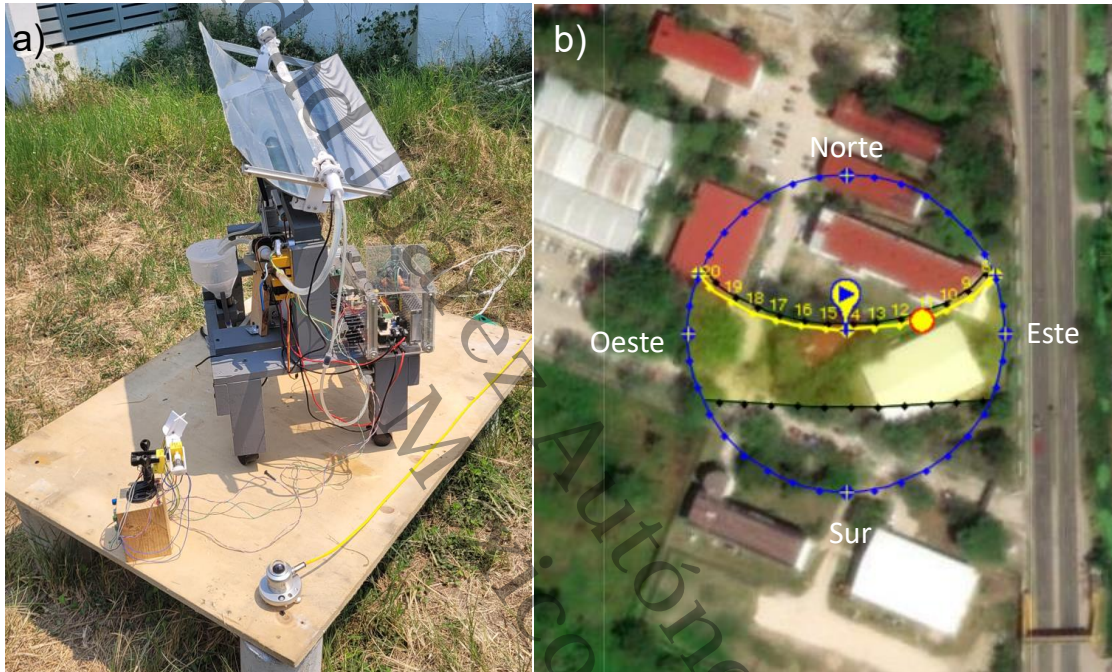
En la Figura 69 a) se muestra el CPC a un costado del edificio de eléctrica y electrónica, en ese espacio no se generan sombras de los edificios y árboles, durante el horario de 8 am a 6 pm y en la Figura b) se muestra una vista aérea de la ubicación del CPC y la trayectoria del sol. La última Figura permitió determinar la oposición del CPC, el resultado fue colocarlo de norte a sur y con el seguidor solar desarrollado se podrá mover de este a oeste y alcanzando la elevación adecuada podrán hacer que el CPC que los rayos del sol lleguen perpendicular en un horario de 8 am a 6 pm.

El CPC se puso en operación con velocidad de flujo de 1 L/ min y a 4 L/min, junto con el control de seguidor solar, en estas pruebas de recirculación del líquido no hubo fugas, por lo.

tanto, se procedió a iniciar pruebas de degradación en el CPC, tal como se señala en el diseño de experimento.

Figura 69.

a) CPC situado de este a oeste, con base b) en la trayectoria del sol



4.10.9 Optimización del CPC (DE)

Las pruebas operación del CPC fueron satisfactorias, por lo tanto, se inició con las pruebas de degradación. El diseño de experimento es factorial, orientado a optimización, por ellos en las pruebas de degradación se usaron todas las combinaciones posibles de los factores y sus niveles, con el fin de determinar cuál variable impacta más con respecto a las otras en la degradación del contaminante, en la Tabla 15, se describe las condiciones de operación de cada prueba con base en la Tabla 5.

Tabla 15

Pruebas aleatorias para la degradación del contaminante dentro del CPC.

Día	Horario	Flujo L/min
10-7-23	10 h a 14 h	1
11-7-23	12 h a 16 h	4
12-7-23	10 h a 12 h	4
13-7-23	12 h a 16 h	1
14-7-23	10 h a 14 h	1
18-7-23	12 h a 16 h	4
19-7-23	10 h a 12 h	4
20-7-23	12 h a 16 h	1

Los datos obtenidos en las pruebas del CPC se clasificaron en orden de a) irradiancia, b) temperatura, c) flujo y d) degradación, estas se presentan en la Figura 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, cada Figura representa un día.

Figura 70.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 10-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 1L/min.

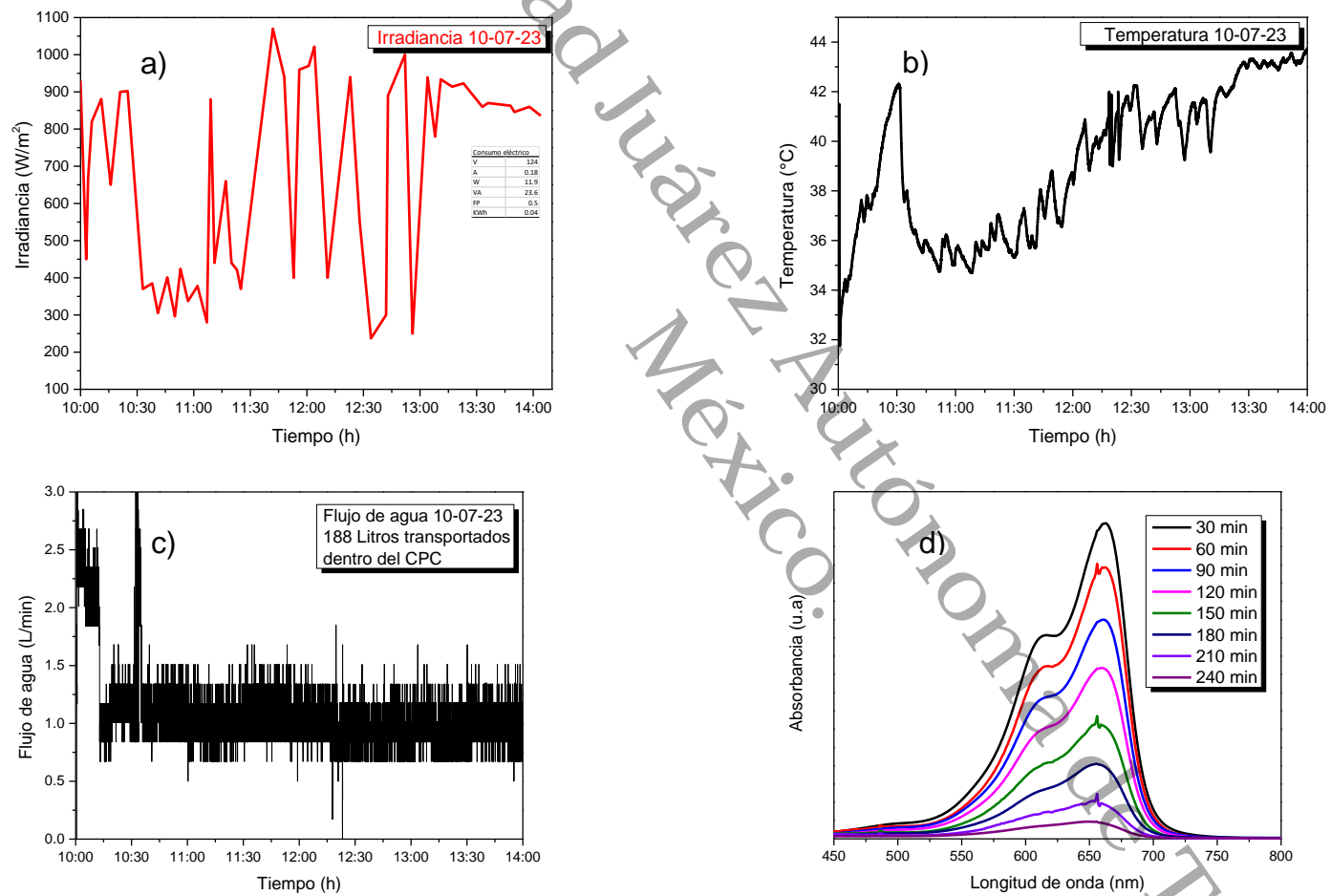


Figura 71.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 11-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 4L/min

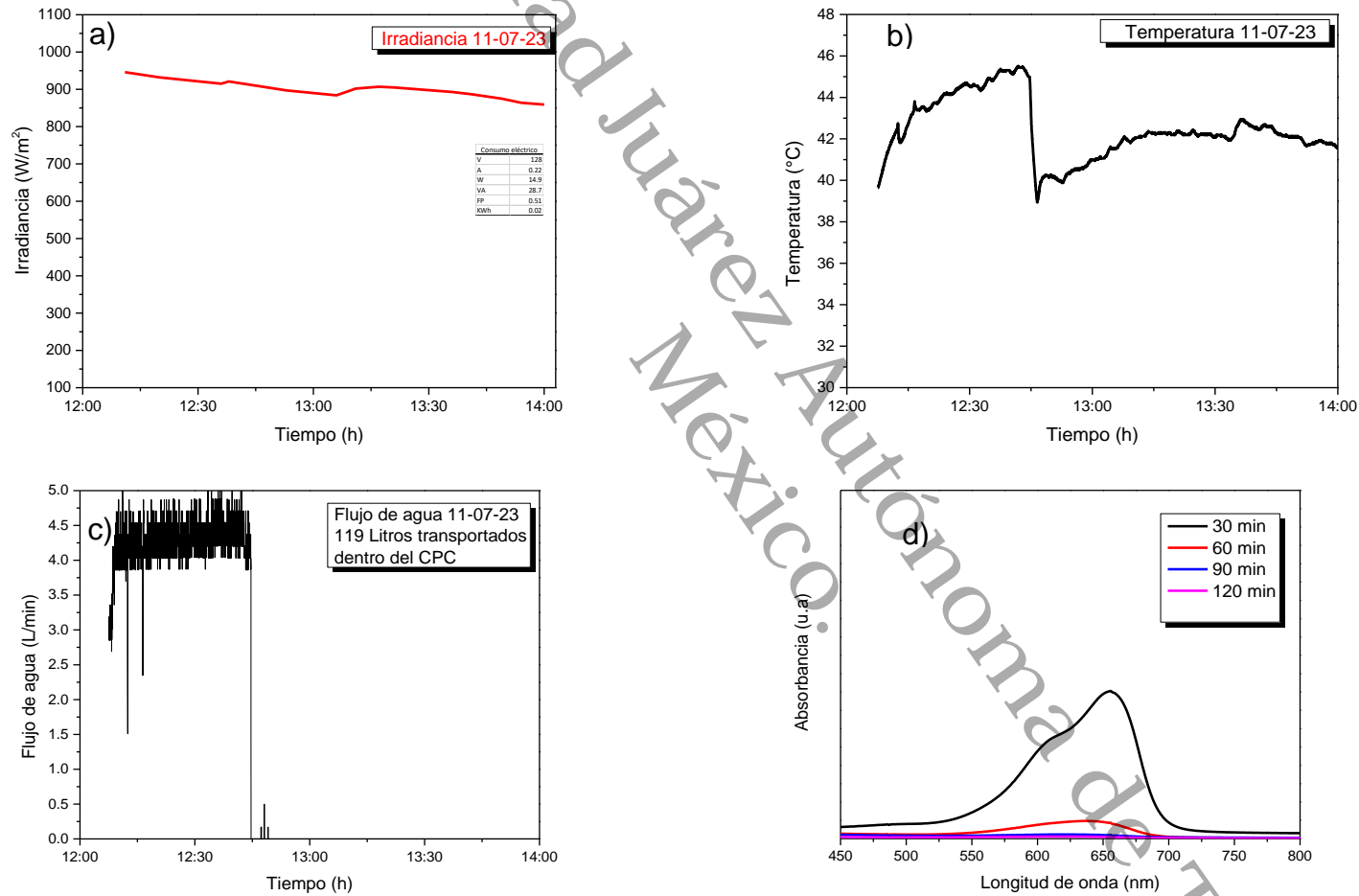


Figura 72.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 12-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 4L/min

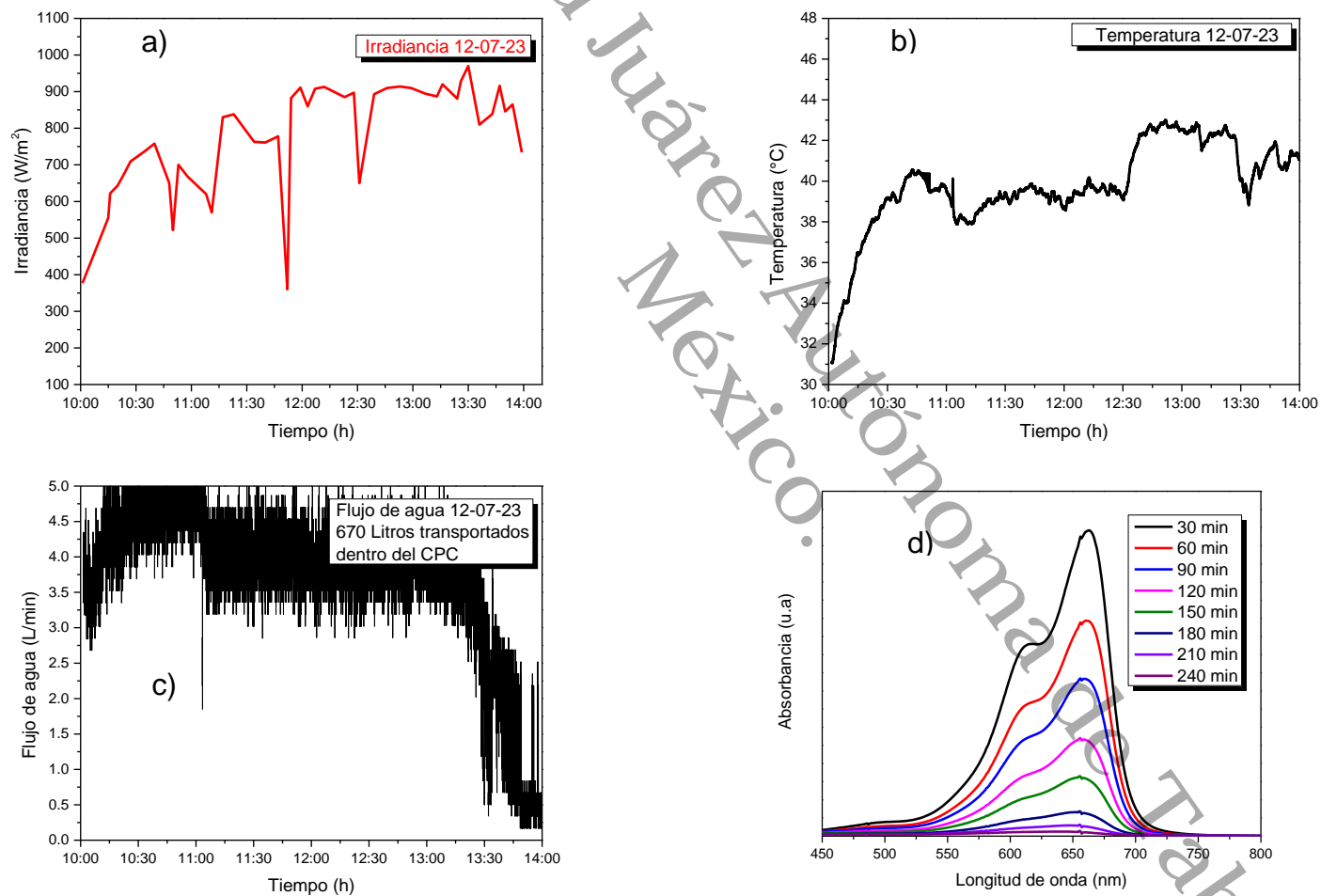


Figura 73.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 13-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 1L/min

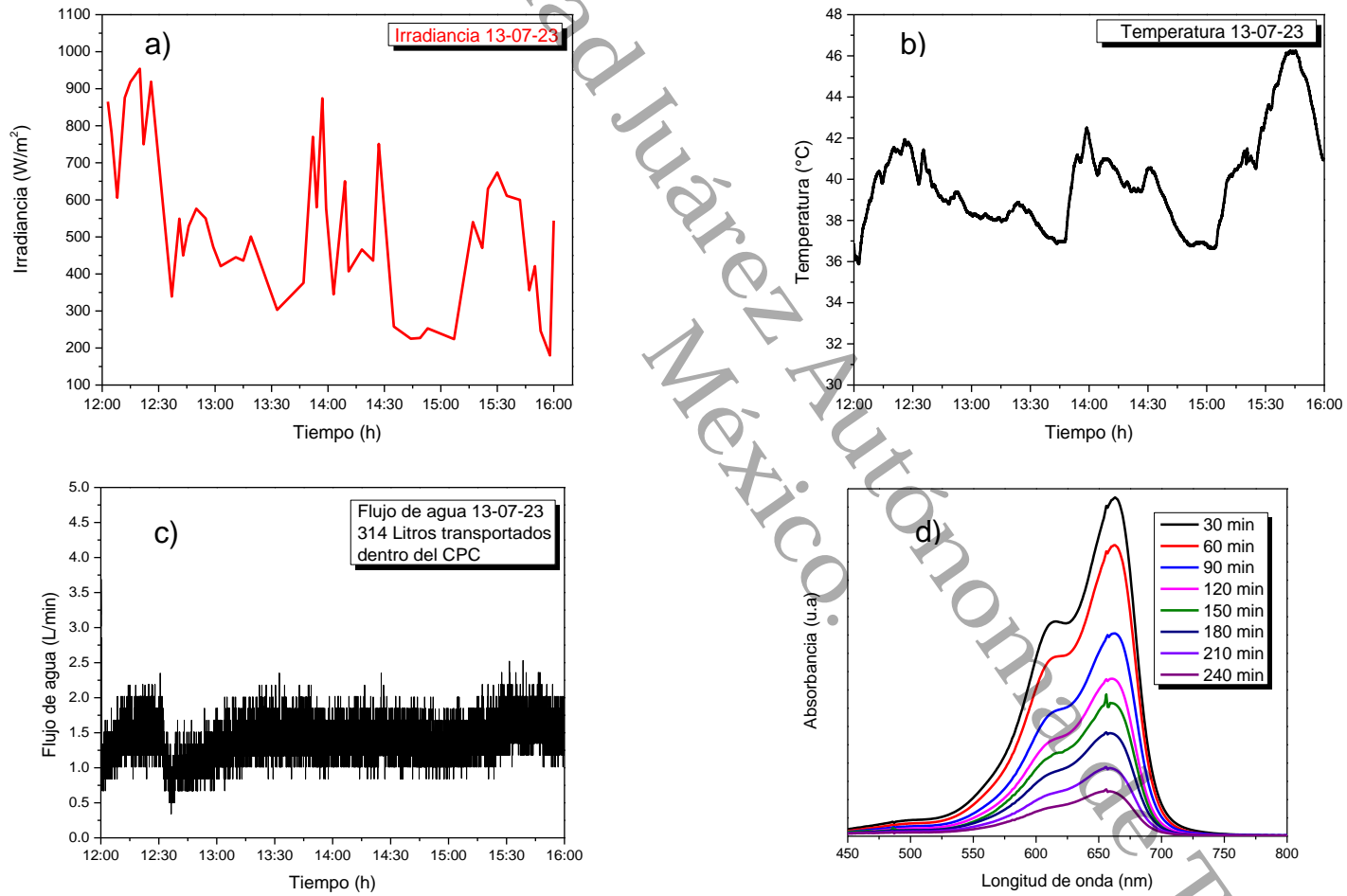


Figura 74.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 14-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 1L/min

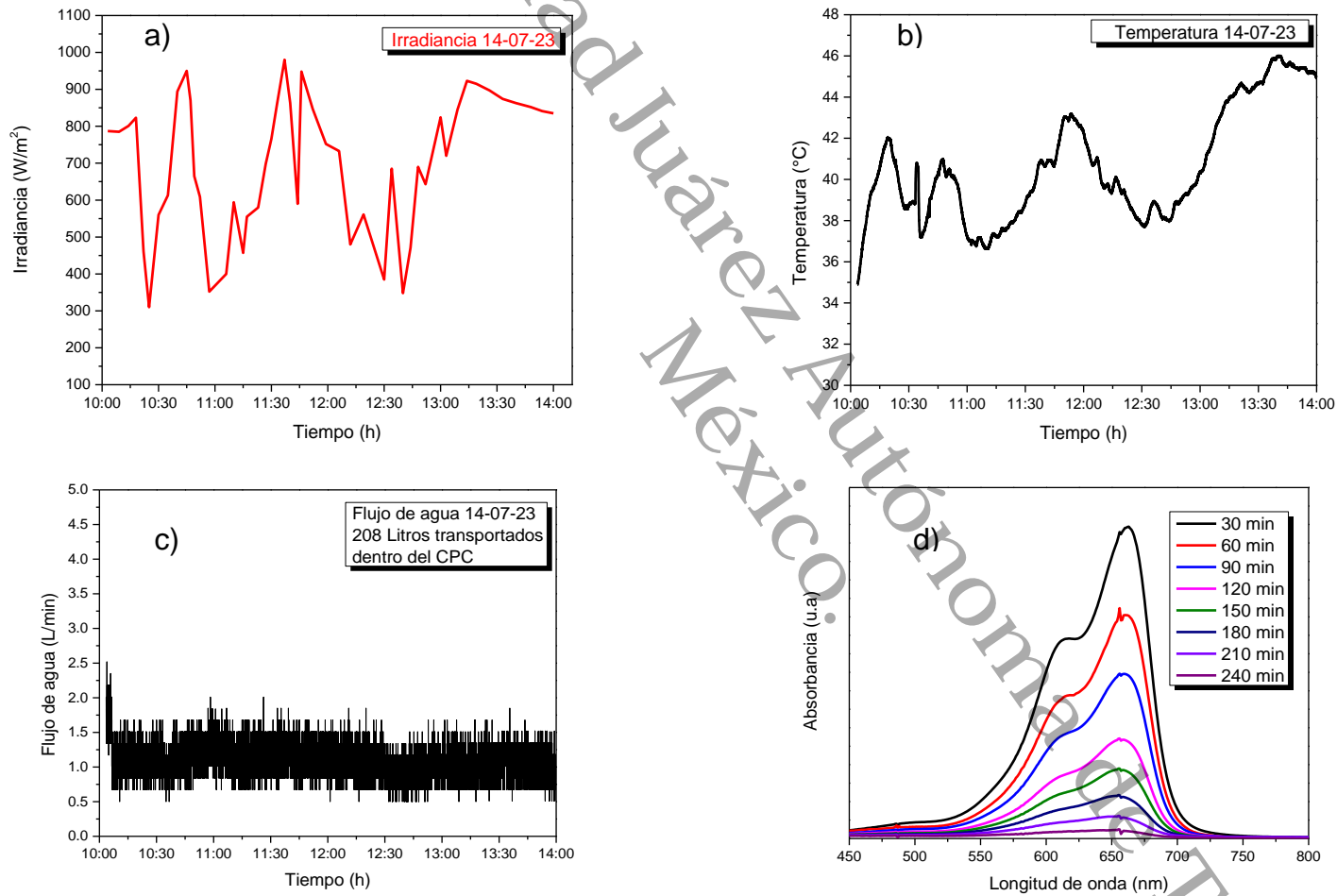


Figura 75.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 18-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 4L/min

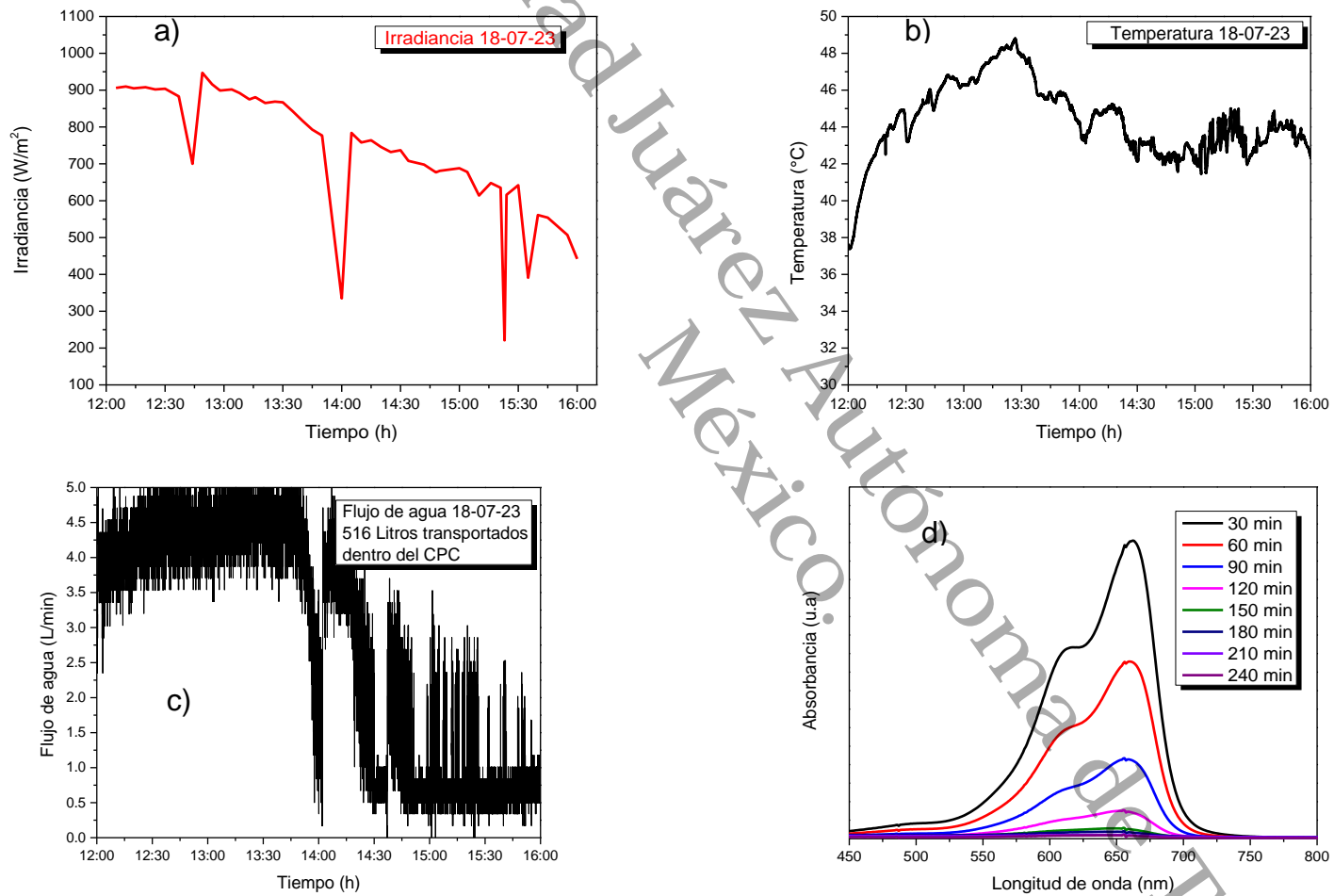


Figura 76.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 19-07-23, con los niveles de 10 h a 14 h por 4L/min

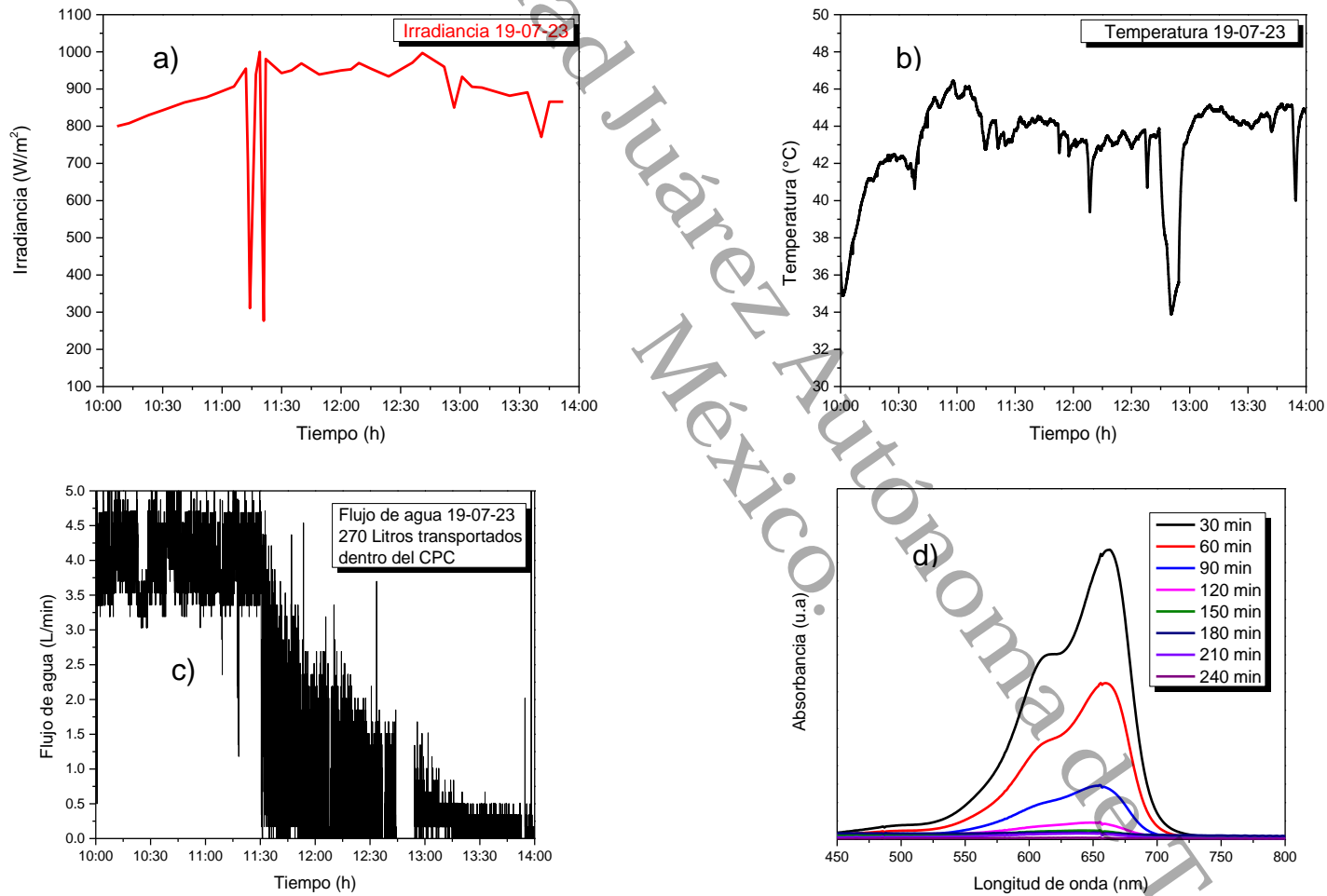
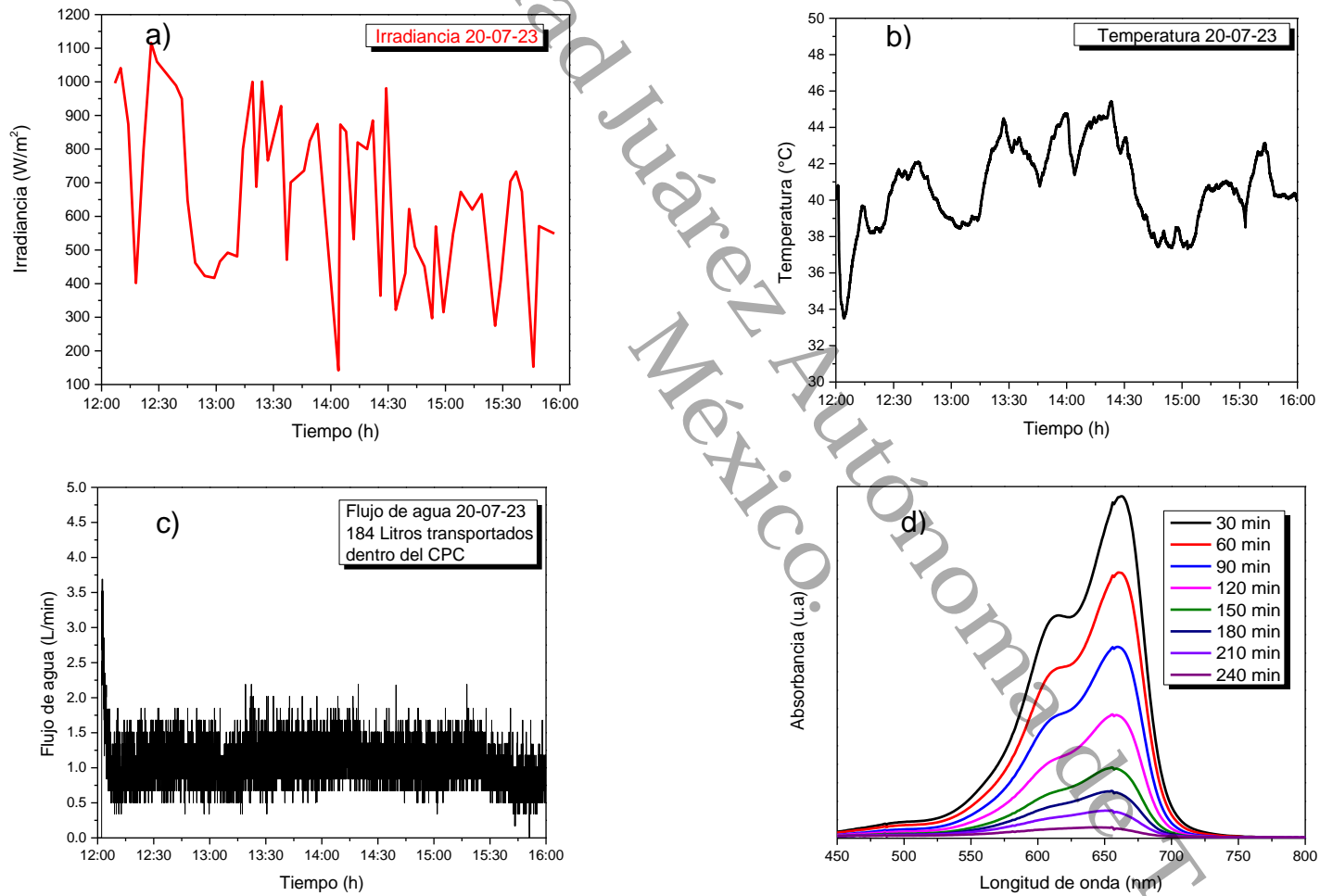


Figura 77.

Prueba de degradación en el CPC, correspondiente al día 20-07-23, con los niveles de 12 h a 16 h por 1L/min



Los porcentajes de degradación de cada prueba se organizó en la Tabla 16, los datos se ordenaron en forma de un factor bajo y otro alto, con base en la notación Yates.

Tabla 16

Porcentaje de las pruebas de degradación a diferente factores y niveles a 240 min.

Degradación en % a los 240 min				
Velocidad		10 h		12 h
1 L/min	95.9	98.04	92.74	97.56
4 L/min	99.05	99.63	99.99	99.26

En la búsqueda de las condiciones de mayor impacto en la degradación dentro del CPC, se aplicó el análisis de variancia (Figura 25), el resultado se observa en la Tabla 17.

Tabla 17

Tabla de análisis de varianza (ANOVA).

Tabla ANOVA						
Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de suma de cuadrados	Estadístico de prueba (f calculada)	Probabilidad con nivel de significancia (f crítico)	Probabilidad de error
Flujo	23.43	1	23.43	6.53	7.709	0.063
Irradiancia	1.18	1	1.18	0.32	7.709	0.597
Interacción de Factores	2.21	1	2.21	0.61	7.709	0.476
Error Experimental	14.34	4	3.58			

La última columna es la probabilidad de error también conocida como p-value, este valor se compara con el valor de significancia de 0.05. En este análisis los valores p-value son mayor

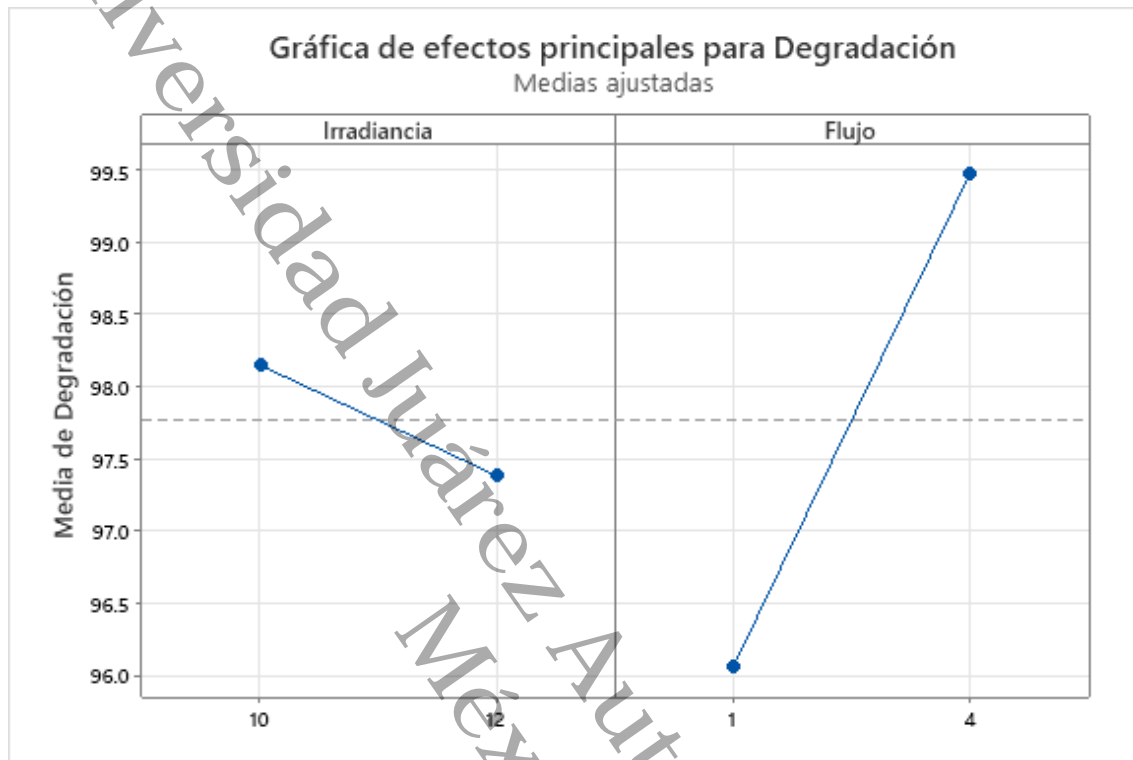
al valor de significancia y se confirma con las F calculada $< F$ crítica, es decir, la hipótesis nula no se rechaza. Con un nivel de confianza de 95%, los factores son iguales en el impacto en la degradación del CPC, sin embargo, el p-value de 0.063 es más cercano al valor de significancia, correspondiente al factor del flujo.

La Figura 78 es la gráfica de efectos principales de la degradación, en ella se muestra más información de los factores contra una respuesta promedio de la degradación, en la primera parte de la gráfica se percibe un decremento de la degradación en el cambio de nivel de bajo a alto, correspondiente al factor de la irradiancia, este cambio es de 0.77% lo cual no es muy significativo, indicando que la variación de degradación no es significativa en el horario de operación del CPC de 10h o 12h, sin embargo hay que destacar que en ambos caso la degradación supera el 97%, por lo tanto no hay margen de maniobra para poder indicar una diferencia, en caso contrario habría un cambio significativo indicando degradaciones por debajo de 90%, es decir el CPC no aprovecharía de forma adecuada los rayos del sol para la degradación del contaminante orgánico.

La segunda parte de la gráfica es la velocidad de flujo contra la degradación, en este caso se indica un incremento de un nivel bajo a alto de la velocidad de flujo, este incremento es de 3.43%, este valor se acerca al valor de significancia, indicando que podría llegar a ser un factor que afecte a la degradación y se correlaciona con el valor de p-value, en otras palabras, la velocidad de flujo de 4 L/min dentro del CPC ayuda a la degradación del contaminante bajo las condiciones que fueron medidas. En la sección "4.10.10 Conclusiones del diseño de experimento" se explicará la causa.

Figura 78.

Gráfica de efectos de los factores contra degradación



Durante el análisis de degradación a 240 min se observó que las pruebas realizadas en los días 11, 18, 19 y 12, 14, 20 superaron más del 93% y 67% de la degradación respectivamente, estos porcentajes de degradaciones se alcanzaron a la mitad de tiempo del anterior análisis, es decir a los 120 min, por lo tanto, se decidió realizar un nuevo análisis de varianza con las degradaciones a los 120 min, el concentrado de datos se visualiza en la Tabla 18.

Tabla 18

Porcentaje de las pruebas de degradación a 120 min.

Velocidad	Degradación en % a los 120 min			
	10 h		12 h	
1 L/min	57.3	73.80	57.19	67.41
4 L/min	73.99	96.01	99.62	93.06

En la Tabla 19 se muestra los resultados del análisis de variancia a 120 min. El valor pvalue referente a la velocidad de fluido < valor de significancia, esto indica que la velocidad de flujo tiene un impacto en la degradación y se confirma con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 19

Tabla de análisis de variancia (ANOVA) a 120 min

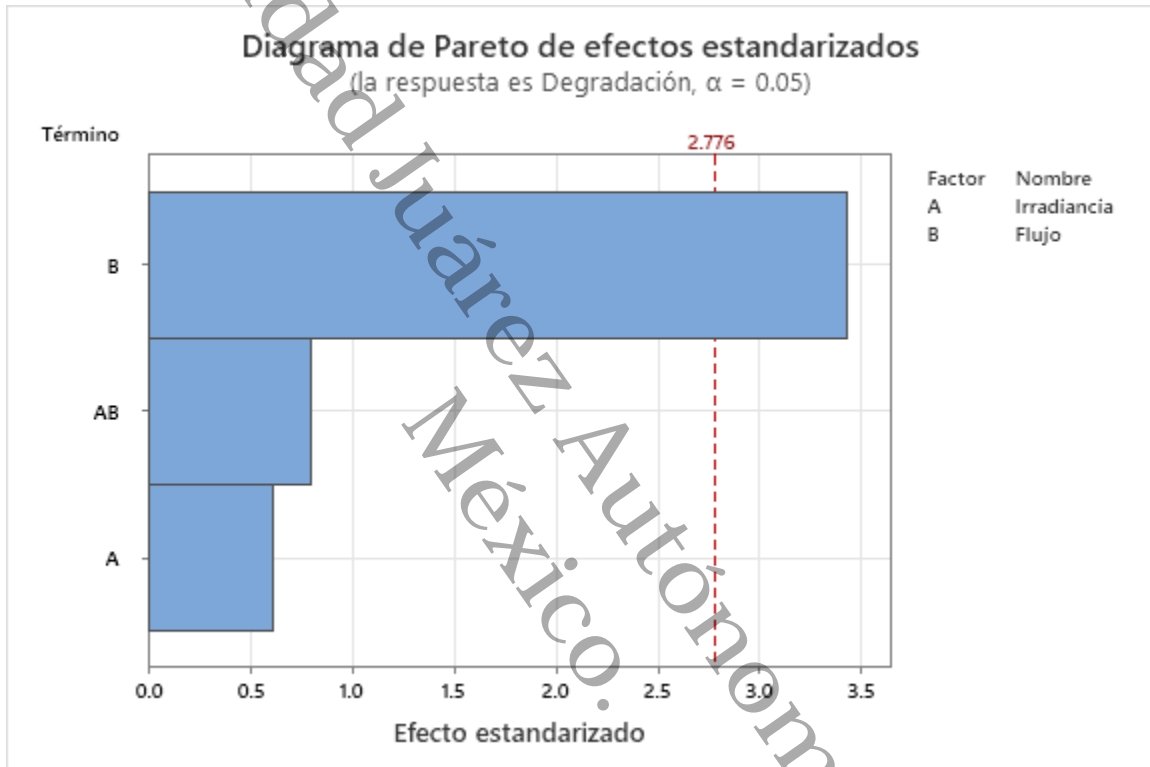
Tabla ANOVA a 120 min						
Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de suma de cuadrados	Estadístico de prueba (f calculada)	Probabilidad con nivel de significancia (f crítico)	Probabilidad de error
Flujo	1430.590	1	1430.590	12.652	7.709	0.024
Irradiancia	32.724	1	32.724	0.289	7.709	0.619
Interacción de Factores	106.434	1	106.434	0.941	7.709	0.387
Error Experimental	452.306	4	113.077			

Este resultado se visualiza mejor en la Figura 79, donde el factor de velocidad de fluido cruza la línea de referencia de efectos más significativo, esto determinan que el factor de velocidad de fluido a 4 L/min mejora la degradación del contaminante orgánico dentro del CPC.

Esto concreta que el CPC operado a 120 min, la velocidad de fluido mejora la degradación independientemente del horario de 10 h u 12 h.

Figura 79.

Diagrama de Pareto de los efectos principales de los factores de la degradación a 120 min



Por último, se propone un tercer análisis, las alícuotas se tomaron cada 30 min y se considera un factor más en el diseño de experimento, debido a que son muestras de degradación en un periodo de tiempo definido, como resultado sería un diseño de experimento factorial de 2x2x4, en la Tabla 20 se presenta el nuevo factor denominado tiempo.

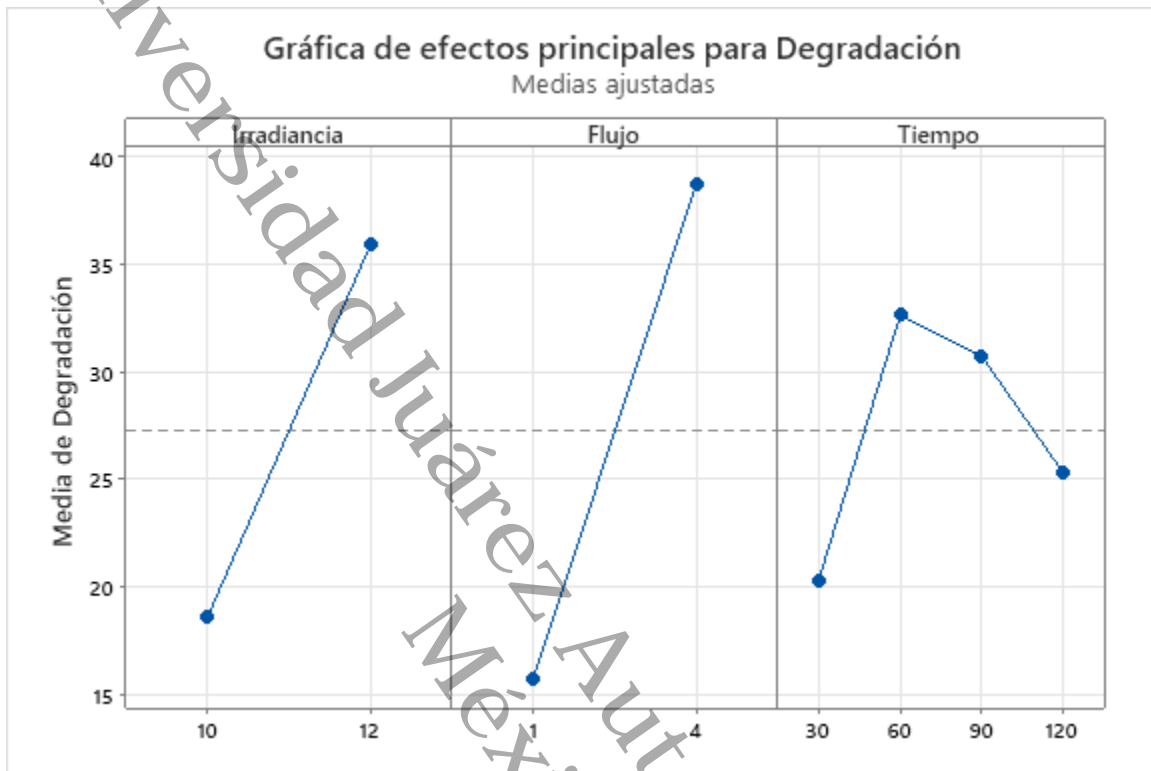
Tabla 20*Porcentaje de las pruebas de degradación a 30 min*

Degradación en % a 30 min				
Irradiancia	Flujo	Tiempo	Réplica 1	Réplica 2
10 h	1 L/min	30 min	13.629	15.589
10 h	1 L/min	60 min	12.118	24.121
10 h	1 L/min	90 min	14.532	16.232
10 h	1 L/min	120 min	13.434	17.937
10 h	4 L/min	30 min	15.753	21.516
10 h	4 L/min	60 min	25.064	36.557
10 h	4 L/min	90 min	16.374	28.339
10 h	4 L/min	120 min	16.808	9.605
12 h	1 L/min	30 min	7.370	7.590
12 h	1 L/min	60 min	13.052	20.803
12 h	1 L/min	90 min	24.272	20.420
12 h	1 L/min	120 min	12.502	18.601
12 h	4 L/min	30 min	61.746	19.541
12 h	4 L/min	60 min	96.483	33.020
12 h	4 L/min	90 min	99.202	26.513
12 h	4 L/min	120 min	99.622	13.990

En la gráfica 80 se muestra los efectos principales de los factores con respecto a la degradación, la primera subfigura corresponde a la irradiancia, en ella hay un incremento del nivel bajo a alto, revelando una mayor degradación en el horario de las 12 h. En la segunda subfigura también hay una significancia de la degradación en el nivel bajo a alto de la velocidad de flujo y la tercera subfigura se muestra una significancia al inicio de la degradación (30 min y 60 min), después la degradación decrece (90 min y 120 min), este fenómeno señala que los primero 60 min se obtiene una velocidad rápida de degradación, después decrece dicha velocidad, debido a que en ese tiempo el porcentaje de degradación alcanza más de 90%, por lo tanto la velocidad se reduce al aproximarse a 100%.

Figura 80.

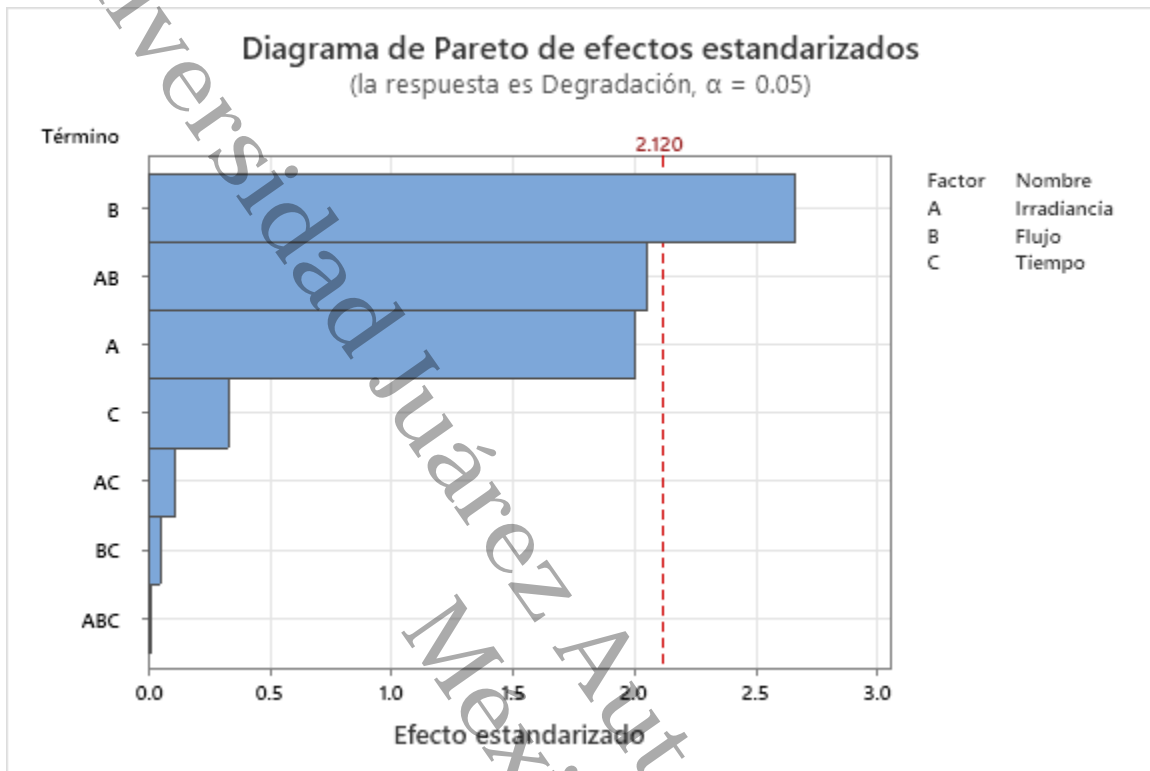
Grafica de efectos principales de la degradación a 30min



En la Figura 81 se marca la significancia del factor de velocidad de flujo en la degradación, el factor de la interacción de irradiancia y flujo se acerca al valor significativo, al igual que la irradiancia. Las condiciones medidas muestran que los factores propuestos son significativos o muy cerca al valor significativo que impacta en la degradación del contaminante orgánico.

Figura 81.

Gráfica de Pareto de los efectos principales de los factores de la degradación a 30 min



En el anexo 1 se muestra la medición de degradación in situ usando el sensor MQ135.

4.10.10 Conclusiones del Diseño de Experimento

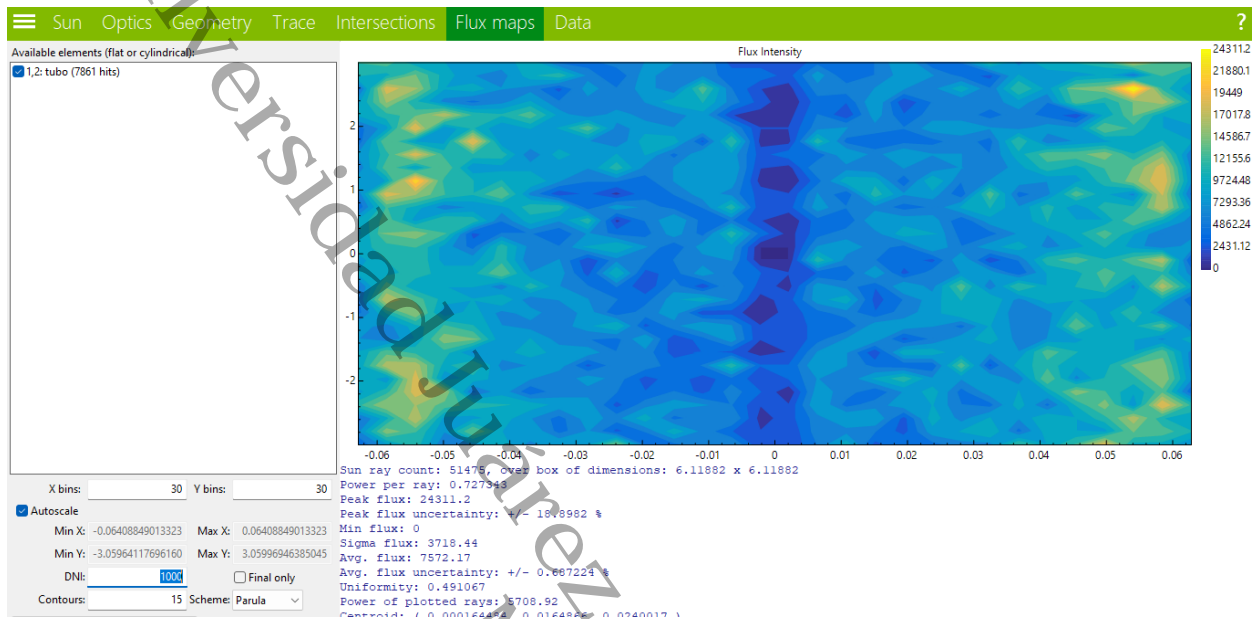
En el primer análisis, el factor de velocidad de flujo se acercó al valor significativo, luego en los dos últimos análisis dicho factor obtuvo un valor significativo en la degradación del contaminante orgánico. Con base en las condiciones medidas, la velocidad de flujo muestra mayor influencia en la degradación, esto es presumible al comportamiento a las aglomeraciones de ZnO/CuO dentro del tubo del CPC.

En el caso de la velocidad de flujo 1 L/min, el fluido se comporta como un flujo laminar, es decir, el ZnO/CuO se mueve junto con el fluido en capas paralelas, provocando que el ZnO/CuO se desplace de forma constante dentro del tubo del CPC y con base en la simulación del flujo luminoso en el tubo del CPC (Figura 82) se percibe menor concentración de haces de luz en fondo el tubo del CPC, por lo tanto, el flujo laminar y la precipitación, podría desplazar parte del material ZnO/CuO por en el fondo del tubo CPC, provocando una disminución de la reacción de los sitios activos, reduciendo la velocidad de la degradación del contaminante orgánico.

Por otro lado, la velocidad de fluido de 4 L/min provoca un flujo turbulento, permitiendo que el ZnO/CuO fluya por todo el tubo del CPC, de esa forma aumenta la probabilidad que el ZnO/CuO cruce por áreas de mayor cantidad de haces de luz y por ende mayor reacción de los sitios activos del ZnO/CuO, provocando un incremento en la degradación del contaminante orgánico en el CPC.

Figura 82.

Simulación de intensidad de flux en el tubo del CPC



Las gráficas de irradiancia de las Figuras 71, 74 y 75 correspondiente a los días 11, 18, 19 fueron día mayormente despejado, el resultado se ve directamente en degradaciones rápidas con respecto a los otros días menos despejados, la causa es por la mayor cantidad de haces de luz que excitan más sitios activos del ZnO/CuO. Los experimentos indican cuando haya presencia de nubes, se debe ajustar el factor de velocidad de fluido a 4 L/min para compensar la velocidad de degradación.

En la Figura 83 se aprecian las interacciones de las medias de los factores con respecto a la degradación dentro del CPC, en ellas se muestran las combinaciones que proporcionan mayor degradación. En el análisis 1 a 240 min se muestra la interacción de velocidad de flujo con la irradiancia, en ella el máximo nivel de degradación de 99.6%, esto sucede cuando las condiciones de la velocidad de fluido es 4 L/min en un horario de 12 h.

En el análisis 2 a 120 min se obtuvo una degradación máxima de 93%, bajo las mismas condiciones descritas en el análisis 1 a 240 min y de la misma forma el mejor resultado es 4 L/min en un horario 12 h. En el análisis 3 a 30 min se aumentó un factor, por lo tanto, aumento la cantidad de interacción entre factores, la primera interacción fue la irradiancia con la velocidad de flujo, en ella también se obtuvo una máxima degradación de 56% cuando la velocidad de fluido fue de 4 L/min en un horario de 12 h.

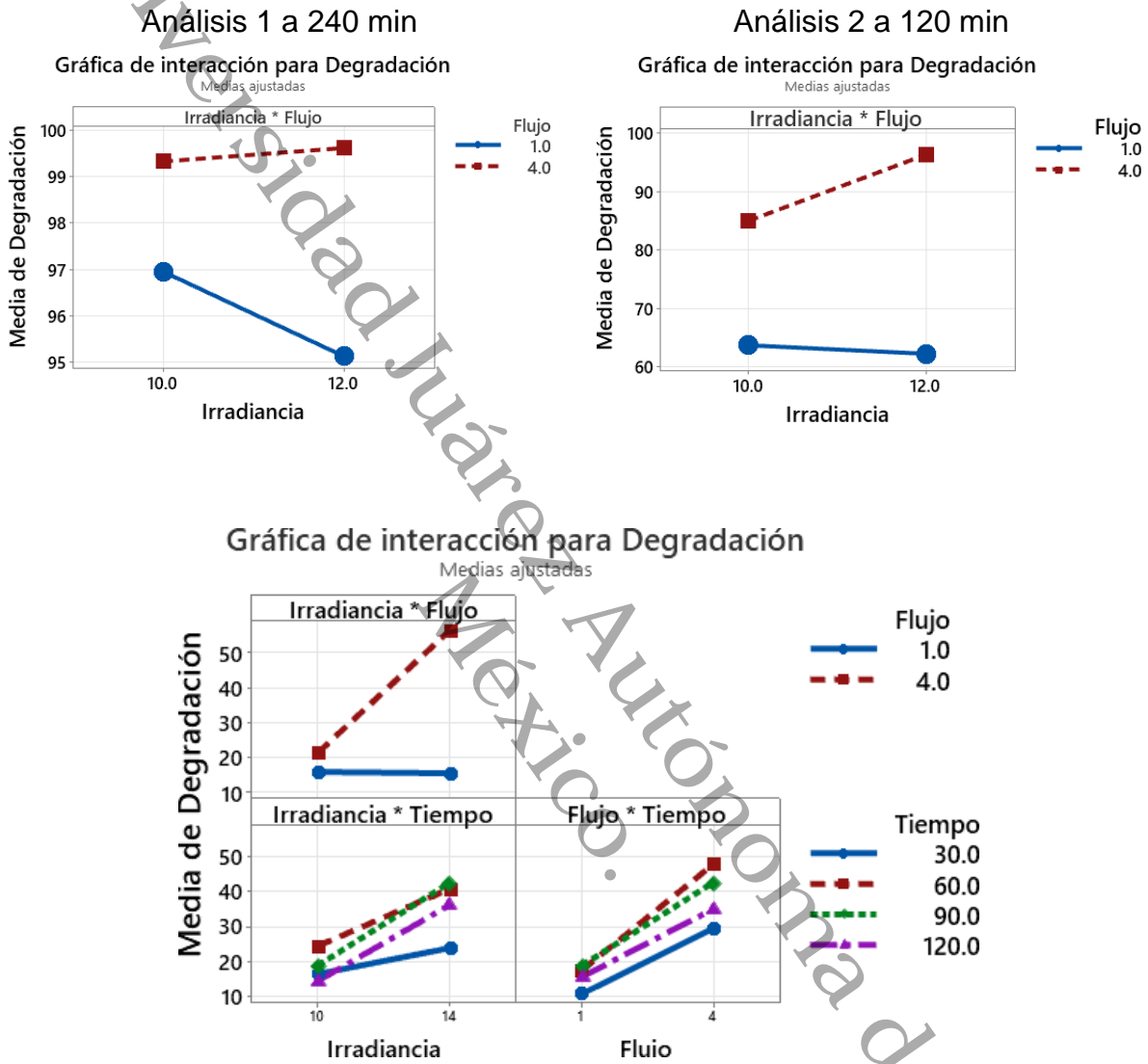
La segunda interacción, no mostró cambios significativos en la degradación entre las alícuotas en un horario de 10 h, caso contrario, en el horario de las 12 h, donde si hay cambios significativos y también hay cambios en los primero 90 min, esto es debido a que en ese horario había alrededor de 200 W/m² más en el horario de las 12 h y después de una hora se llegan a casi igualar la misma irradiancia del horario de las 10 h, es por eso que hay mayor degradación en las primeras alícuotas.

La tercera interacción es flujo con respecto al tiempo, en ella también hay mayor degradación cuando la velocidad de flujo es de 4 L/min, la irradiancia inicial fue alta, por lo tanto, se ve reflejada en valores de alícuotas con mayor porcentaje de degradación, pero después de 60 min esta se reduce conforme llega al 100% de la degradación.

Los resultados obtenidos previamente sugieren que las condiciones de operación del CPC alcanzan la máxima degradación es a las 12 h, con una velocidad de fluido de 4 L/min. Esto es independiente de si el cielo esta despejado o no.

Figura 83.

Gráficas de interacciones entre factores y sus niveles, correspondiente al análisis a 30min



Capítulo 5

Conclusión

Las técnicas de caracterización confirmaron la obtención de los óxidos metálicos cristalinos, sin presencia de otros elementos y con propiedades ópticas que reaccionan a la luz del sol, estas cualidades permitieron obtener una heterounión tipo escalera entre ZnO y CuO. La interfaz fue confirmada con la correlación de las técnicas de caracterización de XRD, XPS y UV-Vis. El resultado fue la degradación del contaminante modelo y comparado con otros autores, destacando el ahorro de 10 W de potencia eléctrica. Otro punto importante es la cantidad de ZnO/CuO obtenido por cada síntesis, el promedio sintetizado fue de 0.5g, esto equivale a hacer 20 pruebas descritas en el punto 3.5 (pruebas fotocatalíticas) o un poco más de 3 pruebas del punto 3.6 (pruebas fotocatalíticas en CPC).

El diseño y construcción del seguidor solar permite la rápida reparación de la instrumentación debido al uso de electrónica analógica, es decir los elementos son reemplazables sin necesidad de una programación u configuración y también son fáciles de encontrar en el mercado. Esto hace que el seguidor solar sea sencillo de reparar y factible para ser usado para otros equipos que requieran la captación de haces de luz de forma perpendicular, como los paneles solares. El seguidor solar siempre ubica la orientación del sol, a pesar de ello, se recomienda usar un mapa de trayectoria solar para orientar el CPC, eso reduce la distancia que requiere el seguidor solar para orientarse al sol.

La posición adecuada del tubo receptor dentro de CPC permite captar la luz solar e irradiar de forma uniforme al material ZnO/CuO, es importante las condiciones de recirculación del ZnO/CuO, por la precipitación del mismo, debido a que parte del material podría

transportarse por el fondo del tubo donde la captación de la luz solar es menor y eso provoca la reducción de la degradación del contaminante, por lo tanto es recomendable que el flujo sea turbulento dentro del tubo, de esa manera el material cruza por zonas de mayor concentración de luz solar y por ende mejora la degradación del contaminante en un menor tiempo.

El punto óptimo de aprovechamiento del CPC para aumentar la velocidad de degradación de un contaminante es cuando se pone en marcha en un horario de 12hrs a 14hrs con una velocidad de flujo de 4 L/min con un cielo despejado, no obstante, durante las pruebas se confirmó la degradación en presencia de nubes.

El aprovechamiento de la luz solar por medio de un CPC hace que el proceso de degradación de los contaminantes sea más económico, al reducir el uso otra fuente de energía convencional, esto también reduce los contaminantes productos de la generación de la energía convencional.

Referencias

- Akbar Jan, F., Wajidullah, Ullah, R., Ullah, N., Salman, & Usman, M. (2021). Exploring the environmental and potential therapeutic applications of Myrtus communis L. assisted synthesized zinc oxide (ZnO) and iron doped zinc oxide (Fe-ZnO) nanoparticles. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(7), 101278. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101278>
- Al-Amayreh, M. I., & Alahmer, A. (2022). On improving the efficiency of hybrid solar lighting and thermal system using dual-axis solar tracking system. *Energy Reports*, 8, 841–847. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.080>
- Al Baroot, A., Alheshibri, M., Drmosh, Q. A., Akhtar, S., Kotb, E., & Elsayed, K. A. (2022). A novel approach for fabrication ZnO/CuO nanocomposite via laser ablation in liquid and its antibacterial activity: A novel approach for fabrication ZnO/CuO nanocomposite. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 103606. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103606>
- Alarfaj, E., & Subahi, A. (2015). Superlattices and Microstructures The influence of external magnetic field on the structural and optical properties of nanocrystalline ZnO thin films prepared by dip coating method. *SUPERLATTICES AND MICROSTRUCTURES*, 86, 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.08.001>
- Alfragide, E. De, Physics, E., & Studies, E. (1991). *B' ~ B A' / 6*, 457–466.
- Ali, I. O., Nady, H., Mohamed, M. I., & Salama, T. M. (2024). Journal of the Indian Chemical Society Fabrication and characterization of ZnO and Ag / ZnO nanoparticles for efficient degradation of crystal violet dye in aqueous solution. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101(12), 101480. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101480>
- Almehizia, A. A., Al-Omar, M. A., Naglah, A. M., Bhat, M. A., & Al-Shakliah, N. S. (2022). Facile synthesis and characterization of ZnO nanoparticles for studying their biological activities and photocatalytic degradation properties toward methylene blue dye. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 2386–2395. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.102>
- Alqahtani, A. Y., Makki, A. A., & Alidrisi, H. M. (2023). Revealing factors influencing classroom noise in the universities teaching and learning environment: A design of experiments approach. *Journal of Engineering Research*, 11(1), 100009. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100009>
- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Chapter 6 - Photocatalysis. In S. C. Ameta & R. Ameta (Eds.), *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 135–175). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- Arancibia-Bulnes, C. A., Jiménez, A. E., & Estrada, C. A. (2009). Development and Modeling of Solar Photocatalytic Reactors. *Advances in Chemical Engineering*, 36(09), 185–227. [https://doi.org/10.1016/S0065-2377\(09\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(09)00406-2)
- Arronte G.R. (2017). *No Title. ¿Cuánta Agua Hay En El Planeta?* <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Arte, E. D. E. L. (n.d.). *Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado del arte. May 2014.*
- Ávila-López, M. A., Gavrielides, S., Luo, X., Ojoajogwu, A. E., Tan, J. Z. Y., Luévano-

- Hipólito, E., Torres-Martínez, L. M., & Maroto-Valer, M. M. (2021). Comparative study of CO₂ photoreduction using different conformations of CuO photocatalyst: Powder, coating on mesh and thin film. *Journal of CO₂ Utilization*, 50(June), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101588>
- Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004>
- Balamurugan, B., & Mehta, B. R. (2001). Optical and structural properties of nanocrystalline copper oxide thin films prepared by activated reactive evaporation. *Thin Solid Films*, 396(1–2), 90–96. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01216-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01216-0)
- Behera, G. C., Rani, S., Khatun, N., Rath, J. K., & Roy, S. C. (2022). WS₂ nanosheets functionalized Fe₂O₃ nanorod arrays as a type II heterojunction for photoelectrochemical water splitting. *Applied Surface Science Advances*, 11(August), 100293. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100293>
- Benaboud, A., Zaabat, M., Aida, M. S., Boudine, B., & Benzitouni, S. (2017). Optik Fe₂O₄ / ZnO-nanowires synthesis by dip-coating for Orange II-dye photodegradation. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 144, 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.108>
- Benally, C., Messele, S. A., & Gamal El-Din, M. (2019). Adsorption of organic matter in oil sands process water (OSPW) by carbon xerogel. *Water Research*, 154, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.053>
- Bendicho, C., Lavilla, I., & Vigo, U. De. (2017). *Sewage ☆ Chemical Pollutants in Sewage*. August, 300–307. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11519-7>
- Bharathi, P., Harish, S., Archana, J., Navaneethan, M., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Shimomura, M., & Hayakawa, Y. (2019a). Enhanced charge transfer and separation of hierarchical CuO/ZnO composites: The synergistic effect of photocatalysis for the mineralization of organic pollutant in water. *Applied Surface Science*, 484(March), 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.131>
- Bharathi, P., Harish, S., Archana, J., Navaneethan, M., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Shimomura, M., & Hayakawa, Y. (2019b). Enhanced charge transfer and separation of hierarchical CuO/ZnO composites: The synergistic effect of photocatalysis for the mineralization of organic pollutant in water. *Applied Surface Science*, 484(March), 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.131>
- Bolton, W. (2013). Mecatrónica sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y electrónico. In *Alfaomega* (Vol. 53, Issue 9). http://etm2021.com/sbiblioteca/Libros/AUTOMATIZACION_Y_CONTROL/MECATRONICA_Sistemas_de_Control_Electrónico_en_Ingeniería_Mecánica_y_Eléctrica,5ta_Edición_-_W.BOLTON_.pdf
- Bora, L. V., & Mewada, R. K. (2017). Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: Fundamentals, mechanisms and parametric review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(January), 1393–1421. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.130>
- Calatayud-Vernich, P., VanEngelsdorp, D., & Picó, Y. (2019). Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. *MethodsX*, 6(April), 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022>
- Castañeda, C., Martínez, J. J., Santos, L., Rojas, H., Osman, S. M., Gómez, R., & Luque,

- R. (2022). Caffeine photocatalytic degradation using composites of NiO/TiO₂-F and CuO/TiO₂-F under UV irradiation. *Chemosphere*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132506>
- Castner, D. G., & Ratner, B. D. (2018). Proteins Controlled With Precision at Organic, Polymeric, and Biopolymer Interfaces for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. In *Principles of Regenerative Medicine*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809880-6.00031-X>
- Chabane, L., Zebbar, N., Kechouane, M., Aida, M. S., & Trari, M. (2016). Al-doped and in-doped ZnO thin films in heterojunctions with silicon. *Thin Solid Films*, 605, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.10.063>
- Chakraborty, U., Kaur, G., Rubahn, H., & Kaushik, A. (2023). Progress in Materials Science Advanced metal oxides nanostructures to recognize and eradicate water pollutants. *Progress in Materials Science*, 139(July), 101169. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101169>
- Chang, Y. C. (2016). Low temperature and large-scale growth of ZnO nanoneedle arrays with enhanced optical and surface-enhanced Raman scattering properties. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 225, 498–503. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.053>
- Chen, K. J., Hung, F. Y., Chang, S. J., & Young, S. J. (2009). Optoelectronic characteristics of UV photodetector based on ZnO nanowire thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1–2), 674–677. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.01.026>
- Cleaning, P. (2007). Particulate Cleaning. *Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces*, 885–928. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-51664-0.50027-9>
- Das, M. (2021). Exploration of the effect of two-axis PLC solar tracking system on the thermal performance of solar air collector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101692. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101692>
- de Assumpção Pereira-da-Silva, M., & Ferri, F. A. (2017). Scanning Electron Microscopy. In *Nanocharacterization Techniques*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00001-1>
- de la Cruz, C., León, C., Mandujano, J., Cáceres, R., & Rojas, I. (2012). Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 02(02), 89–100. <https://doi.org/10.18259/acs.2012011>
- Di Capua, G., Femia, N., Migliaro, M., Sacco, O., Sannino, D., Stoyka, K., & Vaiano, V. (2017). Intensification of a flat-plate photocatalytic reactor performances by innovative visible light modulation techniques: A proof of concept. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 118(February), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.05.004>
- Diaz-Angulo, J., Lara-Ramos, J., Mueses, M., Hernández-Ramírez, A., Li Puma, G., & Machuca-Martínez, F. (2020). Enhancement of the oxidative removal of diclofenac and of the TiO₂ rate of photon absorption in dye-sensitized solar pilot scale CPC photocatalytic reactors. *Chemical Engineering Journal*, 381(January 2019), 122520. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122520>
- Dib, K., Brahimi, R., Bessekhoud, Y., Tayebi, N., & Trari, M. (2016). Structural, optical and transport properties of SxZnO. *Materials Science in Semiconductor Processing*,

- 48, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.03.010>
- Dikra, B., Fella, M., Barille, R., Weiß, S., Abdul Samad, M., Alburaihan, A., Abd El-Wahed khalifa, H., & Obrosof, A. (2024). Improvement of photocatalytic performance and sensitive ultraviolet photodetectors using AC-ZnO/ZC-Ag₂O/AZ-CuO multilayers nanocomposite prepared by spin coating method. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9(1), 100642. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100642>
- Ed, M. H., Jr, J. S. H., Yuen, H., Bank, S., Wistey, M., Lordi, V., & Gugov, T. (2005). *MBE Growth and Characterization of Long Wavelength Dilute Nitride III-V Alloys*. ELECTRONICS, H. (n.d.). *No Title*. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf
- Fang, G., Liu, J., Wu, J., Li, M., Yan, X., & Wang, D. (2019). A generic strategy for preparation of TiO₂/Bi_xMo_yO_z (M=W, Mo) heterojunctions with enhanced photocatalytic activities. *Applied Surface Science*, 475(September 2018), 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.297>
- Fouda, A., Salem, S. S., Wassel, A. R., Hamza, M. F., & Shaheen, T. I. (2020). Optimization of green biosynthesized visible light active CuO/ZnO nanophotocatalysts for the degradation of organic methylene blue dye. *Heliyon*, 6(9), e04896. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04896>
- Ghasempour-Mouziraji, M., Lagarinhos, J., Afonso, D., & Alves de Sousa, R. (2024). A review study on metal powder materials and processing parameters in Laser Metal Deposition. *Optics and Laser Technology*, 170(August 2023), 110226. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110226>
- Ghassoul, M. (2018). Single axis automatic tracking system based on PILOT scheme to control the solar panel to optimize solar energy extraction. *Energy Reports*, 4, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2018.07.001>
- Ghassoul, M. (2021). A dual solar tracking system based on a light to frequency converter using a microcontroller. *Fuel Communications*, 6, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.fueco.2020.100007>
- Gindose, T. G., Atisme, T. B., Gebreslassie, G., Gebresilassie, A. B., & Zereffa, E. A. (2024). A poly-vinyl alcohol aided multiphase Z-scheme ZnO-AgI-CuO nanocomposite as an efficient photocatalyst for dye photodegradation. *Materials Advances*, 5(20). <https://doi.org/10.1039/d4ma00357h>
- Giri, I., K.C., R., & Khadka, U. R. (2022). *Chapter 23 - Water quality status in Bagmati river of Kathmandu valley, Nepal* (S. Madhav, S. Kanhaiya, A. Srivastav, V. Singh, & P. B. T.-E. S. of R. E. Singh (eds.); pp. 481–502). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00017-0>
- Gonon, M. (2021). Case Studies in the X-ray Diffraction of Ceramics. In M. Pomeroy (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses* (pp. 560–577). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00005-9>
- Goodarzi, M. T., & Eshghi, H. (2018). Fabrication and characterization of CuO/ZnO:Al photo-diode prepared by spray pyrolysis method. *Materials Letters*, 215, 79–82. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.018>
- Gutiérrez, Pulido Humberto de la Vara Salazar, R. (2008). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS* (R. A. del B. Alayón (ed.); Segunda). McGRAW-HILL.
- haq, M. ul, Iqbal, M., Sial, M. A. Z. G., Shabbir, S., Siddiq, M., & Iqbal, A. (2017). Effect of Fe doping on the crystallinity of CuO nanotubes and the efficiency of the hybrid

- solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 335, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.11.020>
- Harish, S., Archana, J., Sabarinathan, M., Navaneethan, M., Nisha, K. D., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Ikeda, H., Aswal, D. K., & Hayakawa, Y. (2017). Controlled structural and compositional characteristic of visible light active ZnO/CuO photocatalyst for the degradation of organic pollutant. *Applied Surface Science*, 418, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.082>
- Hieu, C., Fu, C., & Juang, R. (2018). Degradation of methylene blue and methyl orange by palladium-doped TiO₂ photocatalysis for water reuse: Efficiency and degradation pathways. *Journal of Cleaner Production*, 202, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.110>
- Hlongwane, G. N., Sekoai, P. T., Meyyappan, M., & Moothi, K. (2019). Simultaneous removal of pollutants from water using nanoparticles: A shift from single pollutant control to multiple pollutant control. *Science of the Total Environment*, 656, 808–833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.257>
- Hualpa-Cutipa, E., Acosta, R. A. S., Sangay-Tucto, S., Beingolea, X. G. M., Gutierrez, G. T., & Zabarrurú, I. N. (2022). Chapter 15 - Recent trends for treatment of environmental contaminants in wastewater: An integrated valorization of industrial wastewater. In V. Kumar & M. Kumar (Eds.), *Integrated Environmental Technologies for Wastewater Treatment and Sustainable Development* (pp. 337–368). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91180-1.00007-7>
- Huang, L., Peng, F., & Ohuchi, F. S. (2009). “In situ” XPS study of band structures at Cu₂O/TiO₂ heterojunctions interface. *Surface Science*, 603(17), 2825–2834. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2009.07.030>
- Ievtushenko, A., Karpyna, V., Eriksson, J., Tsiaoussis, I., Shteplyuk, I., Lashkarev, G., Yakimova, R., & Khranovskyy, V. (2018). Effect of Ag doping on the structural, electrical and optical properties of ZnO grown by MOCVD at different substrate temperatures. *Superlattices and Microstructures*, 117, 121–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.03.029>
- Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W., Panupintu, S., & Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37(October 2019), 100618. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618>
- Jarlborg, T. (2007). Effects of spin-phonon interaction within the CuO plane of high-T_c superconductors. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 454(1–2), 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2006.12.019>
- Jiang, Y., Choi, C., Hong, S., Chu, S., Wu, T. S., Soo, Y. L., Hao, L., Jung, Y., & Sun, Z. (2021a). Enhanced electrochemical CO₂ reduction to ethylene over CuO by synergistically tuning oxygen vacancies and metal doping. *Cell Reports Physical Science*, 2(3), 100356. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100356>
- Jiang, Y., Choi, C., Hong, S., Chu, S., Wu, T. S., Soo, Y. L., Hao, L., Jung, Y., & Sun, Z. (2021b). Enhanced electrochemical CO₂ reduction to ethylene over CuO by synergistically tuning oxygen vacancies and metal doping. *Cell Reports Physical Science*, 2(3), 100356. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100356>
- Kalaiyan, G., Suresh, S., Prabu, K. M., Thambidurai, S., Kandasamy, M., Pugazhenthiran, N., Kumar, S. K., & Muneeswaran, T. (2020). *Journal of Environmental*

- Chemical Engineering*, 104847. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129366>
- Karchiyappan, T., & Karri, R. R. (2021). *Chapter 21 - Process Optimization and Modeling of Hydraulic Fracturing Process Wastewater Treatment Using Aerobic Mixed Microbial Reactor via Response Surface Methodology* (R. R. Karri, G. Ravindran, & M. H. B. T.-S. C. T. in S. W. and W. M. Dehghani (eds.); pp. 351–363). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00023-9>
- Khan, H., Rigamonti, M. G., Patience, G. S., & Boffito, D. C. (2018). Spray dried TiO₂/WO₃ heterostructure for photocatalytic applications with residual activity in the dark. *Applied Catalysis B: Environmental*, 226, 311–323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.049>
- Khan, M. M. (2023). Chapter 1 - Introduction of photocatalysis and photocatalysts. In M. Mansoob Khan (Ed.), *Theoretical Concepts of Photocatalysis* (pp. 1–13). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95191-3.00005-5>
- Korres, D., & Tzivanidis, C. (2018). A new mini-CPC with a U-type evacuated tube under thermal and optical investigation. *Renewable Energy*, 128, 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.054>
- Kroemer, H. (2002). Barrier control and measurements: Abrupt semiconductor heterojunctions. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2(3), 433. <https://doi.org/10.1116/1.582890>
- Kumaresan, N., Sinthiya, M. M. A., Ramamurthi, K., Ramesh Babu, R., & Sethuraman, K. (2020). Visible light driven photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposites coupled with rGO heterostructures synthesized by solid-state method for RhB dye degradation. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(2), 3910–3928. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.03.002>
- Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. *Results in Surfaces and Interfaces*, 11(May), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122>
- Li, D., Qin, L., Zhao, P., Zhang, Y., Liu, D., Liu, F., Kang, B., Wang, Y., Song, H., Zhang, T., & Lu, G. (2018). Preparation and gas-sensing performances of ZnO/CuO rough nanotubular arrays for low-working temperature H₂S detection. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 254, 834–841. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.06.110>
- Li, R., Du, J., Luan, Y., Xue, Y., Zou, H., Zhuang, G., & Li, Z. (2012). Ionic liquid precursor-based synthesis of CuO nanoplates for gas sensing and amperometric sensing applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 168, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.03.079>
- Li, X., Dai, Y. J., Li, Y., & Wang, R. Z. (2013). Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber. *Solar Energy*, 93, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.002>
- Ma, L., Ai, X., Jiang, W., Liu, P., Chen, Y., Lu, K., Song, X., & Wu, X. (2022). Zn/Ce metal-organic framework-derived ZnO@CeO₂ nano-heterojunction for enhanced photocatalytic activity. *Colloids and Interface Science Communications*, 49(June), 100636. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100636>
- Mahato, B. N., Krithiga, T., & Mary Thangam, M. A. (2021). Rapid adsorption of As(V) from aqueous solution by ZnO embedded in mesoporous aluminosilicate nanocomposite adsorbent: Parameter optimization, kinetic, and isotherms studies. *Surfaces and Interfaces*, 23(V), 100636. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100636>

- Mardikar, S. P., Kulkarni, S., & Adhyapak, P. V. (2018). Sunlight driven highly efficient degradation of methylene blue by CuO-ZnO nanoflowers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, August. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.033>
- Martínez, S., Morales-Mejía, J. C., Hernández, P. P., Santiago, L., & Almanza, R. (2014). Solar photocatalytic oxidation of Triclosan with TiO₂ immobilized on volcanic porous stones on a CPC pilot scale reactor. *Energy Procedia*, 57(55), 3014–3020. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.337>
- Mathur, P., Sanyal, D., & Das, R. K. (2021). Chapter 24 - Treatment of pharmaceutical and personal care products in wastewater. In M. Shah, S. Rodriguez-Couto, & K. Mehta (Eds.), *The Future of Effluent Treatment Plants* (pp. 451–474). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822956-9.00024-6>
- Morkoç, H., & Özgür, Ü. (2009). Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. In *Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology*. <https://doi.org/10.1002/9783527623945>
- Mpodi, E. K., Tjiparuro, Z., & Matsebe, O. (2019). Review of dual axis solar tracking and development of its functional model. *Procedia Manufacturing*, 35, 580–588. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.082>
- Mubeen, K., Irshad, A., Safeen, A., Aziz, U., Safeen, K., Ghani, T., Khan, K., Ali, Z., ul Haq, I., & Shah, A. (2023). Band structure tuning of ZnO/CuO composites for enhanced photocatalytic activity. *Journal of Saudi Chemical Society*, 27(3), 101639. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2023.101639>
- Muchuweni, E., Sathiaraj, T. S., & Nyakoty, H. (2017). Materials Science in Semiconductor Processing Low temperature synthesis of ZnO nanowires on GAZO thin films annealed at different temperatures for solar cell application. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 68(February), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.06.011>
- Munanga, P., Chinguwa, S., & Nyemba, W. R. (2020). Design for manufacture and assembly of an intelligent single axis solar tracking system. *Procedia CIRP*, 91, 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.109>
- Munguti, L., & Dejene, F. (2020). Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties of ZnO–TiO₂ composites for application in dye removal in water. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 24, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100594>
- Nti, E. K., Cobbina, S. J., Attafuah, E. E., Senanu, L. D., Amenyeku, G., Gyan, M. A., Forson, D., & Safo, A. R. (2023). Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. *Heliyon*, 9(7), e18170. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18170>
- Ochoa-Gutiérrez, K. S., Tabares-Aguilar, E., Mueses, M. Á., Machuca-Martínez, F., & Li Puma, G. (2018). A Novel Prototype Offset Multi Tubular Photoreactor (OMTP) for solar photocatalytic degradation of water contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 341(July 2017), 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.068>
- Okpara, E. C., Olatunde, O. C., Wojuola, O. B., & Onwudiwe, D. C. (2023). Applications of Transition Metal Oxides and Chalcogenides and their Composites in Water Treatment: a review. *Environmental Advances*, 11(January), 100341. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100341>

- Oku, T., Motoyoshi, R., Fujimoto, K., Akiyama, T., Jeyadevan, B., & Cuya, J. (2011). Structures and photovoltaic properties of copper oxides/fullerene solar cells. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 72(11), 1206–1211. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2011.06.014>
- Oluwafemi, O. S., Sakho, E. H. M., Parani, S., & Lebepe, T. C. (2021). Chapter Five - Characterization techniques for ternary I–III–VI quantum dots. In O. S. Oluwafemi, E. H. M. Sakho, S. Parani, & T. C. Lebepe (Eds.), *Ternary Quantum Dots* (pp. 117–135). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818303-8.00007-1>
- Oseghe, E. O., Guba, F., Misra, A., & Ziegenbalg, D. (2023). Article A scalable flow device for the removal of organic and inorganic pollutants from water A scalable flow device for the removal of organic and inorganic pollutants from water. *Device*, 1(2), 100020. <https://doi.org/10.1016/j.device.2023.100020>
- Otálvaro-marín, H. L., Angel, M., Crittenden, J. C., & Machuca-martinez, F. (2017). *Solar photoreactor design by the photon path length and optimization of the radiant field in a TiO₂-based CPC reactor*. 315, 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.019>
- Patel, R., & Kumar, V. (2015). Artificial Neuro Fuzzy Logic PID Controller based on BF-PSO Algorithm. *Procedia Computer Science*, 54, 463–471. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.053>
- Patil, D., Manjanna, J., Chikkamath, S., Uppar, V., & Chougala, M. (2021). Facile synthesis of stable Cu and CuO particles for 4-nitrophenol reduction, methylene blue photodegradation and antibacterial activity. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 4(November), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100032>
- Pearton, S. J., Norton, D. P., Ip, K., Heo, Y. W., & Steiner, T. (2005). Recent progress in processing and properties of ZnO. *Progress in Materials Science*, 50(3), 293–340. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.04.001>
- Pérez-González, M., Tomás, S. A., Santoyo-Salazar, J., Gallardo-Hernández, S., Tellez-Cruz, M. M., & Solorza-Feria, O. (2019a). Sol-gel synthesis of Ag-loaded TiO₂-ZnO thin films with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 779, 908–917. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.302>
- Pérez-González, M., Tomás, S. A., Santoyo-Salazar, J., Gallardo-Hernández, S., Tellez-Cruz, M. M., & Solorza-Feria, O. (2019b). Sol-gel synthesis of Ag-loaded TiO₂-ZnO thin films with enhanced photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 779, 908–917. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.302>
- Phys, J. A., & Amin, B. (2019). *Van der Waals heterostructures of P , BSe , and SiC monolayers Van der Waals heterostructures of P , BSe , and SiC monolayers*. 094301(February). <https://doi.org/10.1063/1.5082884>
- Polini, A., & Yang, F. (2017). Physicochemical characterization of nanofiber composites. In *Nanofiber Composites for Biomedical Applications*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100173-8.00005-3>
- Priya, T., Mishra, B. K., & Prasad, M. N. V. (2020). Chapter 2 - Physico-chemical techniques for the removal of disinfection by-products precursors from water (M. N. V. B. T.-D. B. in D. W. Prasad (ed.); pp. 23–58). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102977-0.00002-0>
- Ramakrishnegowda, D. H., Chandrakantha, K. S., Urs, D., Elfeky, M., Krishnegowda, J., Rangappa, S., Rangappa, K. S., & Shivanna, S. (2023). Synthesis of p-CuO/n-ZnO

- heterostructure by microwave hydrothermal method and evaluation of its photo and bio-catalytic performance. *Heliyon*, 9(12), e22758. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22758>
- Rawat, A., Jha, S. K., & Kumar, B. (2020). Position controlling of Sun Tracking System using Optimization technique. *Energy Reports*, 6, 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.079>
- Ren, Y., Zhao, L., Jing, D., & Guo, L. (2016). ScienceDirect Investigation and modeling of CPC based tubular photocatalytic reactor for scaled-up hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(36), 16019–16031. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.225>
- Rogalski, M. S., & Palmer, S. B. (2014). Solid state physics. In *Solid State Physics*. <https://doi.org/10.1201/9781482283037>
- Román-Ramírez, L. A., & Marco, J. (2022). Design of experiments applied to lithium-ion batteries: A literature review. *Applied Energy*, 320(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119305>
- Ruangon, K., Khamon, W., & Pecharapa, W. (2018). ScienceDirect Influence of baking temperature on relevant properties of sol-gel Ga-doped ZnO thin films annealed at low temperature. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14155–14159. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.082>
- Sahu, K., Bisht, A., Kuriakose, S., & Mohapatra, S. (2020). Two-dimensional CuO-ZnO nanohybrids with enhanced photocatalytic performance for removal of pollutants. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 137(July 2019), 109223. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.109223>
- Samad, A., Furukawa, M., Katsumata, H., Suzuki, T., & Kaneco, S. (2016). Photocatalytic oxidation and simultaneous removal of arsenite with CuO/ZnO photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 325, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.03.035>
- Sanakousar, M. F., C.C, V., Jiménez-Pérez, V. M., Jayanna, B. K., Mounesh, Shridhar, A. H., & Prakash, K. (2021). Efficient photocatalytic degradation of crystal violet dye and electrochemical performance of modified MWCNTs/Cd-ZnO nanoparticles with quantum chemical calculations. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2(June), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100004>
- Sangeeta, M., Karthik, K. V, Ravishankar, R., Anantharaju, K. S., Nagabhushana, H., Jeetendra, K., Vidya, Y. S., & Renuka, L. (2017). Synthesis of ZnO, MgO and ZnO/MgO by Solution Combustion Method: Characterization and Photocatalytic Studies. *Materials Today: Proceedings*, 4(11, Part 3), 11791–11798. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.096>
- Sapawe, N., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Sah, R. N. R. A., Jusoh, N. W. C., Hairom, N. H. H., & Efendi, J. (2013). Electrochemical strategy for grown ZnO nanoparticles deposited onto HY zeolite with enhanced photodecolorization of methylene blue: Effect of the formation of SiOZn bonds. *Applied Catalysis A: General*, 456, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.02.025>
- Saravanan, R., Karthikeyan, S., Gupta, V. K., Sekaran, G., Narayanan, V., & Stephen, A. (2013). Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination. *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), 91–98.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.08.011>
- Sathishkumar, P., Sweena, R., Wu, J. J., & Anandan, S. (2011). Synthesis of CuO-ZnO nanophotocatalyst for visible light assisted degradation of a textile dye in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 171(1), 136–140. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.074>
- Sathyakumar, N., Prasath Balaji, K., Ganapathi, R., & Pandian, S. R. (2018). A Build-Your-Own Three Axis CNC PCB Milling Machine. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24404–24413. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.236>
- Shetty, D., & Prabhu, N. (2017). Ziegler Nichols method based Robust reactive current controller for STATCOM. *Energy Procedia*, 117, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.143>
- Shubha, J. P., Kavalli, K., Adil, S. F., Assal, M. E., Hatshan, M. R., & Dubasi, N. (2022). Facile green synthesis of semiconductive ZnO Nanoparticles for photocatalytic degradation of dyes from the textile industry: A kinetic approach. *Journal of King Saud University - Science*, 34(5), 102047. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102047>
- Shubha, J. P., Roopashree, B., Patil, R. C., Khan, M., Shaik, M. R., Alaqarbeh, M., Alwarthan, A., Mahmoud Karami, A., & Adil, S. F. (2023). Facile synthesis of ZnO/CuO/Eu heterostructure photocatalyst for the degradation of industrial effluent. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(3), 104547. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104547>
- Singh, M. K., & Singh, A. (2022). Chapter 17 - Scanning electron microscope. In M. K. Singh & A. Singh (Eds.), *Characterization of Polymers and Fibres* (pp. 387–419). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823986-5.00008-7>
- Skromme, B. J., & Sujan, G. K. (2018). Semiconductor Heterojunctions. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11219-6>
- Smazna, D., Shree, S., Polonskyi, O., Lamaka, S., & Baum, M. (2019). Journal of Environmental Chemical Engineering Mutual interplay of ZnO micro- and nanowires and methylene blue during cyclic photocatalysis process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 103016. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103016>
- Song, K. (2017). Interphase characterization in rubber nanocomposites. In *Progress in Rubber Nanocomposites* (Issue ii). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00004-8>
- Srinivasan, R. (2023). A sustainable and cyclic metal organic framework-driven Fenton process for efficient removal of methylene blue. *Inorganic Chemistry Communications*, 156, 111209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111209>
- Streb, M., Ohrelius, M., Klett, M., & Lindbergh, G. (2022). Improving Li-ion battery parameter estimation by global optimal experiment design. *Journal of Energy Storage*, 56(April). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105948>
- Sudhaparimala, S., & Vaishnavi, M. (2016). Biological synthesis of nano composite SnO₂- ZnO – Screening for efficient photocatalytic degradation and antimicrobial activity. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 2373–2380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.150>

- Surendra, B. S., Swamy, M. M., Shamala, T., Rao, S., Sowmy shree, A. S., Mallikarjuna swamy, C., & Pramila, S. (2022). Development of enhanced electrochemical sensor and antimicrobial studies of ZnO NPs synthesized using green plant extract. *Sensors International*, 3(February), 100176. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100176>
- Tang, R., & Wang, J. (2013). A note on multiple reflections of radiation within CPCs and its effect on calculations of energy collection. *Renewable Energy*, 57, 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.010>
- Tariq, W., Nasir, A., Arslan, C., Rashid, H., Sarmad, M., & Gillani, S. H. (2023). Photocatalytic reduction of highly toxic lead and cadmium from aqueous solution. In A. Ahmad, R. Kumar, & M. Jawaid (Eds.), *Emerging Techniques for Treatment of Toxic Metals from Wastewater* (pp. 399–427). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822880-7.00019-4>
- Tatarchuk, T., Danyliuk, N., Lapchuk, I., Macyk, W., Shyichuk, A., Kutsyk, R., Kotsyubynsky, V., & Boichuk, V. (2022). Oxytetracycline removal and E. Coli inactivation by decomposition of hydrogen peroxide in a continuous fixed bed reactor using heterogeneous catalyst. *Journal of Molecular Liquids*, 366, 120267. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120267>
- Thambiratnam, K., Reduan, S. A., Tiu, Z. C., & Ahmad, H. (2020). Application of two-dimensional materials in fiber laser systems. In *Nano-Optics*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818392-2.00009-3>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tian, M., Su, Y., Zheng, H., Pei, G., & Li, G. (2018). A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. *82*(June 2016), 1272–1296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.050>
- Tutu, E., Atuah, S., Atsu, Y., Fiagbe, K., Yeboah-akowuah, B., Ramde, E., Selasi, A., & Kommey, B. (2022). An Implementation of an optimized dual-axis solar tracking algorithm for concentrating solar power plants deployment. *Scientific African*, 16, e01228. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01228>
- Udom, I., Ram, M. K., Stefanakos, E. K., Hepp, A. F., & Goswami, D. Y. (2013). One dimensional-ZnO nanostructures: Synthesis, properties, and environmental applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 2070–2083. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.06.017>
- Ustaoglu, A., Alptekin, M., Okajima, J., & Maruyama, S. (2016). Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (CPC). *Solar Energy*, 132, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.014>
- Vo, N. T. T., You, S. J., Pham, M. T., & Pham, V. Van. (2023). A green synthesis approach of p-n CuO/ZnO junctions for multifunctional photocatalysis towards the degradation of contaminants. *Environmental Technology and Innovation*, 32, 103285. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103285>
- Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016a). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, 137, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>

- Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016b). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, *137*, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>
- Wang, L., & Yu, J. (2023). Chapter 1 - Principles of photocatalysis. In J. Yu, L. Zhang, L. Wang, & B. Zhu (Eds.), *S-scheme Heterojunction Photocatalysts* (Vol. 35, pp. 1–52). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>
- Wang, X., Li, S., Xie, L., Li, X., Lin, D., & Zhu, Z. (2020). Low-temperature and highly sensitivity H₂S gas sensor based on ZnO/CuO composite derived from bimetal metal-organic frameworks. *Ceramics International*, *46*(10), 15858–15866. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.133>
- Weng, M., Zhang, Z., Okejiri, F., Yan, Y., Lu, Y., Tian, J., Lu, X., Yao, S., & Fu, J. (2021). Encapsulation of CuO nanoparticles within silicalite-1 as a regenerative catalyst for transfer hydrogenation of furfural. *IScience*, *24*(8), 102884. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102884>
- Wetchakun, K., Wetchakun, N., & Sakulsermsuk, S. (2019). An overview of solar/visible light-driven heterogeneous photocatalysis for water purification: TiO₂- and ZnO-based photocatalysts used in suspension photoreactors. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *71*, 19–49. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.025>
- Xiang, Z., Chen, X., Bai, J., Rong, H., Li, H., Zhao, Y., & Huang, X. (2023). A novel anaerobic/aerobic-moving bed-dynamic membrane combined biofilm reactor (A/O-MB-DMBR) treating mariculture wastewater with chitosan (CTS): Performance, control and microbial community. *Environmental Technology and Innovation*, *29*, 103009. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103009>
- Xie, X., Liu, N., Yang, F., Zhang, Q., Zheng, X., Wang, Y., & Liu, J. (2018). Comparative study of antiestrogenic activity of two dyes after Fenton oxidation and biological degradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *164*(February), 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.012>
- Xu, L., Su, J., Zheng, G., & Zhang, L. (2019a). Enhanced photocatalytic performance of porous ZnO thin films by CuO nanoparticles surface modification. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, *248*(January). <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114405>
- Xu, L., Su, J., Zheng, G., & Zhang, L. (2019b). Enhanced photocatalytic performance of porous ZnO thin films by CuO nanoparticles surface modification. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, *248*(August). <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114405>
- Xuan, Q., Li, G., Pei, G., Ji, J., Su, Y., & Zhao, B. (2017). Optimization design and performance analysis of a novel asymmetric compound parabolic concentrator with rotation angle for building application. *Solar Energy*, *158*(August), 808–818. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.029>
- Yin, Z., Ding, Y., Zheng, Q., & Guan, L. (2012). CuO/polypyrrole core-shell nanocomposites as anode materials for lithium-ion batteries. *Electrochemistry Communications*, *20*(1), 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2012.04.005>
- Yu, Y., Liu, N., & Tang, R. (2014). Optical performance of CPCs for concentrating solar radiation on flat receivers with a restricted incidence angle. *Renewable Energy*, *62*, 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.038>
- Zeng, Y., Wang, T., Zhang, S., Wang, Y., & Zhong, Q. (2017). Sol-gel synthesis of CuO-

TiO₂ catalyst with high dispersion CuO species for selective catalytic oxidation of NO. In *Applied Surface Science* (Vol. 411). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.107>

- Zhang, D., Zhang, J., Guo, Z., & Miao, X. (2011). Optical and electrical properties of zinc oxide thin films with low resistivity via Li-N dual-acceptor doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(20), 5962–5968. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.03.028>
- Zyoud, A. H., Zubi, A., Hejjawi, S., Zyoud, S. H., Helal, M. H., Zyoud, S. H., Qamhieh, N., Hajamohideen, A. R., & Hilal, H. S. (2020). Removal of acetaminophen from water by simulated solar light photodegradation with ZnO and TiO₂ nanoparticles: Catalytic efficiency assessment for future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 104038. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104038>

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

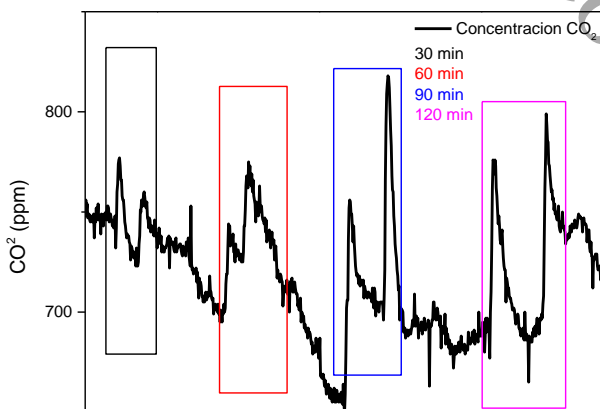
Anexo 1

Medición in situ de CO₂

En la instrumentación electrónica se propuso el uso del sensor MG135 para medir la degradación en el CPC. Este sensor mide el CO₂, las lecturas medidas fueron las mismas en las pruebas del diseño de experimento. En este apartado se realiza la comparación de las mediciones del sensor con respecto a los valores de concentración medidos en un espectrofotómetro UV-Vis.

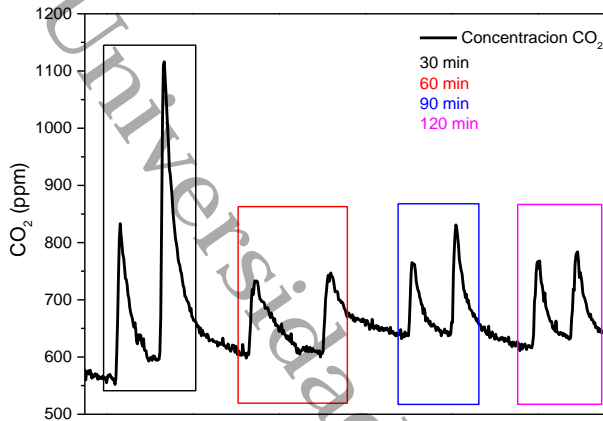
En la Tabla A1 se plasman los valores en partes por millón (ppm) de la concentración de CO₂ y se compara con los datos de la Tabla 20, cada registro de la Tabla A1 corresponde a la distribución de las figuras 71-77 -, es decir el registro de la Tabla A1) corresponde al día 10-07-23, el registro b) corresponde al día 11-07-23 y así sucesivamente.

Tabla A1 comparativa entre el sensor MG135 y un espectrofotómetro UV-vis



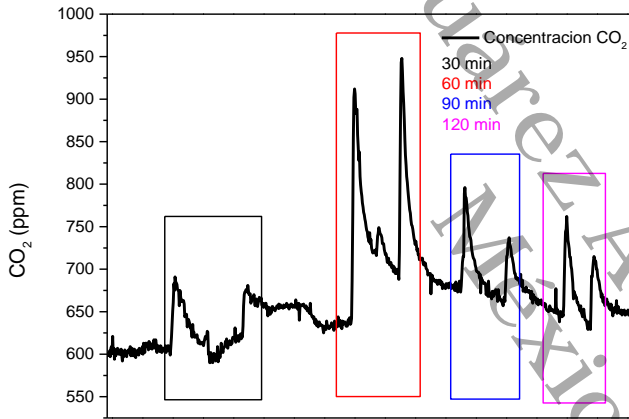
a)

Tiempo	% Degradación
30 min	13.629
60 min	12.118
90 min	14.532
120 min	13.434



b)

Tiempo	% Degradación
30 min	61.746
60 min	96.483
90 min	99.202
120 min	99.622



c)

Tiempo	% Degradación
30 min	15.753
60 min	25.064
90 min	16.374
120 min	16.808

El contenido de la Tabla nos muestra las variaciones de concentración de CO_2 , es un indicativo de la presencia de CO_2 , producto de las reacciones de degradación entre el ZnO/CuO y el contaminante modelo, mostradas en el mecanismo de degradación (4.8.2). Los datos medidos del sensor no son muy precisos tal vez se deba a la calibración, para mejorarlo se recomienda comparar los valores medidos en un equipo TOC (carbón orgánico total), de esa forma se ajustaría la ecuación de calibración en el programa, no obstante, los valores medidos por el sensor son el producto final de la mineralización del contaminante modelo es decir CO_2 .

Anexo


Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN REACTOR CPC FOTOCATALÍTICO AUTOMATIZADO EMPLEANDO ZnO/CuO PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS
Autor de la Tesis:	JOSÉ MAURICIO RODRÍGUEZ VALENCIA
ORCID:	0009-0008-3875-105X
Resumen de la Tesis:	<p>La contaminación en los medios acuosos se incrementa diariamente, los principales contaminantes son los que se clasifican como orgánicos y de entre ellos lo que predominan son los colorantes, estos afectan de forma directa o indirecta a la salud, por lo tanto, se realizan investigaciones para mejorar la calidad del agua.</p> <p>Una alternativa para solucionar la contaminación del agua, son los procesos avanzados de oxidación, como la fotocatalisis, la cual consiste en el uso de un material semiconductor que es irradiado con una fuente de energía para que en la superficie del material se formen radicales hidroxilos y súperóxidos, estos reaccionan con el contaminante y los reduce a CO₂ y H₂O. En este trabajo se obtuvo una interfaz entre el ZnO y CuO, para aprovechar la luz visible del sol y así reducir un contaminante modelo.</p> <p>El CPC es un dispositivo que incrementa la efectividad ZnO/CuO en el proceso de fotocatalisis, por lo tanto, se diseñó y</p>

	<p>construyó un CPC, con un sistema de control al seguidor solar para aprovechar mejor los rayos del sol durante el día, todo esto por medio de instrumentación de electrónica analógica. Esto brinda la ventaja de elementos fáciles de encontrar en el mercado, económicos y fáciles de reemplazar, en caso de daño, para que el equipo funcione y realice la degradación de los contaminantes orgánicos.</p> <p>Se obtuvo las condiciones óptimas del CPC para aumentar la velocidad de degradación del contaminante orgánico en presencia del ZnO/CuO y recirculando dentro del CPC, bajo ciertas condiciones.</p>
Palabras claves de la Tesis:	Degradación de contaminantes, Síntesis, Fotocatálisis, ZnO, CuO, ZnO/CuO, CPC, Seguidor solar, Control, Instrumentación electrónica, Optimización.
Referencias citadas:	<p>Akbar Jan, F., Wajidullah, Ullah, R., Ullah, N., Salman, & Usman, M. (2021). Exploring the environmental and potential therapeutic applications of Myrtus communis L. assisted synthesized zinc oxide (ZnO) and iron doped zinc oxide (Fe-ZnO) nanoparticles. <i>Journal of Saudi Chemical Society</i>, 25(7), 101278. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101278</p> <p>Al-Amayreh, M. I., & Alahmer, A. (2022). On improving the efficiency of hybrid solar lighting and thermal system using dual-axis solar tracking system. <i>Energy Reports</i>, 8, 841–847. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.080</p> <p>Al Baroot, A., Alheshibri, M., Drmosh, Q. A., Akhtar, S., Kotb, E., & Elsayed, K. A. (2022). A novel approach for fabrication ZnO/CuO nanocomposite via laser ablation in liquid and its antibacterial activity: A novel approach for fabrication ZnO/CuO nanocomposite. <i>Arabian Journal of Chemistry</i>, 15(2), 103606. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103606</p> <p>Alarfaj, E., & Subahi, A. (2015). Superlattices and Microstructures The influence of external magnetic field on</p>

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Universiadacharya</p>	<p>the structural and optical properties of nanocrystalline ZnO thin films prepared by dip coating method. <i>SUPERLATTICES AND MICROSTRUCTURES</i>, 86, 508–517. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.08.001</p> <p>Alfragide, E. De, Physics, E., & Studies, E. (1991). <i>B' ~ B A' / 6</i>, 457–466.</p> <p>Ali, I. O., Nady, H., Mohamed, M. I., & Salama, T. M. (2024). Journal of the Indian Chemical Society Fabrication and characterization of ZnO and Ag / ZnO nanoparticles for efficient degradation of crystal violet dye in aqueous solution. <i>Journal of the Indian Chemical Society</i>, 101(12), 101480. https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101480</p> <p>Almehizia, A. A., Al-Omar, M. A., Naglah, A. M., Bhat, M. A., & Al-Shakliah, N. S. (2022). Facile synthesis and characterization of ZnO nanoparticles for studying their biological activities and photocatalytic degradation properties toward methylene blue dye. <i>Alexandria Engineering Journal</i>, 61(3), 2386–2395. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.102</p> <p>Alqahtani, A. Y., Makki, A. A., & Alidrisi, H. M. (2023). Revealing factors influencing classroom noise in the universities teaching and learning environment: A design of experiments approach. <i>Journal of Engineering Research</i>, 11(1), 100009. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100009</p> <p>Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Chapter 6 - Photocatalysis. In S. C. Ameta & R. Ameta (Eds.), <i>Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment</i> (pp. 135–175). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1</p> <p>Arancibia-Bulnes, C. A., Jiménez, A. E., & Estrada, C. A. (2009). Development and Modeling of Solar Photocatalytic Reactors. <i>Advances in Chemical Engineering</i>, 36(09), 185–227. https://doi.org/10.1016/S0065-2377(09)00406-2</p> <p>Arronte G.R. (2017). <i>No Title. ¿Cuánta Agua Hay En El Planeta?</i> https://agua.org.mx/en-el-planeta/</p> <p>Arte, E. D. E. L. (n.d.). <i>Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte. May 2014.</i></p> <p>Ávila-López, M. A., Gavrielides, S., Luo, X., Ojoajogwu, A. E., Tan, J. Z. Y., Luévano-Hipólito, E., Torres-Martínez, L. M., & Maroto-Valer, M. M. (2021). Comparative study of CO₂photoreduction using different conformations of CuO photocatalyst: Powder, coating on mesh and thin film. <i>Journal of CO₂ Utilization</i>, 50(June), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101588</p> <p>Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C.,</p>
--	---

	<p>Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. <i>Energy Reports</i>, 6, 392–405. https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.004</p> <p>Balamurugan, B., & Mehta, B. R. (2001). Optical and structural properties of nanocrystalline copper oxide thin films prepared by activated reactive evaporation. <i>Thin Solid Films</i>, 396(1–2), 90–96. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01216-0</p> <p>Behera, G. C., Rani, S., Khatun, N., Rath, J. K., & Roy, S. C. (2022). WS2 nanosheets functionalized Fe₂O₃ nanorod arrays as a type II heterojunction for photoelectrochemical water splitting. <i>Applied Surface Science Advances</i>, 11(August), 100293. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100293</p> <p>Benaboud, A., Zaabat, M., Aida, M. S., Boudine, B., & Benzitouni, S. (2017). Optik Fe₂O₄ / ZnO-nanowires synthesis by dip-coating for Orange II-dye photodegradation. <i>Optik - International Journal for Light and Electron Optics</i>, 144, 397–405. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.06.108</p> <p>Benally, C., Messele, S. A., & Gamal El-Din, M. (2019). Adsorption of organic matter in oil sands process water (OSPW) by carbon xerogel. <i>Water Research</i>, 154, 402–411. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.053</p> <p>Bendicho, C., Lavilla, I., & Vigo, U. De. (2017). Sewage ☆ <i>Chemical Pollutants in Sewage</i>. August, 300–307. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11519-7</p> <p>Bharathi, P., Harish, S., Archana, J., Navaneethan, M., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Shimomura, M., & Hayakawa, Y. (2019a). Enhanced charge transfer and separation of hierarchical CuO/ZnO composites: The synergistic effect of photocatalysis for the mineralization of organic pollutant in water. <i>Applied Surface Science</i>, 484(March), 884–891. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.131</p> <p>Bharathi, P., Harish, S., Archana, J., Navaneethan, M., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Shimomura, M., & Hayakawa, Y. (2019b). Enhanced charge transfer and separation of hierarchical CuO/ZnO composites: The synergistic effect of photocatalysis for the mineralization of organic pollutant in water. <i>Applied Surface Science</i>, 484(March), 884–891. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.131</p> <p>Bolton, W. (2013). Mecatrónica sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánico y electrónico. In <i>Alfaomega</i> (Vol.</p>
--	--

	<p>53, Issue 9). http://etm2021.com/sbiblioteca/Libros/AUTOMATIZACION Y CONTROL/MECATRONICA Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 5ta Edición - W. BOLTON -.pdf</p> <p>Bora, L. V., & Mewada, R. K. (2017). Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: Fundamentals, mechanisms and parametric review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, 76(January), 1393–1421. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.130</p> <p>Calatayud-Vernich, P., VanEngelsdorp, D., & Picó, Y. (2019). Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. <i>MethodsX</i>, 6(April), 980–985. https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022</p> <p>Castañeda, C., Martínez, J. J., Santos, L., Rojas, H., Osman, S. M., Gómez, R., & Luque, R. (2022). Caffeine photocatalytic degradation using composites of NiO/TiO₂-F and CuO/TiO₂-F under UV irradiation. <i>Chemosphere</i>, 288. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132506</p> <p>Castner, D. G., & Ratner, B. D. (2018). Proteins Controlled With Precision at Organic, Polymeric, and Biopolymer Interfaces for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. In <i>Principles of Regenerative Medicine</i>. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809880-6.00031-X</p> <p>Chabane, L., Zebbar, N., Kechouane, M., Aida, M. S., & Trari, M. (2016). Al-doped and in-doped ZnO thin films in heterojunctions with silicon. <i>Thin Solid Films</i>, 605, 57–63. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.10.063</p> <p>Chakraborty, U., Kaur, G., Rubahn, H., & Kaushik, A. (2023). Progress in Materials Science Advanced metal oxides nanostructures to recognize and eradicate water pollutants. <i>Progress in Materials Science</i>, 139(July), 101169. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101169</p> <p>Chang, Y. C. (2016). Low temperature and large-scale growth of ZnO nanoneedle arrays with enhanced optical and surface-enhanced Raman scattering properties. <i>Sensors and Actuators, B: Chemical</i>, 225, 498–503. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.053</p> <p>Chen, K. J., Hung, F. Y., Chang, S. J., & Young, S. J. (2009). Optoelectronic characteristics of UV photodetector based on ZnO nanowire thin films. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, 479(1–2), 674–677. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.01.026</p> <p>Cleaning, P. (2007). Particulate Cleaning. <i>Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces</i>, 885–928. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-51664-0.50027-9</p>
--	--

	<p>Das, M. (2021). Exploration of the effect of two-axis PLC solar tracking system on the thermal performance of solar air collector. <i>Case Studies in Thermal Engineering</i>, 28, 101692. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101692</p> <p>de Assumpção Pereira-da-Silva, M., & Ferri, F. A. (2017). Scanning Electron Microscopy. In <i>Nanocharacterization Techniques</i>. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00001-1</p> <p>de la Cruz, C., León, C., Mandujano, J., Cáceres, R., & Rojas, I. (2012). Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos. <i>Apuntes de Ciencia & Sociedad</i>, 02(02), 89–100. https://doi.org/10.18259/acs.2012011</p> <p>Di Capua, G., Femia, N., Migliaro, M., Sacco, O., Sannino, D., Stoyka, K., & Vaiano, V. (2017). Intensification of a flat-plate photocatalytic reactor performances by innovative visible light modulation techniques: A proof of concept. <i>Chemical Engineering and Processing: Process Intensification</i>, 118(February), 117–123. https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.05.004</p> <p>Diaz-Angulo, J., Lara-Ramos, J., Mueses, M., Hernández-Ramírez, A., Li Puma, G., & Machuca-Martínez, F. (2020). Enhancement of the oxidative removal of diclofenac and of the TiO₂ rate of photon absorption in dye-sensitized solar pilot scale CPC photocatalytic reactors. <i>Chemical Engineering Journal</i>, 381(January 2019), 122520. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122520</p> <p>Dib, K., Brahimi, R., Bessekhoud, Y., Tayebi, N., & Trari, M. (2016). Structural, optical and transport properties of SxZnO. <i>Materials Science in Semiconductor Processing</i>, 48, 52–59. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.03.010</p> <p>Dikra, B., Fellah, M., Barille, R., Weiß, S., Abdul Samad, M., Alburaikan, A., Abd El-Wahed khalifa, H., & Obrosof, A. (2024). Improvement of photocatalytic performance and sensitive ultraviolet photodetectors using AC-ZnO/ZC-Ag₂O/AZ-CuO multilayers nanocomposite prepared by spin coating method. <i>Journal of Science: Advanced Materials and Devices</i>, 9(1), 100642. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100642</p> <p>Ed, M. H., Jr, J. S. H., Yuen, H., Bank, S., Wistey, M., Lordi, V., & Gugov, T. (2005). <i>MBE Growth and Characterization of Long Wavelength Dilute Nitride III-V Alloys</i>. ELECTRONICS, H. (n.d.). No Title. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf</p> <p>Fang, G., Liu, J., Wu, J., Li, M., Yan, X., & Wang, D. (2019). A</p>
---	--

	<p>generic strategy for preparation of TiO₂/Bi_xMyO_z (M = W, Mo) heterojunctions with enhanced photocatalytic activities. <i>Applied Surface Science</i>, 475(September 2018), 785–792. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.297</p> <p>Fouda, A., Salem, S. S., Wassel, A. R., Hamza, M. F., & Shaheen, T. I. (2020). Optimization of green biosynthesized visible light active CuO/ZnO nano-photocatalysts for the degradation of organic methylene blue dye. <i>Heliyon</i>, 6(9), e04896. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04896</p> <p>Ghasempour-Mouziraji, M., Lagarinhos, J., Afonso, D., & Alves de Sousa, R. (2024). A review study on metal powder materials and processing parameters in Laser Metaleposition. <i>Optics and Laser Technology</i>, 170(August 2023), 110226. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110226</p> <p>Ghassoul, M. (2018). Single axis automatic tracking system based on PILOT scheme to control the solar panel to optimize solar energy extraction. <i>Energy Reports</i>, 4, 520–527. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.07.001</p> <p>Ghassoul, M. (2021). A dual solar tracking system based on a light to frequency converter using a microcontroller. <i>Fuel Communications</i>, 6, 100007. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2020.100007</p> <p>Gindose, T. G., Atisme, T. B., Gebreslassie, G., Gebresilassie, A. B., & Zereffa, E. A. (2024). A poly-vinyl alcohol aided multiphase Z-scheme ZnO-Agl-CuO nanocomposite as an efficient photocatalyst for dye photodegradation. <i>Materials Advances</i>, 5(20). https://doi.org/10.1039/d4ma00357h</p> <p>Giri, I., K.C., R., & Khadka, U. R. (2022). <i>Chapter 23 - Water quality status in Bagmati river of Kathmandu valley, Nepal</i> (S. Madhav, S. Kanhaiya, A. Srivastav, V. Singh, & P. B. T.-E. S. of R. E. Singh (eds.); pp. 481–502). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00017-0</p> <p>Gonon, M. (2021). Case Studies in the X-ray Diffraction of Ceramics. In M. Pomeroy (Ed.), <i>Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses</i> (pp. 560–577). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00005-9</p> <p>Goodarzi, M. T., & Eshghi, H. (2018). Fabrication and characterization of CuO/ZnO:Al photo-diode prepared by spray pyrolysis method. <i>Materials Letters</i>, 215, 79–82. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.018</p> <p>Gutiérrez, Pulido Humberto de la Vara Salazar, R. (2008). <i>ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS</i> (R. A. del B. Alayón (ed.); Segunda). McGRAW-HILL.</p>
--	---

haq, M. ul, Iqbal, M., Sial, M. A. Z. G., Shabbir, S., Siddiq, M., & Iqbal, A. (2017). Effect of Fe doping on the crystallinity of CuO nanotubes and the efficiency of the hybrid solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 335, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.11.020>

Harish, S., Archana, J., Sabarinathan, M., Navaneethan, M., Nisha, K. D., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C., Ikeda, H., Aswal, D. K., & Hayakawa, Y. (2017). Controlled structural and compositional characteristic of visible light active ZnO/CuO photocatalyst for the degradation of organic pollutant. *Applied Surface Science*, 418, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.082>

Hieu, C., Fu, C., & Juang, R. (2018). Degradation of methylene blue and methyl orange by palladium- doped TiO₂ photocatalysis for water reuse : Ef fi ciency and degradation pathways. *Journal of Cleaner Production*, 202, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.110>

Hlongwane, G. N., Sekoai, P. T., Meyyappan, M., & Moothi, K. (2019). Simultaneous removal of pollutants from water using nanoparticles: A shift from single pollutant control to multiple pollutant control. *Science of the Total Environment*, 656, 808–833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.257>

Hualpa-Cutipa, E., Acosta, R. A. S., Sangay-Tucto, S., Beingolea, X. G. M., Gutierrez, G. T., & Zabarrburú, I. N. (2022). Chapter 15 - Recent trends for treatment of environmental contaminants in wastewater: An integrated valorization of industrial wastewater. In V. Kumar & M. Kumar (Eds.), *Integrated Environmental Technologies for Wastewater Treatment and Sustainable Development* (pp. 337–368). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91180-1.00007-7>

Huang, L., Peng, F., & Ohuchi, F. S. (2009). “In situ” XPS study of band structures at Cu₂O/TiO₂ heterojunctions interface. *Surface Science*, 603(17), 2825–2834. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2009.07.030>

Ievtushenko, A., Karpyna, V., Eriksson, J., Tsiaoussis, I., Shteplyuk, I., Lashkarev, G., Yakimova, R., & Khranovskyy, V. (2018). Effect of Ag doping on the structural, electrical and optical properties of ZnO grown by MOCVD at different substrate temperatures. *Superlattices and Microstructures*, 117, 121–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.03.029>

Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W.,

	<p>Panupintu, S., & Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. <i>Sustainable Energy Technologies and Assessments</i>, 37(October 2019), 100618. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618</p> <p>Jarlborg, T. (2007). Effects of spin-phonon interaction within the CuO plane of high-TCsuperconductors. <i>Physica C: Superconductivity and Its Applications</i>, 454(1–2), 5–14. https://doi.org/10.1016/j.physc.2006.12.019</p> <p>Jiang, Y., Choi, C., Hong, S., Chu, S., Wu, T. S., Soo, Y. L., Hao, L., Jung, Y., & Sun, Z. (2021a). Enhanced electrochemical CO₂ reduction to ethylene over CuO by synergistically tuning oxygen vacancies and metal doping. <i>Cell Reports Physical Science</i>, 2(3), 100356. https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100356</p> <p>Jiang, Y., Choi, C., Hong, S., Chu, S., Wu, T. S., Soo, Y. L., Hao, L., Jung, Y., & Sun, Z. (2021b). Enhanced electrochemical CO₂ reduction to ethylene over CuO by synergistically tuning oxygen vacancies and metal doping. <i>Cell Reports Physical Science</i>, 2(3), 100356. https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100356</p> <p>Kalaiyan, G., Suresh, S., Prabu, K. M., Thambidurai, S., Kandasamy, M., Pugazhenthiran, N., Kumar, S. K., & Muneeswaran, T. (2020). ur n Pr pr oo. <i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>, 104847. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129366</p> <p>Karchiyappan, T., & Karri, R. R. (2021). Chapter 21 - Process Optimization and Modeling of Hydraulic Fracturing Process Wastewater Treatment Using Aerobic Mixed Microbial Reactor via Response Surface Methodology (R. R. Karri, G. Ravindran, & M. H. B. T.-S. C. T. in S. W. and W. M. Dehghani (eds.); pp. 351–363). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00023-9</p> <p>Khan, H., Rigamonti, M. G., Patience, G. S., & Boffito, D. C. (2018). Spray dried TiO₂/WO₃ heterostructure for photocatalytic applications with residual activity in the dark. <i>Applied Catalysis B: Environmental</i>, 226, 311–323. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.049</p> <p>Khan, M. M. (2023). Chapter 1 - Introduction of photocatalysis and photocatalysts. In M. Mansoob Khan (Ed.), <i>Theoretical Concepts of Photocatalysis</i> (pp. 1–13). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95191-3.00005-5</p> <p>Korres, D., & Tzivanidis, C. (2018). A new mini-CPC with a U-type evacuated tube under thermal and optical</p>
--	--

<p style="font-size: 2em; opacity: 0.1; transform: rotate(-45deg); position: absolute; top: 50%; left: 50%; pointer-events: none;">Universiadak</p>	<p>investigation. <i>Renewable Energy</i>, 128, 529–540. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.054</p> <p>Kroemer, H. (2002). Barrier control and measurements: Abrupt semiconductor heterojunctions. <i>Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures</i>, 2(3), 433. https://doi.org/10.1116/1.582890</p> <p>Kumaresan, N., Sinthiya, M. M. A., Ramamurthi, K., Ramesh Babu, R., & Sethuraman, K. (2020). Visible light driven photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposites coupled with rGO heterostructures synthesized by solid-state method for RhB dye degradation. <i>Arabian Journal of Chemistry</i>, 13(2), 3910–3928. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.03.002</p> <p>Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. <i>Results in Surfaces and Interfaces</i>, 11(May), 100122. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122</p> <p>Li, D., Qin, L., Zhao, P., Zhang, Y., Liu, D., Liu, F., Kang, B., Wang, Y., Song, H., Zhang, T., & Lu, G. (2018). Preparation and gas-sensing performances of ZnO/CuO rough nanotubular arrays for low-working temperature H₂S detection. <i>Sensors and Actuators, B: Chemical</i>, 254, 834–841. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.06.110</p> <p>Li, R., Du, J., Luan, Y., Xue, Y., Zou, H., Zhuang, G., & Li, Z. (2012). Ionic liquid precursor-based synthesis of CuO nanoplates for gas sensing and amperometric sensing applications. <i>Sensors and Actuators, B: Chemical</i>, 168, 156–164. https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.03.079</p> <p>Li, X., Dai, Y. J., Li, Y., & Wang, R. Z. (2013). Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber. <i>Solar Energy</i>, 93, 220–234. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.002</p> <p>Ma, L., Ai, X., Jiang, W., Liu, P., Chen, Y., Lu, K., Song, X., & Wu, X. (2022). Zn/Ce metal-organic framework-derived ZnO@CeO₂ nano-heterojunction for enhanced photocatalytic activity. <i>Colloids and Interface Science Communications</i>, 49(June), 100636. https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100636</p> <p>Mahato, B. N., Krithiga, T., & Mary Thangam, M. A. (2021). Rapid adsorption of As(V) from aqueous solution by ZnO embedded in mesoporous aluminosilicate nanocomposite adsorbent: Parameter optimization, kinetic, and isotherms studies. <i>Surfaces and Interfaces</i>, 23(V), 100636. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100636</p> <p>Mardikar, S. P., Kulkarni, S., & Adhyapak, P. V. (2018). Sunlight</p>
---	---

	<p>driven highly efficient degradation of methylene blue by CuO-ZnO nanoflowers. <i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>, August. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.033</p> <p>Martínez, S., Morales-Mejía, J. C., Hernández, P. P., Santiago, L., & Almanza, R. (2014). Solar photocatalytic oxidation of Triclosan with TiO₂ immobilized on volcanic porous stones on a CPC pilot scale reactor. <i>Energy Procedia</i>, 57(55), 3014–3020. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.337</p> <p>Mathur, P., Sanyal, D., & Das, R. K. (2021). Chapter 24 - Treatment of pharmaceutical and personal care products in wastewater. In M. Shah, S. Rodriguez-Couto, & K. Mehta (Eds.), <i>The Future of Effluent Treatment Plants</i> (pp. 451–474). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822956-9.00024-6</p> <p>Morkoç, H., & Özgür, Ü. (2009). Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. In <i>Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology</i>. https://doi.org/10.1002/9783527623945</p> <p>Mpodi, E. K., Tjiparuro, Z., & Matsebe, O. (2019). Review of dual axis solar tracking and development of its functional model. <i>Procedia Manufacturing</i>, 35, 580–588. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.082</p> <p>Mubeen, K., Irshad, A., Safeen, A., Aziz, U., Safeen, K., Ghani, T., Khan, K., Ali, Z., ul Haq, I., & Shah, A. (2023). Band structure tuning of ZnO/CuO composites for enhanced photocatalytic activity. <i>Journal of Saudi Chemical Society</i>, 27(3), 101639. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2023.101639</p> <p>Muchuweni, E., Sathiaraj, T. S., & Nyakoty, H. (2017). Materials Science in Semiconductor Processing Low temperature synthesis of ZnO nanowires on GAZO thin fi lms annealed at di ff erent temperatures for solar cell application. <i>Materials Science in Semiconductor Processing</i>, 68(February), 80–86. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.06.011</p> <p>Munanga, P., Chinguwa, S., & Nyemba, W. R. (2020). Design for manufacture and assembly of an intelligent single axis solar tracking system. <i>Procedia CIRP</i>, 91, 571–576. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.109</p> <p>Munguti, L., & Dejene, F. (2020). Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties of ZnO–TiO₂ composites for application in dye removal in water. <i>Nano-Structures and Nano-Objects</i>, 24, 100594. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100594</p> <p>Nti, E. K., Cobbina, S. J., Attafuah, E. E., Senanu, L. D., Amenyeku, G., Gyan, M. A., Forson, D., & Safo, A. R.</p>
--	---

	<p>(2023). Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. <i>Heliyon</i>, 9(7), e18170. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18170</p> <p>Ochoa-Gutiérrez, K. S., Tabares-Aguilar, E., Mueses, M. Á., Machuca-Martínez, F., & Li Puma, G. (2018). A Novel Prototype Offset Multi Tubular Photoreactor (OMTP) for solar photocatalytic degradation of water contaminants. <i>Chemical Engineering Journal</i>, 341(July 2017), 628–638. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.068</p> <p>Okpara, E. C., Olatunde, O. C., Wojuola, O. B., & Onwudiwe, D. C. (2023). Applications of Transition Metal Oxides and Chalcogenides and their Composites in Water Treatment: a review. <i>Environmental Advances</i>, 11(January), 100341. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100341</p> <p>Oku, T., Motoyoshi, R., Fujimoto, K., Akiyama, T., Jeyadevan, B., & Cuya, J. (2011). Structures and photovoltaic properties of copper oxides/fullerene solar cells. <i>Journal of Physics and Chemistry of Solids</i>, 72(11), 1206–1211. https://doi.org/10.1016/j.jpics.2011.06.014</p> <p>Oluwafemi, O. S., Sakho, E. H. M., Parani, S., & Lebepe, T. C. (2021). Chapter Five - Characterization techniques for ternary I–III–VI quantum dots. In O. S. Oluwafemi, E. H. M. Sakho, S. Parani, & T. C. Lebepe (Eds.), <i>Ternary Quantum Dots</i> (pp. 117–135). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818303-8.00007-1</p> <p>Oseghe, E. O., Guba, F., Misra, A., & Ziegenbalg, D. (2023). Article A scalable flow device for the removal of organic and inorganic pollutants from water A scalable flow device for the removal of organic and inorganic pollutants from water. <i>Device</i>, 1(2), 100020. https://doi.org/10.1016/j.device.2023.100020</p> <p>Otálvaro-marín, H. L., Angel, M., Crittenden, J. C., & Machuca-martinez, F. (2017). <i>Solar photoreactor design by the photon path length and optimization of the radiant field in a TiO₂-based CPC reactor</i>. 315, 283–295. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.019</p> <p>Patel, R., & Kumar, V. (2015). Artificial Neuro Fuzzy Logic PID Controller based on BF-PSO Algorithm. <i>Procedia Computer Science</i>, 54, 463–471. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.053</p> <p>Patil, D., Manjanna, J., Chikkamath, S., Uppar, V., & Chougala, M. (2021). Facile synthesis of stable Cu and CuO particles for 4-nitrophenol reduction, methylene blue</p>
--	--

	<p>photodegradation and antibacterial activity. <i>Journal of Hazardous Materials Advances</i>, 4(November), 100032. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100032</p> <p>Pearton, S. J., Norton, D. P., Ip, K., Heo, Y. W., & Steiner, T. (2005). Recent progress in processing and properties of ZnO. <i>Progress in Materials Science</i>, 50(3), 293–340. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.04.001</p> <p>Pérez-González, M., Tomás, S. A., Santoyo-Salazar, J., Gallardo-Hernández, S., Tellez-Cruz, M. M., & Solorza-Feria, O. (2019a). Sol-gel synthesis of Ag-loaded TiO₂-ZnO thin films with enhanced photocatalytic activity. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, 779, 908–917. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.302</p> <p>Pérez-González, M., Tomás, S. A., Santoyo-Salazar, J., Gallardo-Hernández, S., Tellez-Cruz, M. M., & Solorza-Feria, O. (2019b). Sol-gel synthesis of Ag-loaded TiO₂-ZnO thin films with enhanced photocatalytic activity. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, 779, 908–917. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.302</p> <p>Phys, J. A., & Amin, B. (2019). <i>Van der Waals heterostructures of P , BSe , and SiC monolayers Van der Waals heterostructures of P , BSe , and SiC monolayers</i>. 094301(February). https://doi.org/10.1063/1.5082884</p> <p>Polini, A., & Yang, F. (2017). Physicochemical characterization of nanofiber composites. In <i>Nanofiber Composites for Biomedical Applications</i>. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100173-8.00005-3</p> <p>Priya, T., Mishra, B. K., & Prasad, M. N. V. (2020). <i>Chapter 2 - Physico-chemical techniques for the removal of disinfection by-products precursors from water</i> (M. N. V. B. T.-D. B. in D. W. Prasad (ed.); pp. 23–58). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102977-0.00002-0</p> <p>Ramakrishnegowda, D. H., Chandrakantha, K. S., Urs, D., Elfeky, M., Krishnegowda, J., Rangappa, S., Rangappa, K. S., & Shivanna, S. (2023). Synthesis of p-CuO/n-ZnO heterostructure by microwave hydrothermal method and evaluation of its photo and bio-catalytic performance. <i>Heliyon</i>, 9(12), e22758. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22758</p> <p>Rawat, A., Jha, S. K., & Kumar, B. (2020). Position controlling of Sun Tracking System using optimization technique. <i>Energy Reports</i>, 6, 304–309. https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.079</p> <p>Ren, Y., Zhao, L., Jing, D., & Guo, L. (2016). ScienceDirect Investigation and modeling of CPC based tubular</p>
--	---

	<p>photocatalytic reactor for scaled-up hydrogen production. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i>, 41(36), 16019–16031. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.225</p> <p>Rogalski, M. S., & Palmer, S. B. (2014). Solid state physics. In <i>Solid State Physics</i>. https://doi.org/10.1201/9781482283037</p> <p>Román-Ramírez, L. A., & Marco, J. (2022). Design of experiments applied to lithium-ion batteries: A literature review. <i>Applied Energy</i>, 320(August 2021). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119305</p> <p>Ruangon, K., Khamon, W., & Pecharapa, W. (2018). ScienceDirect Influence of baking temperature on relevant properties of sol-gel Ga-doped ZnO thin films annealed at low temperature. <i>Materials Today: Proceedings</i>, 5(6), 14155–14159. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.082</p> <p>Sahu, K., Bisht, A., Kuriakose, S., & Mohapatra, S. (2020). Two-dimensional CuO-ZnO nanohybrids with enhanced photocatalytic performance for removal of pollutants. <i>Journal of Physics and Chemistry of Solids</i>, 137(July 2019), 109223. https://doi.org/10.1016/j.jpics.2019.109223</p> <p>Samad, A., Furukawa, M., Katsumata, H., Suzuki, T., & Kaneco, S. (2016). Photocatalytic oxidation and simultaneous removal of arsenite with CuO/ZnO photocatalyst. <i>Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry</i>, 325, 97–103. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.03.035</p> <p>Sanakousar, M. F., C.C, V., Jiménez-Pérez, V. M., Jayanna, B. K., Mounesh, Shridhar, A. H., & Prakash, K. (2021). Efficient photocatalytic degradation of crystal violet dye and electrochemical performance of modified MWCNTs/Cd-ZnO nanoparticles with quantum chemical calculations. <i>Journal of Hazardous Materials Advances</i>, 2(June), 100004. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100004</p> <p>Sangeeta, M., Karthik, K. V, Ravishankar, R., Anantharaju, K. S., Nagabhushana, H., Jeetendra, K., Vidya, Y. S., & Renuka, L. (2017). Synthesis of ZnO, MgO and ZnO/MgO by Solution Combustion Method: Characterization and Photocatalytic Studies. <i>Materials Today: Proceedings</i>, 4(11, Part 3), 11791–11798. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.096</p> <p>Sapawe, N., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Sah, R. N. R. A., Jusoh, N. W. C., Hairom, N. H. H., & Efendi, J. (2013). Electrochemical strategy for grown ZnO nanoparticles deposited onto HY zeolite with enhanced photodecolorization of methylene blue: Effect of the formation of SiOZn bonds. <i>Applied Catalysis A: General</i>, 456, 144–158. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.02.025</p>
--	--

<p style="font-size: 2em; opacity: 0.1; transform: rotate(-45deg);">Universitas</p>	<p>Saravanan, R., Karthikeyan, S., Gupta, V. K., Sekaran, G., Narayanan, V., & Stephen, A. (2013). Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination. <i>Materials Science and Engineering: C</i>, 33(1), 91–98. https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.08.011</p> <p>Sathishkumar, P., Sweena, R., Wu, J. J., & Anandan, S. (2011). Synthesis of CuO-ZnO nanophotocatalyst for visible light assisted degradation of a textile dye in aqueous solution. <i>Chemical Engineering Journal</i>, 171(1), 136–140. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.074</p> <p>Sathyakumar, N., Prasath Balaji, K., Ganapathi, R., & Pandian, S. R. (2018). A Build-Your-Own Three Axis CNC PCB Milling Machine. <i>Materials Today: Proceedings</i>, 5(11), 24404–24413. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.236</p> <p>Shetty, D., & Prabhu, N. (2017). Ziegler Nichols method based Robust reactive current controller for STATCOM. <i>Energy Procedia</i>, 117, 543–550. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.143</p> <p>Shubha, J. P., Kavalli, K., Adil, S. F., Assal, M. E., Hatshan, M. R., & Dubasi, N. (2022). Facile green synthesis of semiconductive ZnO Nanoparticles for photocatalytic degradation of dyes from the textile industry: A kinetic approach. <i>Journal of King Saud University - Science</i>, 34(5), 102047. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102047</p> <p>Shubha, J. P., Roopashree, B., Patil, R. C., Khan, M., Shaik, M. R., Alaqarbeh, M., Alwarthan, A., Mahmoud Karami, A., & Adil, S. F. (2023). Facile synthesis of ZnO/CuO/Eu heterostructure photocatalyst for the degradation of industrial effluent. <i>Arabian Journal of Chemistry</i>, 16(3), 104547. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104547</p> <p>Singh, M. K., & Singh, A. (2022). Chapter 17 - Scanning electron microscope. In M. K. Singh & A. Singh (Eds.), <i>Characterization of Polymers and Fibres</i> (pp. 387–419). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823986-5.00008-7</p> <p>Skromme, B. J., & Sujan, G. K. (2018). Semiconductor Heterojunctions. <i>Reference Module in Materials Science and Materials Engineering</i>. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11219-6</p> <p>Smazna, D., Shree, S., Polonskyi, O., Lamaka, S., & Baum, M. (2019). Mutual interplay of ZnO micro- and nanowires and methylene blue during cyclic photocatalysis process. <i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>, 7(2),</p>
---	--

<p style="text-align: center; opacity: 0.5; font-size: 2em; transform: rotate(-45deg);">Universidade Federal do Rio de Janeiro</p>	<p>103016. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103016</p> <p>Song, K. (2017). Interphase characterization in rubber nanocomposites. In <i>Progress in Rubber Nanocomposites</i> (Issue ii). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00004-8</p> <p>Srinivasan, R. (2023). A sustainable and cyclic metal organic framework-driven Fenton process for efficient removal of methylene blue. <i>Inorganic Chemistry Communications</i>, 156, 111209. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111209</p> <p>Streb, M., Ohrelus, M., Klett, M., & Lindbergh, G. (2022). Improving Li-ion battery parameter estimation by global optimal experiment design. <i>Journal of Energy Storage</i>, 56(April). https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105948</p> <p>Sudhaparimala, S., & Vaishnavi, M. (2016). Biological synthesis of nano composite SnO₂- ZnO – Screening for efficient photocatalytic degradation and antimicrobial activity. <i>Materials Today: Proceedings</i>, 3(6), 2373–2380. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.150</p> <p>Surendra, B. S., Swamy, M. M., Shamala, T., Rao, S., Sowmy shree, A. S., Mallikarjuna swamy, C., & Pramila, S. (2022). Development of enhanced electrochemical sensor and antimicrobial studies of ZnO NPs synthesized using green plant extract. <i>Sensors International</i>, 3(February), 100176. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100176</p> <p>Tang, R., & Wang, J. (2013). A note on multiple reflections of radiation within CPCs and its effect on calculations of energy collection. <i>Renewable Energy</i>, 57, 490–496. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.010</p> <p>Tariq, W., Nasir, A., Arslan, C., Rashid, H., Sarmad, M., & Gillani, S. H. (2023). Photocatalytic reduction of highly toxic lead and cadmium from aqueous solution. In A. Ahmad, R. Kumar, & M. Jawaid (Eds.), <i>Emerging Techniques for Treatment of Toxic Metals from Wastewater</i> (pp. 399–427). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822880-7.00019-4</p> <p>Tatarchuk, T., Danyliuk, N., Lapchuk, I., Macyk, W., Shyichuk, A., Kutsyk, R., Kotsyubynsky, V., & Boichuk, V. (2022). Oxytetracycline removal and E. Coli inactivation by decomposition of hydrogen peroxide in a continuous fixed bed reactor using heterogeneous catalyst. <i>Journal of Molecular Liquids</i>, 366, 120267. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120267</p> <p>Thambiratnam, K., Reduan, S. A., Tiu, Z. C., & Ahmad, H. (2020). Application of two-dimensional materials in fiber laser systems. In <i>Nano-Optics</i>. Elsevier Inc.</p>
--	---

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818392-2.00009-3>
 Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

Tian, M., Su, Y., Zheng, H., Pei, G., & Li, G. (2018). *A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications*. 82(June 2016), 1272–1296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.050>

Tutu, E., Atuah, S., Atsu, Y., Fiagbe, K., Yeboah-akowuah, B., Ramde, E., Selasi, A., & Kommey, B. (2022). An Implementation of an optimized dual-axis solar tracking algorithm for concentrating solar power plants deployment. *Scientific African*, 16, e01228. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01228>

Udom, I., Ram, M. K., Stefanakos, E. K., Hepp, A. F., & Goswami, D. Y. (2013). One dimensional-ZnO nanostructures: Synthesis, properties and environmental applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 2070–2083. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.06.017>

Ustaoglu, A., Alptekin, M., Okajima, J., & Maruyama, S. (2016). Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (CPC). *Solar Energy*, 132, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.014>

Vo, N. T. T., You, S. J., Pham, M. T., & Pham, V. Van. (2023). A green synthesis approach of p-n CuO/ZnO junctions for multifunctional photocatalysis towards the degradation of contaminants. *Environmental Technology and Innovation*, 32, 103285. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103285>

Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016a). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, 137, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>

Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016b). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, 137, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>

Wang, L., & Yu, J. (2023). Chapter 1 - Principles of photocatalysis. In J. Yu, L. Zhang, L. Wang, & B. Zhu (Eds.), *S-scheme Heterojunction Photocatalysts* (Vol. 35, pp. 1–52). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0->

	<p>443-18786-5.00002-0</p> <p>Wang, X., Li, S., Xie, L., Li, X., Lin, D., & Zhu, Z. (2020). Low-temperature and highly sensitivity H₂S gas sensor based on ZnO/CuO composite derived from bimetal metal-organic frameworks. <i>Ceramics International</i>, <i>46</i>(10), 15858–15866. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.133</p> <p>Weng, M., Zhang, Z., Okejiri, F., Yan, Y., Lu, Y., Tian, J., Lu, X., Yao, S., & Fu, J. (2021). Encapsulation of CuO nanoparticles within silicalite-1 as a regenerative catalyst for transfer hydrogenation of furfural. <i>IScience</i>, <i>24</i>(8), 102884. https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102884</p> <p>Wetchakun, K., Wetchakun, N., & Sakulsermsuk, S. (2019). An overview of solar/visible light-driven heterogeneous photocatalysis for water purification: TiO₂- and ZnO-based photocatalysts used in suspension photoreactors. <i>Journal of Industrial and Engineering Chemistry</i>, <i>71</i>, 19–49. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.025</p> <p>Xiang, Z., Chen, X., Bai, J., Rong, H., Li, H., Zhao, Y., & Huang, X. (2023). A novel anaerobic/aerobic-moving bed-dynamic membrane combined biofilm reactor (A/O-MB-DMBR) treating mariculture wastewater with chitosan (CTS): Performance, control and microbial community. <i>Environmental Technology and Innovation</i>, <i>29</i>, 103009. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103009</p> <p>Xie, X., Liu, N., Yang, F., Zhang, Q., Zheng, X., Wang, Y., & Liu, J. (2018). Comparative study of antiestrogenic activity of two dyes after Fenton oxidation and biological degradation. <i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>, <i>164</i>(February), 416–424. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.012</p> <p>Xu, L., Su, J., Zheng, G., & Zhang, L. (2019a). Enhanced photocatalytic performance of porous ZnO thin films by CuO nanoparticles surface modification. <i>Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology</i>, <i>248</i>(January). https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114405</p> <p>Xu, L., Su, J., Zheng, G., & Zhang, L. (2019b). Enhanced photocatalytic performance of porous ZnO thin films by CuO nanoparticles surface modification. <i>Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology</i>, <i>248</i>(August). https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114405</p> <p>Xuan, Q., Li, G., Pei, G., Ji, J., Su, Y., & Zhao, B. (2017). Optimization design and performance analysis of a novel asymmetric compound parabolic concentrator with rotation angle for building application. <i>Solar Energy</i>, <i>158</i>(August), 808–818. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.029</p>
--	---

	<p>Yin, Z., Ding, Y., Zheng, Q., & Guan, L. (2012). CuO/polypyrrole core-shell nanocomposites as anode materials for lithium-ion batteries. <i>Electrochemistry Communications</i>, 20(1), 40–43. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2012.04.005</p> <p>Yu, Y., Liu, N., & Tang, R. (2014). Optical performance of CPCs for concentrating solar radiation on flat receivers with a restricted incidence angle. <i>Renewable Energy</i>, 62, 679–688. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.038</p> <p>Zeng, Y., Wang, T., Zhang, S., Wang, Y., & Zhong, Q. (2017). Sol-gel synthesis of CuO-TiO₂ catalyst with high dispersion CuO species for selective catalytic oxidation of NO. In <i>Applied Surface Science</i> (Vol. 411). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.107</p> <p>Zhang, D., Zhang, J., Guo, Z., & Miao, X. (2011). Optical and electrical properties of zinc oxide thin films with low resistivity via Li-N dual-acceptor doping. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, 509(20), 5962–5968. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.03.028</p> <p>Zyoud, A. H., Zubi, A., Hejjawi, S., Zyoud, S. H., Helal, M. H., Zyoud, S. H., Qamhieh, N., Hajamohideen, A. R., & Hilal, H. S. (2020). Removal of acetaminophen from water by simulated solar light photodegradation with ZnO and TiO₂ nanoparticles: Catalytic efficiency assessment for future prospects. <i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>, 8(4), 104038. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104038</p>
--	--