



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Doctorado

**Viabilidad termo-económica del uso de
nanofluidos en sistemas de calentamiento de
agua con colectores de placa plana**

presentada por

MC. Marco Antonio García Rincón

como requisito para la obtención del grado de
**Doctor en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2026.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 09/enero/2026

Oficio No. SAC/003/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

MARCO ANTONIO GARCÍA RINCÓN
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Viabilidad termo-económica del uso de nanofluidos en sistemas de calentamiento de agua con colectores de placa plana"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Cuernavaca, Mor. 09/enero/2026

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
P R E S E N T E

AT'n: DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante Marco Antonio García Rincón manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado "Viabilidad termo-económica del uso de nanofluidos en sistemas de calentamiento de agua con colectores de placa plana" realizado bajo la dirección de Dr. José Jassón Flores Prieto. el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE

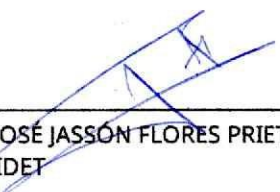

DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA
CENIDET


DR. RAFAEL CAMPOS AMEZCUA

CENIDET


DRA. ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
CENIDET


DR. OCTAVIO GARCÍA VALLADARES
IER-UNAM


DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
CENIDET

c.c.p: Mtra. Verónica Sotelo Boyas Jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico
c.c.p: Expediente

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México- Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) por la oportunidad de continuar con mi formación académica y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación (CONAHCYT) por proveer el apoyo financiero que me permitió continuar con mis estudios.

A mi amada esposa, Grecia Xiluén Salazar Beltrán, y a mis dos maravillosos hijos, Ángel Manuel y Elian Antonio, no hay palabras que puedan expresar todo lo que significan para mí. Su amor, su paciencia y su apoyo incondicional hicieron que cada desafío fuera más llevadero. Ustedes son mi inspiración, mi fuerza y mi razón de seguir adelante. No existe amor más grande que el que siento por ustedes; mi corazón siempre será suyo.

A mis padres y a mi hermano, Marco Antonio García Castro, María Soledad Rincón Espinosa y Eduardo Ernesto García Rincón: no me alcanzaría la vida para agradecerles todo lo que me han dado. Gracias a Dios por bendecirme con su presencia en mi vida. Su amor, apoyo incondicional y sabios consejos han sido mi mayor fortaleza y motivación para seguir adelante.

Agradezco profundamente al Dr. José Jassón Flores Prieto por su confianza, guía y apoyo constante. Su experiencia y conocimiento fueron clave para el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo valoro su calidad humana, su amistad y los consejos que me brindó a lo largo de todo el doctorado.

Agradezco de manera muy especial a la Dra. Mónica Corea Téllez y a su equipo del Laboratorio de Nanopolímeros de la ESQIE del Instituto Politécnico Nacional por su apoyo, confianza y valiosas enseñanzas durante el desarrollo de este proyecto. Su disposición, conocimiento y acompañamiento fueron fundamentales para llevar a buen término este trabajo.

A mi comité revisor. A la Dra. Alicia Martínez Rebollar, Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda, Dr. Octavio García Valladares y Dr. Rafael Campos Amezcua, por todos sus comentarios, por cada una de sus palabras y por los valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo.

Al personal administrativo y al departamento de Ingeniería Mecánica. Por la atención que siempre me brindaron, especialmente a mi amigo del alma el Ing. Eduardo Velasco por siempre estar presente para ayudarme en las buenas y malas, a la Sra. Roció Salazar Ruiz por ser tan buena persona y siempre brindarme su apoyo.

A todos los profesores de Ingeniería mecánica que admiro y respeto, por su conocimiento y su gran calidad humana. Al Laboratorio de Energía Solar, a mis compañeros y a las grandes amistades que formé en este camino: gracias por sus críticas y comentarios, por las tardes llenas de risas y por todos los momentos compartidos que hicieron este proceso más ligero y significativo.

Dedicatoria

Con todo mi amor para quienes representan lo más importante en mi vida:

A Dios.

Por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este trabajo.

A mi esposa e hijos.

Por su amor incondicional, apoyo constante y comprensión durante todo este proceso. Su presencia ha sido mi mayor motivación.

A mis padres y hermano.

A mis padres, por sus enseñanzas, sacrificio y confianza permanente en mí.

A mi hermano, por su apoyo y acompañamiento a lo largo de este camino.

A mis abuelos.

*Por sembrar en mí valores, amor y fortaleza, por su ejemplo de vida y por las enseñanzas que dejaron huella en mi camino. Su apoyo y sabiduría han sido parte fundamental de quien soy hoy. Especialmente a mi abuelo materno, **Manuel de Jesús Loranca Rincón (Papá Chus)**, cuyo recuerdo y legado vivirán siempre en mi corazón.*

Contenido

LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	8
NOMENCLATURA.....	10
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 GENERALIDADES.....	13
1.2 ESTADO DEL ARTE	15
1.2.1 Estabilidad y surfactantes	15
1.2.2 Nanofluidos en colectores solares de placa plana	17
1.2.3 Viabilidad en el uso de nanofluidos	19
1.2.4 Nanofluidos y tecnología de captación	19
1.2.5 Eficiencia térmica en colectores solares vs tipo de nanofluidos.....	21
1.2.6 Eficiencia de colectores solares de placa plana vs difusividad térmica y flujo.....	22
1.2.7 Impacto del ensuciamiento de las tuberías en la contaminación por nanofluidos	25
1.3 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE	26
1.4 OBJETIVOS.....	28
Objetivo general	28
Objetivos específicos.....	28
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	28
2. MATERIALES Y MÉTODO	29
2.1 CASO DE ESTUDIO	30
2.1.1 Localización	30
2.1.2 Colector solar.....	31
2.1.3 Fluido de trabajo.....	31
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL NANOFLUIDO	32
2.2.1 Caracterización de nanopartículas mediante DRX	33
2.2.2 Tipo de preparación del nanofluido	33
2.2.3 Caracterización del nanofluido mediante Microscopía Electrónica de Barrido.....	34
2.2.4 Caracterización de la cantidad y tamaño de nanopartículas dispersas	34
2.3 CARACTERIZACIÓN TERMOFÍSICA: ESTABILIDAD	36
2.3.1 Pruebas en laboratorio (al interior ζ)	36
2.3.2 Pruebas al exterior (η y ζ).....	37
Eficiencia del FPSWH (η)	38
Modelo físico	38
Modelo matemático (Térmico)	40
2.4 EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD.....	42
3. CALORIMETRÍA DE FLUJO: H Y Z.....	44
3.1 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	44
3.1.1 Sistemas y equipos.....	44
3.1.1.1 Soporte y fijación de muestras de colectores	46
3.1.1.2 Estación meteorológica.....	46
3.1.1.3 Colector solar de placa plana.....	47
3.1.1.4 Acondicionador de fluidos para la calorimetría	47
3.1.1.5 Sistema de enfriamiento	48
3.1.1.6 Bomba de circulación.....	49
3.1.2 Sensores y controladores	50
3.1.2.1 Control de flujo másico.....	50
3.1.2.2 Sensores de temperatura	52

3.2 PROCESAMIENTO DE SEÑALES	53
3.2.1 Adquisición de datos	53
Microprocesador ESP32.....	54
Placa receptora de señales analógicas	54
3.2.2 Base de datos	55
Almacenamiento	55
Visualizador de datos.....	55
3.2.3 Monitoreo y registro.....	56
Lectura de datos	56
Monitoreo desde la nube.....	57
Verificación del sistema de adquisición de datos	57
Registro histórico	58
3.3 INCERTIDUMBRE EXPERIMENTAL.....	58
3.3.1 Análisis de correlación e importancia.....	59
3.3.2 Análisis de error.....	60
4. RESULTADOS	61
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL NANOFLUIDO	61
4.1.1 Verificación del material Al_2O_3	61
4.1.2 Microscopía electrónica de barrido	62
4.1.3 Caracterización de la preparación del nanofluido Al_2O_3	64
4.1.4 Caracterización de nanofluidos	65
Tamaño de las nanopartículas.....	65
Tamaño de las nanopartículas vs tiempo.....	66
Potencial-Z del nanofluido	67
4.2 PRUEBAS DE DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS EN EL NANOFLUIDO.....	68
4.2.1 Condiciones al interior	68
4.2.2 Condiciones al exterior	69
4.3 PRUEBAS DE ESTABILIDAD DEL NANOFLUIDO.....	70
4.3.1 Condiciones al interior	70
4.3.2 Condiciones al exterior	71
4.4 COMPARATIVO DE FUNCIONAMIENTO DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA	72
4.4.1 Calibración de banco de pruebas agua-agua	72
4.4.2 Comparativo de eficiencia con agua respecto a reportes previos	73
4.4.3 Comparativo de curva de eficiencia con agua y nanofluido	74
Agua.....	74
Nanofluido.....	75
4.4.4 Comparativo de Temperaturas, energía útil y flujo.....	76
Temperaturas de entrada y salida.....	76
Calor útil.....	77
Flujo	78
4.5 ANÁLISIS ECONÓMICO	79
4.5.1 LCOE con combustibles de referencia	79
4.5.2 Análisis económico con colectores solares de placa plana	79
LCOE con agua.....	80
LCOE con nanofluido.....	80
4.6 MODELADO DE EFICIENCIA VS ESTABILIDAD, $H(Z,T)$	81
4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TRABAJOS FUTUROS	86
5.1 CONCLUSIONES.....	86
5.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	89
5.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	89

5.4 RESULTADOS OBTENIDOS	90
6 REFERENCIAS	91
ANEXO: PRUEBA DE FUNCIONALIDAD 1: RENDIMIENTO DIARIO DEL COLECTOR SOLAR CON Y SIN NANOFLUIDOS	97

Lista de Tablas

TABLA 1. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL NANOFLUIDO.	32
TABLA 2. PRECISIÓN DEL SENSOR.	58
TABLA 3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.	64
TABLA 4. COEFICIENTES DE AJUSTE MULTIVARIABLE.	82

Lista de Figuras

FIGURA 1. DÍAS DE ESTABILIDAD EN FUNCIÓN A LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS DISUELTAS [30], [35], [38], [39], [40].	17
FIGURA 2. NANOFLUIDOS Y TECNOLOGÍA DE CAPTACIÓN.	20
FIGURA 3. EFICIENCIA TÉRMICA CON NANOFLUIDOS.	21
FIGURA 4. EFICIENCIA VS DÍAS REPORTADOS CON ESTABILIDAD EN FPSWH [13], [22], [27], [30], [39], [59], [70], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90].....	22
FIGURA 5. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DE LAS NANOPARTÍCULAS Y DEL FLUJO DE MASA EN LA EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA.	24
FIGURA 6. ESTRATEGIA DE LA INVESTIGACIÓN.	29
FIGURA 7. IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL, CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO.	30
FIGURA 8. COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.....	31
FIGURA 9. NANOPARTÍCULAS DE ALÚMINA / Al_2O_3 , NANOPOLVO AMORFO 50 NM ALTAMENTE AUTO DISPERSABLE.....	32
FIGURA 10. PREPARACIÓN PASO A PASO DEL NANOFLUIDO.....	33
FIGURA 11. ESQUEMA DEL PROCESO DE DOS PASOS PARA PREPARAR NANOFLUIDOS.	34
FIGURA 12. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN TÉRMICA AL INTERIOR Y EXTERIOR.	36
FIGURA 13. PRUEBAS DE ESTABILIDAD DEL NANOFLUIDO.	37
FIGURA 14. MODELO FÍSICO.	38
FIGURA 15. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA, A PARTIR DE LA ENERGÍA ÚTIL.	39
FIGURA 16. DISEÑO EXPERIMENTAL.	43
FIGURA 17. CALENTADORES SOLARES DE ESTUDIO.....	44
FIGURA 18. EQUIPO CALORIMETRÍA DE FLUJO AL EXTERIOR DIVIDIDO EN SUBSISTEMAS 1A) TERMO-HIDRÁULICO, 1B) ADQUISICIÓN Y MONITOREO DE DATOS Y 1C) DISPOSITIVO DE MONITOREO REMOTO.	45
FIGURA 19. ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	46
FIGURA 20. PROCESO DE RESTAURACIÓN DEL COLECTOR SOLAR.	47
FIGURA 21. ACONDICIONADOR DE FLUJO Y TEMPERATURA DE ENTRADA CON BAÑOS TÉRMICOS Y CHILLER DE ENFRIAMIENTO... ..	48
FIGURA 22. BAÑO TÉRMICO.....	48
FIGURA 23. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA CONTROL DE TEMPERATURA DE ENTRADA (T_i).	49
FIGURA 24. MANTENIMIENTO DE BOMBA HIDRÁULICA.....	49
FIGURA 25. SENSOR DE FLUJO YF-S201.	50
FIGURA 26. ARREGLO DE CONTROL DE FLUJO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA.....	51
FIGURA 27. RESULTADOS DE PRUEBAS DE SENSORES DE FLUJO MÁSSICO.....	51
FIGURA 28. PRUEBA DE SENSORES CON BAÑO TERMOSTÁTICO POLYSCIENCE.....	52
FIGURA 29. RESULTADOS DE PRUEBAS DE SENSORES DE TEMPERATURA.	52
FIGURA 30. ETAPAS DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA LA CALORIMETRÍA DE FLUJO AL EXTERIOR.	53
FIGURA 31. MICROPROCESADOR ESP32 CON SENSORES PARA LA CALORIMETRÍA DE FLUJO.....	54
FIGURA 32. A) CIRCUITO PCB EN PCB WIZARD Y B) TRATAMIENTO CON ÁCIDO FÉRRICO DE LA PCB.	55
FIGURA 33. TRANSMISIÓN DE DATOS.....	56

FIGURA 34. PLATAFORMA DE MONITOREO DE PARÁMETROS PARA LA CALORIMETRÍA DE FLUJO AL EXTERIOR.	57
FIGURA 35. OBTENCIÓN DE DATOS CON LIBRERÍA DATA STREAMER.	58
FIGURA 36. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE PEARSON FPSC.	59
FIGURA 37. PARÁMETROS DE IMPORTANCIA EN EL RENDIMIENTO DE FPSC.	60
FIGURA 38. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) DE UNA MUESTRA DE Al_2O_3	62
FIGURA 39. NANOPARTÍCULA DE Al_2O_3 , NANOPARTÍCULA AMORFA ALTAMENTE AUTODISPERSABLE DE 50 NM.	63
FIGURA 40. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL DIÁMETRO DEL Al_2O_3 A PARTIR DE LA IMAGEN SEM (FIGURA 45).63	
FIGURA 41. (A) MUESTRA 1A Al_2O_3 -AGUA 2.0 %P/P, (B) MUESTRA 1B Al_2O_3 -AGUA 2.0 %P/P, (C) MUESTRA 1C Al_2O_3 -AGUA 2.0 %P/P, Y (D) MUESTRA 1UB Al_2O_3 -AGUA 2.0 %P/P CON PREPARACIÓN EN BAÑO ULTRASÓNICO.	66
FIGURA 42. HISTORIAL DEL DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS (D_z) Y DEL ÍNDICE DE POLIDISPERSIDAD (PDI) DE LAS MUESTRAS 1A, 1B, 1C Y 1UB.....	67
FIGURA 43. PRUEBAS DE POTENCIAL-Z PARA CUATRO MUESTRAS 1A, 1B, 1C Y 1UB DE Al_2O_3 -AGUA 2.0 % P/P.	68
FIGURA 44. ANÁLISIS DE LA DERIVA DEL POTENCIAL-Z EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.	69
FIGURA 45. ESTABILIDAD DE LOS NANOFLUIDOS EN FPSWH EN CONDICIONES EXTERIORES.	70
FIGURA 46. ESTABILIDAD DEL NANOFLUIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN CONDICIONES INTERIORES.	71
FIGURA 47. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL NANOFLUIDO EN EL FPSC.....	72
FIGURA 48. ERROR EXPERIMENTAL ENTRE FPSC DEL BANCO DE PRUEBAS.....	73
FIGURA 49. COMPARATIVO DE A_0 Y A_1 CON TRABAJOS PREVIOS.....	74
FIGURA 50. CARACTERIZACIÓN DEL FPSC CON AGUA.	75
FIGURA 51. CARACTERIZACIÓN DEL FPSC CON NANOFLUIDO.....	75
FIGURA 52. COMPORTAMIENTO TÉRMICO NANOFLUIDO VS. AGUA.	77
FIGURA 53. COMPARATIVO DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO NANOFLUIDO VS. AGUA EN EL FPSC.	77
FIGURA 54. COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS EN EL FPSC NANOFLUIDO VS. AGUA.....	78
FIGURA 55. COMPARATIVO DEL COSTO NIVELADO DE LA ENERGÍA.....	81
FIGURA 56. COMPARATIVO DE LA ESTABILIDAD (POTENCIAL-Z) Y DE LA EFICIENCIA.....	82
FIGURA 57. MODELADO DE LA EFICIENCIA EN TÉRMINOS DEL POTENCIAL-Z Y EL TIEMPO.	83
FIGURA 58. ENERGÍA ÚTIL EN EL FPSWH USANDO AGUA COMO FLUIDO CALOPORTADOR CON CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE CUERNAVACA, MORELOS.	97
FIGURA 59. EFICIENCIA TÉRMICA Y PÉRDIDAS GLOBALES DE CALOR DEL COLECTOR SOLAR USANDO DIFERENTES CONCENTRACIONES DE NANOPARTÍCULAS EN AGUA CON MODELOS MATEMÁTICOS DE DUFFIE AND BECKMAN.....	98
FIGURA 60. EFICIENCIA TÉRMICA DEL COLECTOR SOLAR USANDO DIFERENTES NANOPARTÍCULAS Y CONCENTRACIONES DE NANOPARTÍCULAS EN AGUA CON MODELOS MATEMÁTICOS DE DUFFIE AND BECKMAN.	98

Nomenclatura

<i>Símbolos</i>		<i>Unidades</i>	
I	Irradiancia solar (W/m ² K)	K	Kelvin
$\dot{m}$	Flujo másico (kg/s)	kg/s	Kilogramos por segundo
pH	Potencial de hidrógeno	kWh _t	Kilo Watt hora térmico
Q_u	Calor útil en el colector (W/m ²)	nm	Nanómetros
T_i	Temperatura de entrada (K)	W/m ²	Watts por metro cuadrado
T_o	Temperatura de salida (K)		
T_a	Temperatura ambiente (K)		
U_L	Pérdidas globales de calor (W/m ² K)		
<i>Abreviaciones</i>		Símbolos griegos	
CTAB	Bromuro de hexadeciltrimetilamonio	η	Eficiencia
FPSC	Colector solar de placa plana	$\tau\alpha$	producto absorbancia-transmitancia
FPSWH	Calentador solar de agua de placa plana		
GA	Goma arábica	subíndices	
STS	Dodecil sulfato de sodio	Ag	Agua
TW-80	Polisorbato 80	A	Ambiente
		f	Fluido base
		NF	Nanofluido
		p	Nanopartícula
		t	Térmico

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de la viabilidad del uso de nanofluidos en sistemas de calentamiento de agua con colectores de placa plana, considerando la eficiencia térmica en función de la estabilidad del nanofluido. El estudio compara un sistema convencional con agua y otro con nanofluidos a base de nanopartículas de óxidos metálicos, considerando los costos asociados a la obtención de agua caliente sanitaria y la evolución de la eficiencia térmica en función de la estabilidad del nanofluido durante la operación. El caso de estudio se desarrolla en Cuernavaca, Morelos, México, utilizando un colector solar de placa plana. La eficiencia térmica se evalúa con calorimetría de flujo, mientras que la estabilidad del nanofluido se analizó a partir de la deriva del potencial-Z. El modelado térmico anual permitió estimar la energía específica de cada sistema, los costos nivelados y el periodo de retorno, con el fin de determinar la viabilidad económica del uso de nanofluidos.

En el estado del arte se determinó que los nanofluidos en calentadores solares mejoran la eficiencia térmica entre 5 % y 35 %, pero su estabilidad aún es limitada. Los estudios actuales cubren solo el 2.5 % de la vida útil esperada (0.5 años de 20). La hibridación de nanopartículas logra mejoras de hasta 30 % y eficiencia de 0.85, mientras que los nanofluidos poliméricos ofrecen hasta 86 % de estabilidad y 35 % de eficiencia. Las mejores condiciones se dan con partículas de 24 nm, 0.1 % de concentración y caudales de 0.04 kg/s. Tasas de flujo entre 0.02–0.04 kg/s y concentraciones de 0.2–0.3 % mejoran la estabilidad (hasta 6 meses) y el rendimiento (>30 %).

De forma teórica-experimental el uso de nanopartículas de Al_2O_3 aumentan la eficiencia del FPSWH hasta un 63 % acercándose al 80 %, y reducen las pérdidas globales de calor hasta 84 %. Sin embargo, el análisis no contempló el efecto de estabilidad por lo que se muestra ideal en este primer resultado. El análisis mediante potencial-Z evidenció que una alta estabilidad inicial (44.4 mV) mejora el desempeño térmico; sin embargo, bajo condiciones reales esta se degrada rápidamente, alcanzando valores de 18 mV en menos de cuatro meses, lo que implica sedimentación y riesgo de obstrucción en las tuberías. El sistema de colector solar con nanofluido presentó una eficiencia óptica inicial (a_0) de 0.87, lo que representa una mejora del 58.47 % respecto al uso de agua ($a_0 = 0.55$). Las pérdidas térmicas globales con nanofluido fueron de -6.14 ,

frente a -7.36 con agua, demostrando que el colector solar no sufre mayores pérdidas térmicas con el uso del nanofluido.

Los nanofluidos muestran una mejora en la eficiencia térmica de hasta 58 % respecto al agua en condiciones al exterior basados en la norma UNE-EN ISO 9806:2017 y con flujo de prueba de 1 lpm, lo que los posiciona como una alternativa viable en aplicaciones solares térmicas; sin embargo, su estabilidad se reduce hasta un 50 % en menos de 4 meses bajo condiciones reales, comprometiendo su vida útil y aumentando el riesgo de sedimentación y obstrucción. Aunque el método de preparación ultrasónico mejora el potencial-Z en un 30 % y reduce el tamaño de partícula en un 55 %, estos beneficios no compensan la pérdida de estabilidad a largo plazo. En términos económicos, la necesidad de reemplazar periódicamente el nanofluido incrementa los costos nivelados de la energía, elevando el kWh a \$20.74, frente a \$14.84 utilizando combustibles fósiles, lo que vuelve inviable su aplicación actual. En conclusión, aunque los nanofluidos muestran un alto potencial para mejorar la eficiencia térmica en sistemas solares, su limitada estabilidad sigue siendo el principal desafío, por lo que se requiere continuar la investigación para desarrollar coloides con una vida útil comparable a la de los sistemas solares térmicos.

1. Introducción

1.1 Generalidades

Actualmente, el mercado de los calentadores solares ha crecido considerablemente como una alternativa a los calentadores con combustibles fósiles. El creciente mercado solar térmico lo encabezan los calentadores con tecnología de colectores de baja temperatura, enfocados al uso sanitario, funcionando a 40-80 °C [1]. Por ejemplo, en 2017, el sector residencial mexicano registró 3.5 millones de metros cuadrados de colectores solares instalados [2,3]. Los colectores solares de placa plana FPSC, se han venido utilizando principalmente para aplicaciones de mediana temperatura (80-250 °C), para demandas de 30-100 °C. En los sistemas de calentamiento solar, los FPSC son los más utilizados, sin embargo, en estos casos el mercado exige el cumplimiento de estándares de mayor competitividad para su fiabilidad [4-6]. En general, en los calentadores solares la energía se capta en los colectores y se almacena en agua caliente con tanques de almacenamiento aislados. Así, la energía se puede disponer durante la noche, a horas nubladas y/o cuando la radiación solar resulta insuficiente [7]. Los FPSC absorben la irradiación solar sin concentrarla, la convierte en energía térmica y la transmiten al fluido caloportador que circula en su interior [2], [8], [9]. En el sector industrial, las mayores limitantes de los calentadores solares con tecnología de placa plana son su relativo bajo desempeño térmico y su reducida competitividad tecnológica en el mercado energético. Sin embargo, hasta la fecha, los trabajos de investigación reportados muestran que el rendimiento térmico puede aumentarse con nanofluidos hasta un 30 % [9], pero estudios de la vida útil del nanofluido aún son inciertos, respecto a la vida útil de un sistema.

Las nanopartículas en fluidos base convencionales influyen notablemente en la eficiencia [10], por lo que los continuos avances de la nanotecnología auguran mayor competitividad en la industria solar. El rendimiento térmico de los FPSC con nanofluidos depende considerablemente de las propiedades termofísicas del fluido de trabajo y de su estabilidad [11], [12]. Choi [13] utilizó

nanofluidos para mejorar la capacidad de absorción y el transporte de calor. Así más recientemente, los nanofluidos han mostrado un significativo incremento de la conductividad térmica, mejorando el transporte de energía hasta en un 10 % [10], [12], [14], [15]. Es de observar que, aun con pequeñas proporciones de volumen de nanopartículas, las propiedades de transferencia de calor son muy superiores a las de los fluidos tradicionales [16]. Sin embargo, la deriva de las propiedades termofísicas implica deriva en la estabilidad del nanofluido, y, por tanto, también la eficiencia del calentador solar a lo largo de su vida útil disminuye [2], [17]. Así, la estabilidad de los nanofluidos es un parámetro relevante para conocer el rendimiento y para mejorar la viabilidad de proyectos térmicos solares. Los trabajos reportados atienden prioritariamente la eficiencia del desempeño térmico con el uso de nanofluidos, cubriendo periodos de estudio mayormente de días, con tiempos de estudio de hasta medio año. Sin embargo, la deriva de la estabilidad del nanofluido a lo largo de ciclos anuales puede ser considerable, y afectar los escenarios técnico-económicos de proyectos productivos, que en general superan escenarios de inversión de 20 años [17], [18].

El uso de nanofluidos en los colectores solares planos se inició prácticamente en 1995, y hoy en día se considera una tecnología en desarrollo [19]. Los nanofluidos suspenden nanopartículas con tamaños medios inferiores a 100 nm en fluidos tradicionales de transferencia de calor. La baja conductividad térmica de los fluidos convencionales limita la transferencia de calor; mientras que una cantidad mínima de nanopartículas dispersa uniformemente y estable en el fluido base mejora la transferencia de calor notablemente [18]. Sin embargo, la sedimentación de las nanopartículas decrece las propiedades termofísicas, siendo un retractor en su aplicación.

En la preparación de nanofluidos una buena dispersión es importante, y a veces esto requiere el uso de tensioactivos [20]. Estudios previos muestran un aumento significativo de la eficiencia, donde la conductividad térmica es el factor principal del éxito de los nanofluidos [21]. No obstante, algunos informes sugieren el decremento del desempeño por la corrosión e incrustaciones dentro de las tuberías [22]. Akram *et al.* (2019) [23] informan que la estabilidad es uno de los principales factores que se afecta por aglomerarse. La formación de capas de

incrustación aumenta la resistencia tribológica, las caídas de presión, la obstrucción de tuberías, la contaminación y la corrosión [24]. Debido a que, la viscosidad aumenta proporcionalmente a la caída de presión, también aumenta la necesidad de bombeo y, en consecuencia, se disminuye la eficiencia [14]. El tamaño y la concentración de las partículas provocan la deposición de partículas incrustantes en sistemas con nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ [25]. El ensuciamiento de los nanofluidos depende del tiempo, donde la deposición aumenta con el funcionamiento prolongado [26]. Con lo anterior se observa que, los efectos adversos de nanofluidos en tuberías son importantes para las estrategias de mejora y conservación de la estabilidad, sin embargo, los informes son limitados.

Actualmente, los sistemas de calentamiento de agua solar son una opción rentable y amigable con el medio ambiente, sin embargo, su eficiencia limita su competitividad frente a las fuentes convencionales de energía. En los calentadores de agua solares, la evaluación de la eficiencia se suele realizar mediante calorimetría de flujo para correlacionar la eficiencia con la temperatura reducida [1], [4], [20], [27], [28], [29], [30]. La viabilidad termo-económica de los nanofluidos como alternativa, para potenciar la eficiencia térmica de los colectores solares de agua, su rentabilidad y competitividad ante un mercado creciente y desfavorable ambientalmente es importante, al igual que una metodología de estudio donde se considere la deriva de los nanofluidos en los calentadores solares.

1.2 Estado del arte

En el estado del arte se muestra el estudio de la estabilidad de los nanofluidos en sistemas de calentamiento solar, la viabilidad, los tipos de nanofluidos utilizados, la eficiencia térmica de los colectores solares con nanofluidos y las conclusiones del estado del arte.

1.2.1 Estabilidad y surfactantes

Hoy en día, el problema de la aglomeración de nanopartículas en el fluido base es el mayor desafío en los nanofluidos, por lo que, diversas investigaciones enfocadas en este problema se están llevando a cabo [18]. En general, los estudios reportados implementan tensioactivos para

modificar el pH de los nanofluidos, aumentando la eficiencia del colector con una mayor dispersión de nanopartículas [31]. Los tensioactivos permiten incrementar la conductividad eléctrica, la densidad, la viscosidad y la tensión de cizallamiento, disminuyendo la tensión superficial a diferentes concentraciones en relación con el agua a temperatura constante [16]. Los tensioactivos como la Goma arábica (GA), Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) y Dodecil sulfato de sodio (SDS) han mostrado mayor estabilidad y mejores propiedades termofísicas que los nanofluidos en medios acuosos [15]. Otros tensioactivos poco convencionales son el Iso-Octyl Phenoxy Polyethoxy Ethanol (Tritón X-100) y el Polisorbato 80 (TW-80), que han mostrado mejor estabilidad, pero debe revisarse adecuadamente la concentración de tensioactivo y el método que se elige para preparar el nanofluido [6], [20], [32], [33]. El rendimiento térmico del colector aumenta con la estabilidad del nanofluido adicionando tensioactivos [34]. La mayoría de los trabajos concuerdan en que existe un punto en el cual la mejora de la estabilidad ya no aumenta y se ve afectada con el uso excesivo de tensioactivos. En trabajos previos, la concentración de tensioactivo con mayor desempeño se ha reportado del 0.2 %vol. Respecto al fluido base [14], [15], [32]. Aunque los tensioactivos mejoran la dispersión de las nanopartículas y la estabilidad en el largo plazo, las propiedades termofísicas de los fluidos base y de los nanofluidos pueden verse afectadas [35]. Los trabajos previos mencionados han mostrado que los tensioactivos aumentan la dispersión y estabilidad de los nanofluidos [14], [15], [35]. Sin embargo, los tiempos en los que se ha analizado la estabilidad llegan a ser hasta de seis meses, por lo que escenarios técnico-económicos de proyectos que usualmente son de 20-30 años pueden presentar incertidumbres considerables [8], [14], [17], [20], [32], [36].

Los gradientes de temperatura agravan la aglomeración de nanopartículas, el tratamiento físico o químico con tensioactivos modifica la superficie de las partículas, mejorando la conductividad térmica para conseguir un nanofluido más estable [37]. La estabilidad se reporta como uno de los principales factores que desfavorecen a los nanofluidos ya que en determinados periodos suelen aglomerarse. De los trabajos reportados y analizados como se muestra en la **Figura 1**, sólo el 40 % de los que realizan actividad experimental con colectores solares de agua reportan el tiempo de estabilidad del nanofluido, el otro 60 % omiten este análisis. Del 30 % de los trabajos que reportan

estabilidad, el mayor tiempo de estudio fue de seis meses. El 60 % de los autores optan por utilizar un surfactante, el otro 40 % no lo utiliza. La **Figura 1** demuestra que el uso de tensioactivos proporciona una mayor estabilidad durante un periodo prolongado; el tipo de tensioactivo disuelto y su cantidad deben elegirse adecuadamente. Cuanto menor sea el tamaño de las partículas, más duradera será la estabilidad. La estabilidad del nanofluido es significativamente sensible al grado de dispersión de las nanopartículas, y la dispersión es función de la cantidad de fluido base. El periodo de estabilidad mejora cuando se reduce el porcentaje de nanopartículas de la masa de fluido. La mejor estabilidad se alcanzó a los seis meses cuando se utilizó Al_2O_3 en fracciones de volumen del 0.2-0.3 % con el tensioactivo SDBS.

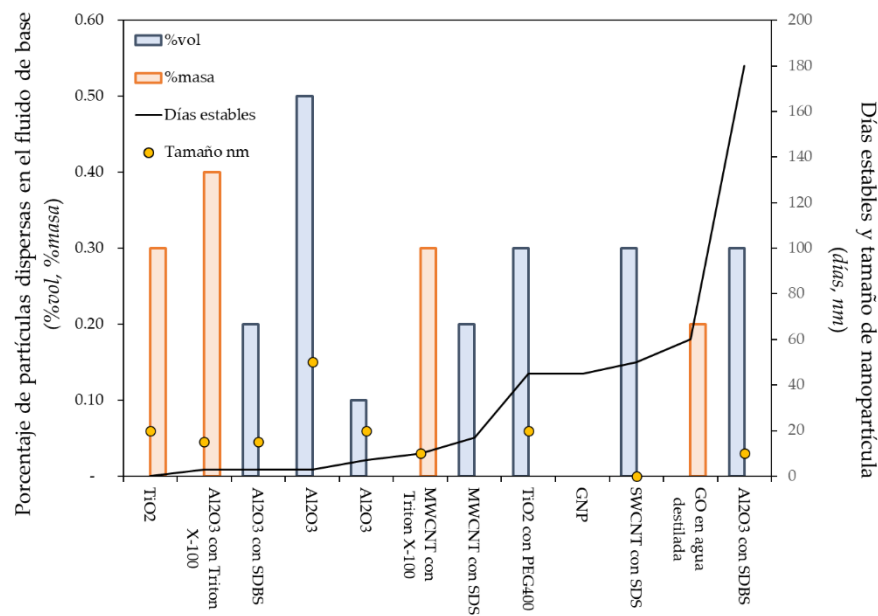


Figura 1. Días de estabilidad en función a la cantidad de partículas disueltas [30], [35], [38], [39], [40].

1.2.2 Nanofluidos en colectores solares de placa plana

En general, las normas evalúan los calentadores solares de agua por calorimetría de flujo exterior e interior sin considerar las variaciones de las propiedades termofísicas del fluido de trabajo, como las normas de colectores solares para calentamiento de espacios y agua, siguiendo la NMX-ES-001-NORMEX, 2018, basada en ISO 9806-1:1994, FSEC-GP-5-80 y ANSI/ASHRAE 93-1986 basada en calorimetría de flujo para colectores cubiertos y descubiertos [41]. Las normas sobre calentadores solares de agua, como NMX-ES-002-NORMEX-2007, NMX-ES-003-NORMEX-2021

y NMX-ES-004-NORMEX-2010, también se basan en ISO 9459-2:1995. Rendimiento térmico de colectores y calentamiento solares de agua, tampoco mencionan si debe ser para el uso de nanofluidos, y mucho menos con propiedades cambiantes.

En los FPSWH (calentadores solares de agua de placa plana), los nanofluidos son un tipo innovador de fluido de trabajo [42]. En la actualidad, más investigadores se han dedicado a enriquecer el rendimiento de los calentadores solares de agua utilizando diferentes nanofluidos [20]. Normalmente utilizan bajas concentraciones de nanopartículas (1-100 nm) mezcladas en un fluido base. Las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo, como la transferencia de calor radiativa y la conductividad térmica, son determinantes cuando se añaden nanopartículas solas o mezcladas [14], [43]. Se han revisado varios trabajos de investigación que utilizan nanopartículas mezcladas en fluidos base en colectores solares realizados durante la última década y se ha mencionado que los nanofluidos tienen un potencial apasionante para los sistemas térmicos [18]. El estudio de los nanofluidos como medio de transferencia de calor ha evolucionado rápidamente. Cada día se estudian más nanopartículas, así como el uso de nanofluidos híbridos, una mezcla de dos o más nanopartículas disueltas, y diferentes tensioactivos para mejorar la estabilidad de las nanopartículas. El rendimiento del colector depende de factores de configuración, propiedades termofísicas de los materiales, fluido de trabajo, flujo, orientación del colector y lugar geográfico de trabajo [42]. Los nanomateriales tienen mejores características, como propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas, magnéticas y térmicas únicas. Aunque los nanofluidos mejoran la transferencia de calor radiativa y la conductividad térmica, los estudios sobre la estabilidad de las nanopartículas en FPSWH se limitan a considerar que los nanofluidos son viables [23]. Como se ha indicado anteriormente, mitigar el impacto del ensuciamiento de las tuberías en los sistemas de nanofluidos es esencial para garantizar un rendimiento y una eficiencia óptimos, donde se han propuesto estrategias de recubrimiento y tratamiento de superficies para reducir el ensuciamiento de las tuberías de nanofluidos, [44], [45], [46], [47]. Así pues, en este estudio se examina el progreso a largo plazo de los estudios de estabilidad de la eficiencia térmica con la deriva de las propiedades termofísicas de los nanofluidos como método para determinar su viabilidad en FPSC.

1.2.3 Viabilidad en el uso de nanofluidos

De acuerdo con estudios previos, los nanofluidos son una alternativa para incrementar el rendimiento térmico y reducir costos energéticos [33], [36]. En referencia a la calefacción eléctrica, los colectores solares de placa plana con nanofluidos tiene un periodo de recuperación de la inversión de 3-5 años [48]. En relación con el uso de combustibles convencionales, los colectores de placa plana con nanofluidos aumentan la generación de energía (kWh_t) y reducen los costos de operación [49]. Se ha demostrado que el costo de los colectores puede reducirse mediante el uso de bobinas internas de cobre o nanofluidos, que logran mejorar el transporte energético, y así se reduce el área de captación requerida [50]. El rendimiento térmico se ha venido reportando en función de los costos de la energía y en su caso del área de captación, en referencia a las tarifas eléctricas locales o a los ahorros de combustibles convencionales [51]. Sin embargo, a la fecha, el desempeño de los nanofluidos en los colectores solares se ha venido puntualizando mayormente con la reducción del área de captación [6], [18], [20].

Las nanopartículas híbridas han mostrado una mejora en la eficiencia térmica que las nanopartículas simples [48], [51]. Sin embargo, en el mejor de los casos, los costos adicionales de las nanopartículas son compensados por la reducción de área de captación. Aunque, los nanofluidos híbridos en colectores solares mejoran mayormente el rendimiento térmico, a la fecha, los estudios de viabilidad en su mayoría son únicamente a nivel laboratorio. Por lo tanto, estudiar la estabilidad de los nanofluidos en sistemas de colección solar de forma experimental a cielo abierto puede mejorar la incertidumbre de la viabilidad de proyectos productivos, la cual en la mayoría de los estudios revisados no se encontró [52]. Así, la deriva de la estabilidad representa un reto importante, ya que la mayoría de los estudios experimentales muestran inestabilidad [53]. Los efectos económicos y medioambientales de utilizar nanofluidos con deriva en su estabilidad siguen sin reportarse, siendo que son considerables para determinar la viabilidad de proyectos productivos [54].

1.2.4 Nanofluidos y tecnología de captación

A lo largo del tiempo se ha documentado el desarrollo y uso de nanofluidos en calentadores solares, destacando aquellos que han sido más empleados en la literatura. Este comportamiento

y su evolución histórica se ilustran en la Figura 2, donde se muestra el registro de reportes correspondientes. En los últimos seis años, la mayor frecuencia de aplicación de los nanofluidos en captadores de placa plana fue en 2018. Los nanofluidos del tipo óxido metálico son los que mayormente se han utilizado en los trabajos reportados, con una representación del 12 al 16 % con respecto al 100 % de los trabajos encontrados [16], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66]. Sin embargo, la aplicación de nanopartículas poliméricas con base de carbón muestra un crecimiento de 160 % en 2018 y se mantiene constante hasta la actualidad. El uso de los nanofluidos en tecnología de placa plana se debe a su gran oportunidad en aplicaciones de agua caliente sanitaria, por su bajo costo y que son una tecnología en etapa madura [35], [56], [67]. En 2019, estudios de tecnologías de canal parabólico con nanofluidos comenzaron a aparecer y se mantienen constantes hasta la actualidad. Cuando se comparan los nanofluidos de óxidos metálicos con los nanofluidos de carbono, los nanofluidos de carbono son más eficientes. Los nanofluidos que contienen los alótropos del carbono tienen una ventaja significativa en las aplicaciones de transferencia de calor. Sin embargo, la mejora de la eficiencia de los colectores se ve superada con el uso de nanofluidos híbridos con relación a los nanofluidos convencionales [68]. La selección de la nanopartícula juega un papel muy importante para los resultados en el rendimiento térmico. Por otra parte, la razón por la cual se elige una partícula con respecto a otra depende de la disponibilidad de las nanopartículas. La disposición exacta de los nanofluidos para un rendimiento óptimo de los colectores aún requiere más investigación.

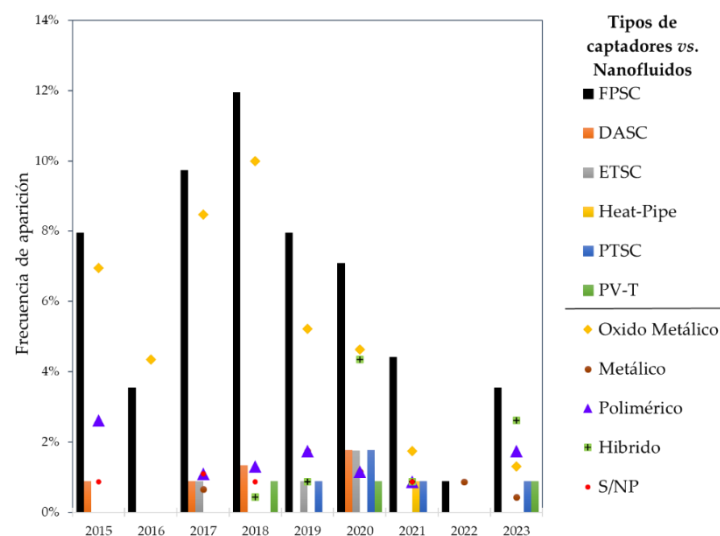


Figura 2. Nanofluidos y tecnología de captación.

1.2.5 Eficiencia térmica en colectores solares vs tipo de nanofluidos

Los informes numéricos y experimentales sobre la eficiencia de calentadores solares de agua de placa plana con nanofluidos se muestra en la **Figura 3**. Se analizan las eficiencias con diferentes nanopartículas Al, Ag, Cu, Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , CuO , CeO_2 , ZnO , G, SWCNT, MWCNT e híbridos. Las nanopartículas híbridas alcanzan hasta 0.81, seguidas de 0.732, 0.730, 0.725, 0.713 y 0.705 de Al_2O_3 , MWCNT, y grafeno, Cu y CeO_2 , respectivamente. Los nanofluidos pueden mejorar la eficiencia térmica del 5 al 35 % respecto a los fluidos convencionales. También se muestra una línea de referencia de la eficiencia térmica media de los calentadores solares de agua de placa plana basada en estudios anteriores de 0.50 [7], [13], [15], [20], [23], [33], [35], [63], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82]. Asimismo, la figura muestra, de izquierda a derecha, los tipos habituales de nanopartículas, óxidos metálicos, metálicas, no metálicas e híbridas. Las nanopartículas de óxidos metálicos mejoran la eficiencia térmica del 5 al 23 %, siendo la alúmina (Al_2O_3) la mejor con 0.729. Las partículas metálicas representadas por el cobre (Cu) muestran una eficiencia de hasta 0.713. Las nanopartículas no metálicas muestran una variación en la mejora de la eficiencia térmica del 8 al 23 %, siendo el grafeno (G) y los nanotubos de carbono multipared (MWCNT) los mejores, con 0.723 y 0.730, respectivamente. Sin embargo, no más de seis meses de estudios de rendimiento han demostrado que con la hibridación de nanopartículas, la eficiencia térmica puede mejorar hasta un 30 %, alcanzando hasta 0.81 respecto a los fluidos convencionales [20].

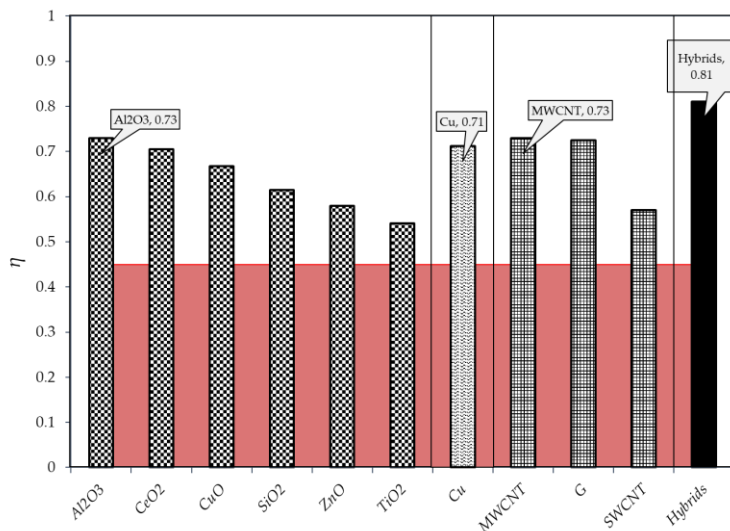


Figura 3. Eficiencia térmica con nanofluidos.

La **Figura 4** muestra informes de eficiencia de FPSC con diferentes nanofluidos, donde el mayor tiempo de estabilidad es de unos seis meses cuando se utiliza alúmina con tensioactivo SDBS. Aunque los trabajos muestran los días de estabilidad de los nanofluidos, aún es necesario informar más sobre el progreso de los estudios de estabilidad de la eficiencia térmica a largo plazo con la deriva de las propiedades termofísicas del nanofluido.

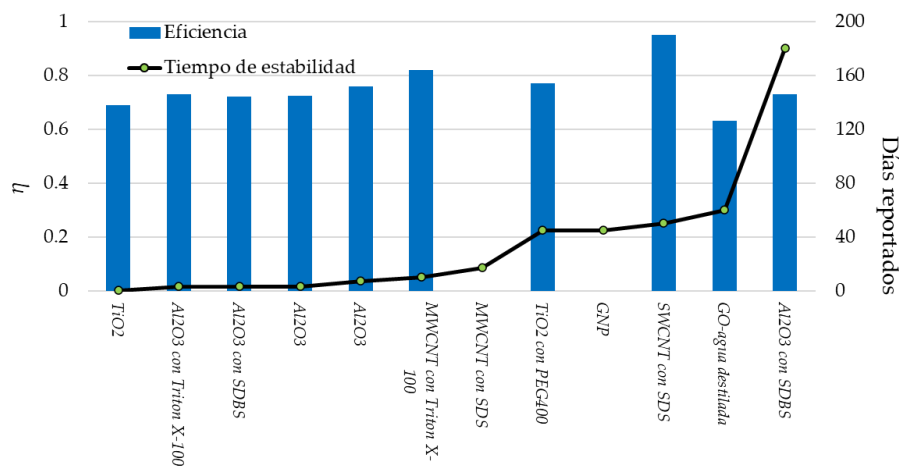


Figura 4. Eficiencia vs días reportados con estabilidad en FPSWH [13], [22], [27], [30], [39], [59], [70], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90].

1.2.6 Eficiencia de colectores solares de placa plana vs difusividad térmica y flujo

Es esencial realizar más estudios experimentales y teóricos para encontrar los principales parámetros que afectan al rendimiento de los sistemas solares que utilizan nanofluidos, el tamaño de las nanopartículas, la estabilidad de los nanofluidos, la aglomeración y la polidispersión de las nanopartículas, determinando su viabilidad de uso [91]. Las altas temperaturas aumentan la probabilidad y la fuerza de colisión de las nanopartículas y reducen el efecto de dispersión, afectando al equilibrio electrostático de la suspensión. La medición de potencial-Z se utiliza para evaluar la calidad de la dispersión de las nanopartículas en el fluido, y es el método más común. Un valor absoluto medio del potencial-Z es superior a 30, que significa una buena dispersión. Un potencial-Z más alto significa una alta dispersión y su deriva en el tiempo muestra el grado de estabilidad [92], [93], [94], [95]. La espectroscopia de absorción UV-VIS-NIR es otra forma de estudiar la dispersión de los nanofluidos, mediante absorción de la radiación electromagnética cuando ésta interacciona con la materia [56], [67]. El Sulfonato de alquilbenceno lineal (SDBS) por

inspección visual y métodos de medición de la transmitancia ha demostrado mejorar la dispersión, haciendo que los nanofluidos tengan más estabilidad, especialmente a bajas concentraciones [56], [67], [92], [93], [95]. También se ha encontrado que, la estabilidad de los nanofluidos depende de la temperatura durante la preparación de la muestra, y que la sedimentación es inversamente proporcional a la temperatura durante la mezcla cuando se utiliza un agitador magnético [93], [96]. La estabilidad de los nanofluidos es principalmente afectada por la agregación y la aglomeración de las nanopartículas.

La estabilidad de los nanofluidos se comporta principalmente en función de la interacción entre las nanopartículas y los fluidos base. La agregación y aglomeración de nanopartículas en suspensiones inestables conducen a la sedimentación, y esta última también afecta negativamente a la conductividad térmica reduciendo la transferencia de calor [92], [95]. Los fluidos base con alta viscosidad hacen que los nanofluidos sean más estables al generar menos aglomeración de partículas. Sin embargo, el aumento de la viscosidad reduce la transferencia de calor [97], [98]. Hwang *et al.* 2017 [99] prepararon nanofluidos con la reacción mecano-química en húmedo, mostrando propiedades de baja viscosidad, alta estabilidad y conductividad térmica.

Los nanotubos de carbono son un candidato prometedor como fluidos de trabajo en colectores solares de alto rendimiento [56]. En particular, los nanofluidos híbridos son prometedores en aplicaciones avanzadas de fluidos de transferencia de calor, especialmente en FPSWH, que deben comportarse con una estabilidad adecuada, propiedades ópticas y conversión fototérmica [94], [100]. Sin embargo, mientras que los artículos informan de mejoras en las propiedades termofísicas del fluido de trabajo, pocos muestran la estabilidad del fluido, y más aún cuando se utiliza en aplicaciones solares. La estabilidad es uno de los principales parámetros que afectan al rendimiento del fluido de trabajo debido a su aparente corta vida útil, que actualmente no se tiene en cuenta en la mayoría de los análisis de mejora del rendimiento de los SWH.

La **Figura 5** muestra el efecto de la variación del tamaño de las nanopartículas, la concentración disuelta en el fluido base y el caudal másico sobre la eficiencia térmica del colector solar de placa plana. La mayoría de los trabajos presentan un análisis con la variación de estos parámetros ya que son los que muestran cambios significativos en el rendimiento térmico de los colectores

solares. Los trabajos previos en un 63 % se reportan con nanopartículas de óxido metálico del, 4 % de metal, 17 % de carbono y de materiales compuestos (híbridos). Los trabajos experimentales reportados en su mayoría utilizan un caudal másico en el intervalo de 0.02 kg/s de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 9806:2017** “Energía solar — Colectores solares térmicos — Métodos de ensayo”, respetando las mismas condiciones para la evaluación del rendimiento térmico en colectores solares térmicos [27]. El mayor rendimiento térmico se ha reportado con nanopartículas híbridas, con un caudal de 0.02 kg/s, un tamaño medio de partícula de 20 nm y un porcentaje de partículas disueltas del 0.1 %, lo que representa un 83 %, lo que supone una mejora del 33 % respecto a los fluidos convencionales [43]. Como se observa, los caudales másicos pequeños desempeñan una función esencial, ya que mejoran considerablemente el rendimiento del FPSC. Otro factor determinante en la eficiencia térmica del FPSC es el tamaño y la forma de las nanopartículas ya que afectan al movimiento browniano de las partículas y a las características térmicas del fluido de trabajo. La mejor eficiencia térmica se ha obtenido para tamaños de partícula de 20-30 nm y porcentajes de partículas disueltas del 0.1-0.2 %p/p. Aún faltan la deriva de la eficiencia en el tiempo y la estabilidad del nanofluido.

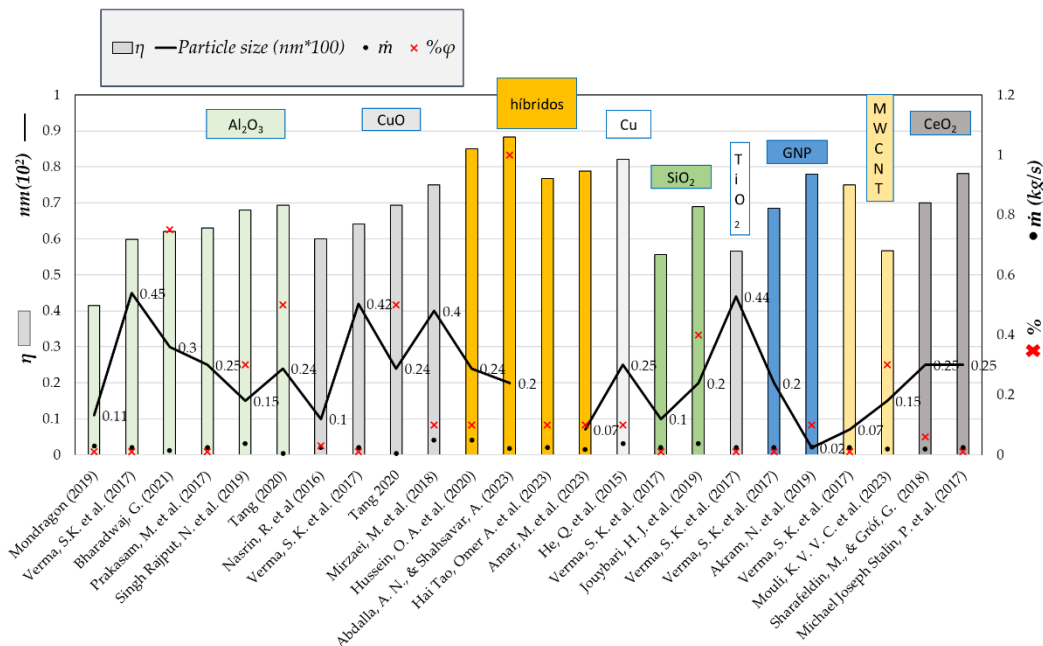


Figura 5. Influencia de las condiciones de los parámetros físicos de las nanopartículas y del flujo de masa en la eficiencia de los colectores solares de placa plana.

1.2.7 Impacto del ensuciamiento de las tuberías en la contaminación por nanofluidos

El ensuciamiento de tuberías con nanofluidos es común y afecta significativamente al rendimiento y la eficiencia térmica de los sistemas. Los mecanismos de ensuciamiento de las tuberías con nanofluidos implican procesos tanto físicos como químicos. El tamaño de las partículas y su concentración son importantes en la deposición de partículas incrustantes en sistemas que funcionan por convección natural con nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ [25]. La formación de capas de suciedad aumenta la resistencia tribológica, las caídas de presión, la obstrucción de tuberías, la contaminación y la corrosión [24]. El ensuciamiento de los nanofluidos depende del tiempo, y la deposición aumenta con el funcionamiento prolongado [26]. El ensuciamiento afectó significativamente al rendimiento térmico del nanofluido CuO/agua en un intercambiador de calor [24]. Así pues, los mecanismos de ensuciamiento en las tuberías de nanofluidos son importantes en el desarrollo de estrategias de mejora de los sistemas de intercambio de calor, sobre todo en los sistemas de colectores solares planos, donde los informes sobre el efecto del ensuciamiento son limitados.

Mitigar el impacto del ensuciamiento de las tuberías en los sistemas de nanofluidos es esencial para garantizar un rendimiento y una eficiencia óptimos. Se han propuesto estrategias de revestimiento y tratamiento de superficies para reducir el ensuciamiento de las tuberías de nanofluidos [45], [46], [101], [102]. Estudios mitigaron significativamente el ensuciamiento en las superficies de intercambiadores de calor con nanofluidos base agua con MWCNT tratados con EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), involucrando depósitos adherentes de nanopartículas [45]. Además, en los intercambiadores de calor, los recubrimientos basados en titanio, silicio y polímeros han mostrado una reducción del ensuciamiento mediante la modificación de la superficie a nivel de micro/nano escala [102].

El ensuciamiento también se conoce como deposición de partículas, reentrenamiento, aglomeración y colmatación, que se producen debido a las fuerzas de contacto entre las partículas y las fuerzas hidrodinámicas que afectan directamente al rendimiento de los sistemas [24]. Un tamaño de partícula pequeño facilita la dispersión, homogeneización y estabilidad y mitiga los fenómenos de abrasión y colmatación [103]. El transporte de calor mejora considerablemente el

rendimiento en los colectores solares con nanofluidos [47]. Sin embargo, la contaminación por ensuciamiento del nanofluido degrada el rendimiento de los intercambiadores de calor.

El efecto de la contaminación por nanofluidos en los colectores solares cuenta con escasos informes. Por lo tanto, la aplicación de estrategias eficaces en los colectores solares para mitigar el ensuciamiento de nanofluidos en las tuberías es esencial para determinar su rendimiento y eficiencia, minimizando al mismo tiempo el riesgo de fallo de los sistemas.

1.3 Conclusiones del Estado del Arte

Los nanofluidos como fluido de trabajo en FPSWH podrían ser prácticos si perdura la estabilidad. Uno de los principales obstáculos es la incertidumbre debida a la estabilidad de los nanofluidos, acerca de la vida útil y la temperatura de trabajo, que deben revisarse frente a las expectativas reales de vida útil en condiciones de trabajo al aire libre. El estado del arte pone de manifiesto la necesidad de realizar estudios de estabilidad de los nanofluidos, ya que sólo se ha registrado un tiempo máximo de estabilidad del 2.5 % en comparación con la vida útil de los FPSWH (0.5 años de tiempo estudiado frente a 20 años de vida útil habitual).

Los nanofluidos mejoran la eficiencia y los parámetros térmicos de los equipos térmicos solares. Sin embargo, el mayor reto de los nanofluidos como fluidos de trabajo en calentadores solares de agua de placa plana es su considerable coste. Por lo tanto, es importante realizar validaciones económicas durante largos periodos de tiempo, especialmente si la vida útil del nanofluido es corta. Actualmente, la mayoría de los estudios experimentales utilizan nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos, ya que son más baratas. La aplicación de nanofluidos poliméricos sigue en suspenso porque son considerablemente caros, ya que su mercado está en fase incipiente.

Los nanofluidos mejoran la eficiencia térmica entre un 5 y un 35 % con respecto a los fluidos de trabajo convencionales. La hibridación de nanopartículas muestra la mejor mejora del rendimiento térmico, llegando hasta un 30 % con respecto al fluido tradicional y alcanzando hasta un 85 % de eficiencia térmica.

El potencial-Z es uno de los indicadores más utilizados para establecer el grado de dispersión. Por tanto, la deriva de la dispersión de las partículas a lo largo de su vida útil puede definirse como la relación entre el potencial-Z y el rendimiento térmico.

La aplicación generalizada de los nanofluidos espera suspensiones de nanofluidos que mejoren la estabilidad a temperaturas más elevadas. Cuando aumenta la inestabilidad de las nanopartículas, aumenta la viscosidad del fluido de trabajo, así como la caída de presión; por tanto, la potencia de bombeo requerida es mayor debido al aumento de las fuerzas de fricción. El rendimiento térmico fue considerable utilizando partículas híbridas a un caudal de 0.04 kg/s, un tamaño medio de partícula de 24 nm y un porcentaje de partículas disueltas del 0.1%. Así pues, los caudales másicos pequeños desempeñan un papel esencial, ya que mejoran el rendimiento de los calentadores solares de agua de placa plana.

Las relaciones entre la estabilidad y las características de las nanopartículas en el fluido base deben mejorarse para una mejor aplicabilidad en los FPSWH. Es importante destacar que los estudios de nanofluidos durante periodos considerables son importantes para establecer su viabilidad en proyectos de aparatos solares. La incertidumbre de la estabilidad de los nanofluidos en FPSWH limita su uso en proyectos con escenarios a mediano y largo plazo.

Con lo anterior, se observa que, el estudio en periodos anuales de la aplicación de sistemas solares tipo placa plana, con nanofluidos, puede mostrar la viabilidad energética con mayor precisión considerando el nivel actual del desarrollo de su estabilidad.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Identificar el nivel de viabilidad termo-económica de uso de nanofluidos en sistemas de calentamiento solar con colectores de placa plana, considerando la estabilidad del nanofluido que se evalúa en términos de la eficiencia térmica.

Objetivos específicos

- Elaborar un diseño experimental para el estudio de la viabilidad de los nanofluidos en colectores solares en períodos anuales.
- Implementar un equipo experimental de acuerdo con el diseño experimental.
- Evaluar la viabilidad de un nanofluido de acuerdo con el diseño experimental y comparar los resultados con los dos casos de estudio.

1.5 Estructura de la Tesis

En el Capítulo 2 se presentan los modelos físicos y matemáticos, la obtención de las ecuaciones de trabajo y la estrategia experimental. En el Capítulo 3 se presenta la estrategia de solución, el equipo experimental, la instrumentación y calibración de todo lo que se modificó en el sistema utilizado para este proyecto. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los resultados. Al final, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros.

2. Materiales y método

La viabilidad termo-económica del colector solar de placa plana (FPSC) con nanofluidos en condiciones al exterior, se estudia considerando la estabilidad del nanofluido en términos de la eficiencia térmica y del potencial-Z. Las generalidades del lugar de estudio, colector solar y del fluido de trabajo se presentan en la Sección 2.1. En las secciones subsecuentes de este capítulo se desglosa el método propuesto para el estudio de la viabilidad. La **Figura 6** esquematiza de manera general el desarrollo de la investigación, se estructura en tres etapas principales: Entradas) donde se realiza la revisión del estado del arte y se establece el caso de estudio; Proceso) donde se lleva a cabo la caracterización del fluido de trabajo, se evalúa térmicamente el FPSC utilizando de nanofluidos de manera comparativa con un fluido de referencia, y se realiza la evaluación de la viabilidad, en términos económicos utilizando el LCOE y el retorno de la inversión. En la etapa de Salidas), se realiza el análisis, se estructuran los hallazgos y se difunden los resultados.

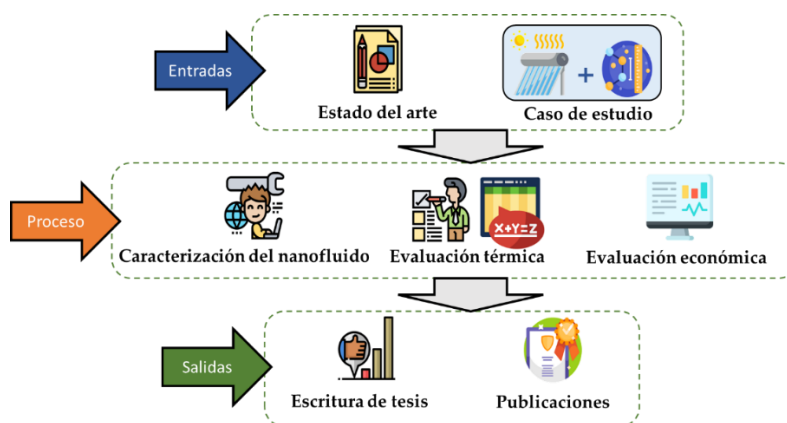


Figura 6. Estrategia de la investigación.

2.1 Caso de estudio

En esta sección se presenta el caso de estudio segmentándolo en Localización, Colector solar y Fluido de trabajo, buscando enfatizar el dónde, cómo, y con que se desarrolla este trabajo.

2.1.1 Localización

El estudio se realiza en Cuernavaca, Morelos, México, al norte del estado de Morelos, 18°55'07"N 99°14'03"O, donde se tiene un clima tropical de sabana, con temperaturas anuales máxima, mínima y media de 21.46, 11.80 y 20.73 °C, respectivamente. La humedad relativa promedio anual es de 62.64 %. La irradiación solar global total es de 3701 kWh/m²-año en promedio 10.14 kWh/m²-día, siguiendo los datos del año meteorológico típico Meteonorm v8. En la **Figura 7** se muestra de manera mensual la irradiancia solar diaria promedio, la cual es de 7.93-11.79 kWh/m², y marzo, abril y julio son los meses con mayor irradiación solar llegando a ser de 11.79, 11.64 y 11.18 kWh/m², respectivamente.

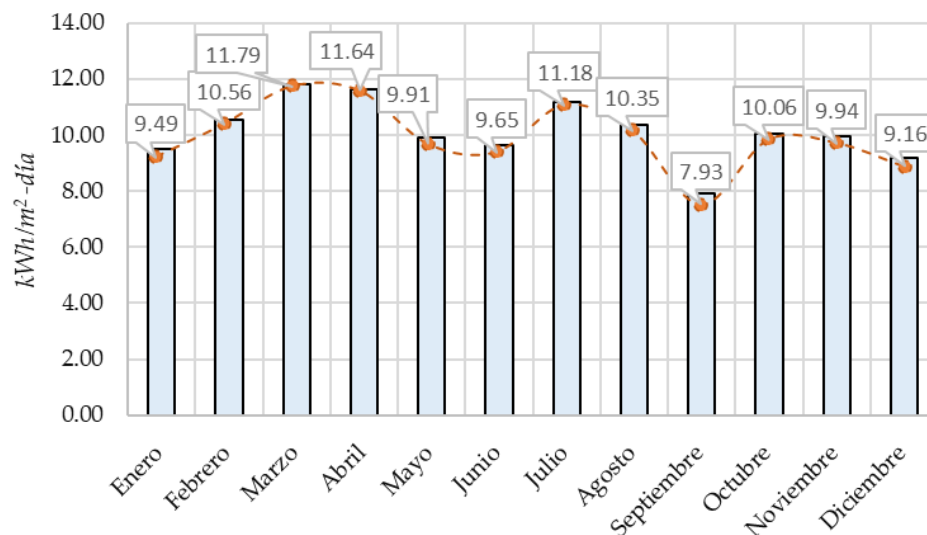


Figura 7. Irradiación solar mensual, Cuernavaca, Morelos, México.

2.1.2 Colector solar

La capacidad del colector solar se estima de 29.46 MJ/día (equivalente a 8.18 kWh/día), para el caso de operar en Cuernavaca, Morelos. La capacidad energética se deriva del área de captación, que en este caso es de 1.71 m² (0.95x1.8 m), resultando en una energía útil promedio de 4.78 kWh/m² por día, valor representativo de la radiación solar en la región. La **Figura 8** presenta las características del colector solar encapsulado, en un diagrama de despiece del colector, siguiendo a [29]. La placa de absorción se conforma de dos tubos cabezales horizontales con diámetro de 3.81 cm unidos con cinco tubos de elevación con diámetro 1.27 cm, y está terminada en pintura negro mate de 0.94 de absorbancia. Los tubos de elevación tienen aletas con ancho de 19 cm y espesor de 0.05 cm unidas con soldadura plomo-estaño y con una separación de 20 cm. La relación de aspecto de la caja es de 40, se utiliza aislamiento de fibra de vidrio con espesor 0.0254 m, la cubierta de vidrio es de 3 mm

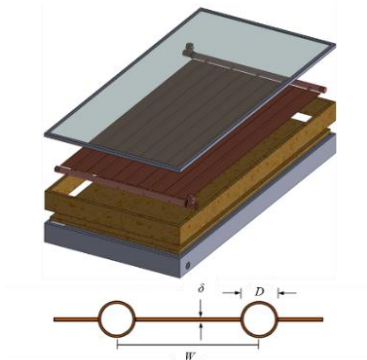


Figura 8. Colector solar de placa plana.

2.1.3 Fluido de trabajo

El fluido de trabajo es un nanofluido compuesto de óxido de aluminio de 50 nm de tamaño y forma amorfa semi esférica en agua como fluido base. El nanofluido contiene óxido de alúmina 0.02-0.03 %p/p por cada litro de agua. En la **Tabla 1** se muestran las características termofísicas de la nanopartícula. La base del fluido es agua que fue suministrada por un distribuidor de agua purificada de Cuernavaca, Morelos, México. Es agua potable con un bajo contenido de sal y minerales, 33.8 ppm, libre de bacterias, virus y otros microorganismos patógenos. El pH es de 7.7 (neutro), con un aspecto transparente, sin color ni turbidez, inodoro y libre de contaminantes.

Cumple con las regulaciones y normas de calidad de las organizaciones reguladoras basadas en las normas NMX-008-SCFI-2016, NMX-051-SCFI-2016 y NMX-072-SCFI-2001. El fluido base se considera confiable tanto para el consumo humano como para aplicaciones de alta pureza.

Tabla 1. *Propiedades termofísicas del nanofluido.*

Propiedades físicas	Agua	Al ₂ O ₃
C_p (J/kgK)	4179	765
ρ (kg/m ³)	997.1	3970
K (W/mK)	0.613	40
$Ax107$ (m ² /s)	1.47	131.7

Las nanopartículas de Al₂O₃ se obtuvieron de US Research Nanomaterials, Inc. Muestras. En la **Figura 9** se muestra la nanopartícula de Al₂O₃ es de fácil dispersión y de fuerte permeabilidad, con pH de 3.5-5.5, amorfa cuasi esférica. Las nanopartículas tienen una superficie 1000 veces mayor que la de las micropartículas. Esta mayor superficie de las nanopartículas conduce a una mayor conducción de calor en los nanofluidos, ya que la transferencia de calor se produce en la superficie de la partícula. El tamaño de las nanopartículas reduce la erosión, la obstrucción, y la potencia de bombeo.

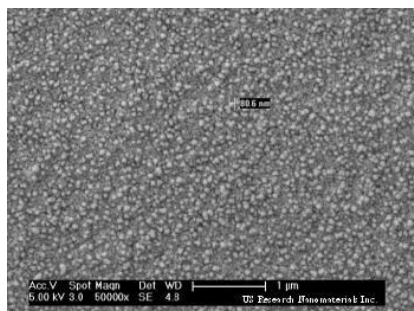


Figura 9. *Nanopartículas de Alúmina / Al₂O₃, nanopolvo amorfo 50 nm altamente auto dispersable.*

2.2 Caracterización del nanofluido

La caracterización del nanofluido involucra cuatro etapas para garantizar que es un nanofluido dentro de las características especificadas; se involucra la caracterización de las nanopartículas

mediante DRX, la preparación del nanofluido, la caracterización de nanofluido mediante SEM, y la caracterización de cantidad y tamaño de nanopartículas dispersas.

2.2.1 Caracterización de nanopartículas mediante DRX

La estructura cristalina del Al_2O_3 se identificó mediante difracción de rayos X utilizando un Bruker D8 Focus (Bruker, Madison, WI, EE. UU.), con radiación $\text{Cu K}\alpha$ monocromática de alta intensidad ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), funcionando a $20 \leq 2\theta/^\circ \leq 100$ y una velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$.

2.2.2 Tipo de preparación del nanofluido

Se pesaron tres muestras de 0.6003, 0.3000 y 0.1498 g de nanopartículas de Al_2O_3 en una balanza analítica (VELAB LA204, CDMX, México) con una incertidumbre de $\pm 0.0001 \text{ g}$. Las nanopartículas se dispersaron en 30 g de agua purificada en un baño ultrasónico (procesador ultrasónico VCX500, Sonics & Materials, Newtown, CT, EE. UU.) durante 60 minutos a 490 kW y 18 kHz. La temperatura de preparación se mantuvo a 60°C . La **Figura 10** muestra paso a paso la preparación del nanofluido de Al_2O_3 y agua.

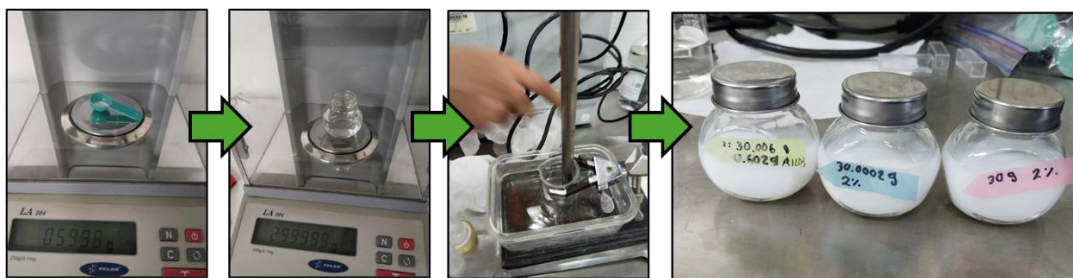


Figura 10. Preparación paso a paso del nanofluido.

Método de dos pasos

El método de dos pasos es el más utilizado para la preparación de nanofluidos. Las nanopartículas empleadas en esta metodología se obtienen inicialmente como polvos secos por medios químicos o físicos. A continuación, los polvos de tamaño nanométrico se mezclan en un fluido con agitación, homogeneizando para obtener el nanofluido final **Figura 11**. La metodología de dos pasos es la metodología más económica para suministrar nanofluidos en escala gigante. Debido a su gran extensión y actividad superficial, las nanopartículas tienen tendencia a combinarse entre sí. La técnica necesaria para reforzar la estabilidad de las nanopartículas en los

fluidos es utilizar tensioactivos. Sin embargo, la viabilidad de los tensioactivos a temperaturas elevadas es también un problema importante.

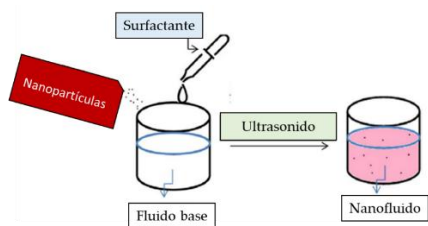


Figura 11. Esquema del proceso de dos pasos para preparar nanofluidos.

2.2.3 Caracterización del nanofluido mediante Microscopía Electrónica de Barrido

La morfología, la estructura y la distribución del diámetro del Al_2O_3 se observaron mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (JEOL JSM-7800F, Tokio, Japón) a 30 kV y una distancia de trabajo de 3.0 mm en modo USD. El Al_2O_3 para el análisis SEM se dispersó con agua utilizando un baño ultrasónico durante 30 minutos. Las mediciones del análisis estadístico se realizaron manualmente utilizando ImageJ (Research Services Branch, NIMH, Bethesda, MD, EE. UU.). Antes de comenzar las mediciones, cada imagen SEM se sometió a una calibración utilizando la barra de escala.

2.2.4 Caracterización de la cantidad y tamaño de nanopartículas dispersas

La caracterización de la cantidad y tamaño de nanopartículas dispersas se realiza mediante gravimetría de masa (cantidad de partículas), y con dispersión dinámica de luz (tamaño).

Gravimetría de masa

La gravimetría de masas es una técnica analítica que consiste en determinar la cantidad de una sustancia midiendo directamente su masa, y se utiliza para cuantificar componentes químicos con alta precisión a partir de un cambio de peso. Para garantizar una dispersión óptima, la verificación de la preparación del nanofluido de Al_2O_3 -agua implica gravimetría de masas, para esto se añade un número específico de nanopartículas a una masa de agua conocida. Se utiliza una balanza analítica para medir el peso total de la dispersión. A continuación, la dispersión se transfirió a una termobalanza para su secado a una temperatura controlada de 105.0 °C. Una vez completado el proceso de secado, se registra el peso final de las partículas restantes, lo que

permite calcular la pérdida de masa de las nanopartículas, como se muestra en las ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$W_{loss} = W_F - W_i \quad (2.1)$$

$$\%W_{loss} = \left(\frac{W_{loss}}{W_i} \right) 100 \quad (2.2)$$

W_{loss} , W_F , W_i , y $\%W_{loss}$ representan el peso perdido de las nanopartículas, el peso inicial y el porcentaje total de pérdida de nanopartículas, respectivamente.

Dispersión dinámica de luz

La dispersión dinámica de luz (DLS) es una técnica que se utiliza para determinar el diámetro de partículas en suspensión midiendo las fluctuaciones de la luz dispersada debido al movimiento browniano. La distribución del diámetro de las partículas de Al_2O_3 se midió utilizando un Zetasizer Nano ZSP (Malvern Instruments, Reino Unido). Las muestras se diluyeron a 20,000 ppm con agua purificada. Las mediciones se realizaron por cuadruplicado a una temperatura de 25.0 °C. Los diámetros medios de las partículas se calcularon utilizando la **Ecuación 2.3** [104]:

$$\bar{D}_Z = \frac{\sum n_i D_i^5}{\sum n_i D_i^4} \quad (2.3)$$

El índice de polidispersidad (PDI) se calculó utilizando las ecuaciones (2.4) a (2.6).

$$\bar{D}_n = \frac{\sum n_i D_i}{\sum n_i} \quad (2.4)$$

$$\bar{D}_w = \frac{\sum n_i D_i^5}{\sum n_i D_i^4} \quad (2.5)$$

$$PDI = \frac{\bar{D}_w}{\bar{D}_n} \quad (2.6)$$

donde n_i es el número de partículas con diámetro D_i en función del tamaño (Z), el número (n) y el peso (w).

2.3 Caracterización termofísica: estabilidad

La estabilidad del nanofluido en el calentador solar Stb, se evalúa mediante la comparativa la historia de la eficiencia térmica y del ζ . El estudio de la eficiencia involucra operar en paralelo un colector con nanofluidos y un segundo de referencia en condiciones al exterior usando calorimetría de flujo. La Stb se determina para la deriva en el tiempo del potencial-Z y la eficiencia térmica, de acuerdo con las ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$Stb_{\zeta} = \frac{\zeta(t) - \zeta(t-1)}{\Delta t} \quad (2.7)$$

$$Stb_{\eta} = \frac{\eta(t) - \eta(t-1)}{\Delta t} \quad (2.8)$$

En las pruebas al exterior, el potencial-Z se determina utilizando un zetámetro, a la par de la eficiencia térmica que se determina mediante calorimetría de flujo al exterior. En la **Figura 12** se indica la metodología de evaluación de la historia de ζ y de η .

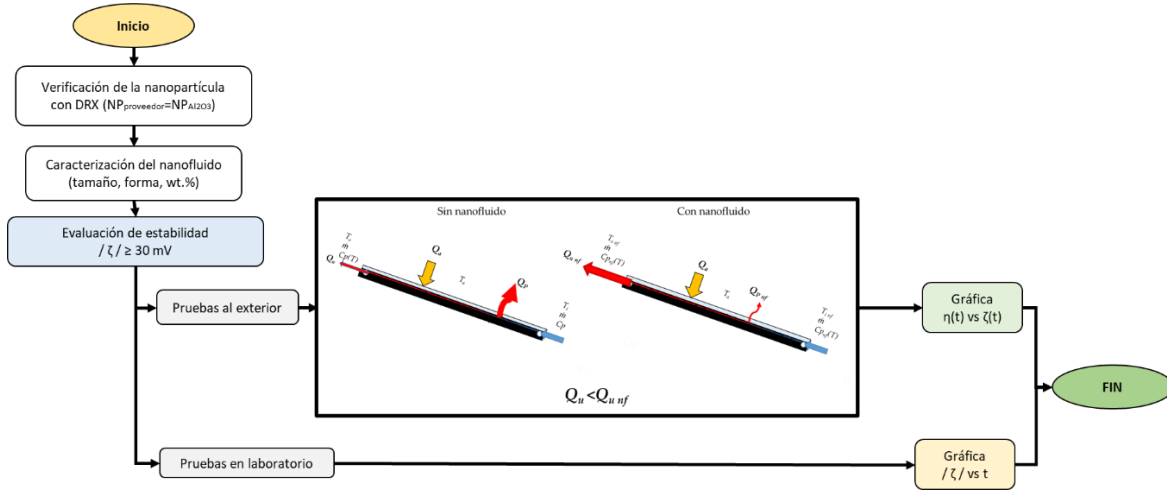


Figura 12. Metodología de evaluación térmica al interior y exterior.

2.3.1 Pruebas en laboratorio (al interior ζ)

Las pruebas de laboratorio se realizaron sobre muestras preparadas en recipientes graduados (probetas), sin interacción directa con el sistema de aplicación solar, con el fin de evaluar exclusivamente sus propiedades fisicoquímicas. La historia del potencial-Z se evalúa a pasos de tiempo Δt . Las mediciones del potencial-Z se realizan con un Zetasizer Nano ZSP (Malvern Instruments, Reino Unido). Las muestras se diluyen a 20 000 ppm con agua purificada. Las

mediciones se realizan por cuadruplicado a una temperatura de 25.0 °C. El análisis se lleva a cabo con muestras bajo condiciones de laboratorio y la medición del potencial-Z se revisa en períodos quincenales la prueba.

2.3.2 Pruebas al exterior (η y ζ)

Las pruebas en condiciones exteriores consistieron en el análisis de los parámetros térmicos y operativos de muestras obtenidas directamente del banco de pruebas del FPSC, representando el comportamiento real del sistema en operación. La **Figura 13** muestra el método de ensayo de estabilidad de los calentadores solares en condiciones exteriores, determinando la historia de la eficiencia de acuerdo con la Sección 2.4 y del potencial-Z como se indica en la Sección 2.3.1. El ensayo es un comparativo de la estabilidad de la eficiencia y del potencial-Z cuando el colector funciona con el nanofluido en comparación de cuando funciona con agua. El procedimiento implica cuatro pasos. El paso 1 implica la preparación de muestras, el paso 2 la caracterización de muestras en estado estacionario, el paso 3 el ensayo del historial del potencial-Z del nanofluido en condiciones al interior y el paso 4 el historial del potencial-Z del nanofluido en condiciones del colector al exterior.

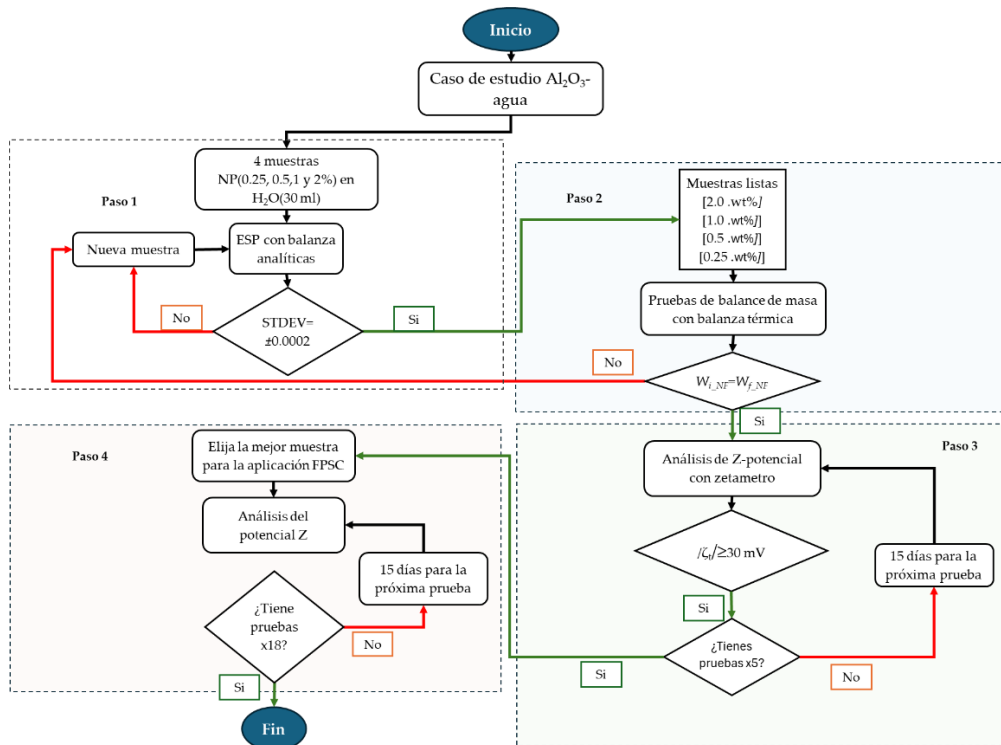


Figura 13. Pruebas de estabilidad del nanofluido.

El paso 1 se realiza como se indica en la Sección 2.2.1. El paso 2 se realiza conforme la sección 2.2.2, el Paso 3 conforme a la Sección 2.2.3 y el Paso 4 conforme a lo que se presenta en la Sección 2.3.1 para las pruebas al interior y conforme la sección 2.3.2 para las pruebas al exterior.

Eficiencia del FPSWH (η)

Modelo físico

Los flujos de energía en el colector solar de placa plana donde dependiendo la cantidad de radiación solar que entra por el vidrio se mide la energía aprovechada por el sistema (calorimetría de flujo), **Figura 14**. El fluido de trabajo que entra al colector a una razón de $\dot{m}$ por la parte inferior a una temperatura T_i , al finalizar su recorrido por la parte superior entrega una temperatura más alta T_o , logrando así una temperatura promedio en la placa de absorción. Celdas convectivas se forman dentro del colector entre la placa absorbidora y el vidriado provocando el intercambio de energía en forma de calor de adentro hacia afuera y viceversa. El calor removido por el fluido de trabajo se denomina Q_u para el caso referencia y Q_{uNF} para el caso de muestra en cuestión. Al mismo tiempo en el proceso se presentan pérdidas de calor y está generalmente se representa con Q_p para el caso de referencia y Q_{pNF} para el caso de la muestra. El comparativo se realiza estimando la relación entre la energía útil del sistema con nanofluidos Q_{uNF} y la Q_u del sistema con fluido convencional.

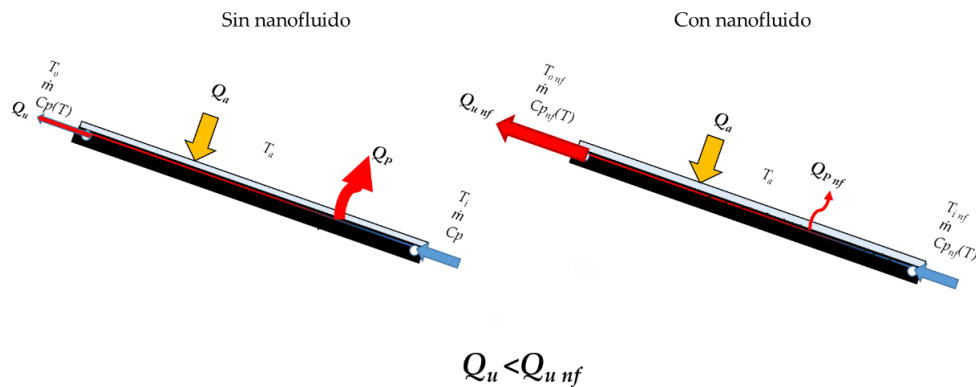


Figura 14. Modelo físico.

En general, el balance de las energías se hace para evaluar los flujos de calor involucrados para determinar la eficiencia térmica del sistema a causa de los efectos del transporte de energía a

causa del fluido de trabajo. La **Figura 14** muestra los flujos de calor involucrados en el balance de energía, de donde se obtiene la **Ecuación 2.9**, para determinar la energía útil Q_u .

$$Q_u = \dot{m} * C_p(T) * (T_o - T_i) \quad (2.9)$$

Las normas actuales evalúan generalmente la eficiencia de los calentadores solares de agua para interiores sin tener en cuenta las variaciones en las propiedades termofísicas del fluido de trabajo a medida que los nanofluidos se desvían. La estabilidad del nanofluido de Al_2O_3 -agua compara el historial de eficiencia térmica con respecto al fluido de trabajo de agua pura.

El diseño experimental para la medición de la eficiencia de los FPSC trabajando en paralelo se estableció con un horario de operación de 9:00 a. m. a 4:00 p. m. durante las horas diurnas si las condiciones ambientales lo permiten, **Figura 15**. Tras las pruebas experimentales en el FPSC, la curva de eficiencia se determina mediante la regresión lineal de la η vs $\frac{(T_i - T_a)}{G A}$ siguiendo a Duffie y Beckman [42]. Además de, tener en cuenta las normas NMX-ES-002-NORMEX-2007, NMX-ES-003-NORMEX-2007 y NMX-ES-004-NORMEX-2010, en línea con NMX-ES-001-NORMEX, 2005, UNE-EN ISO 9806:2017, FSEC-GP-5-80 y ANSI/ASHRAE 93-1986, ISO 9459-2:1995 y [29], [105].

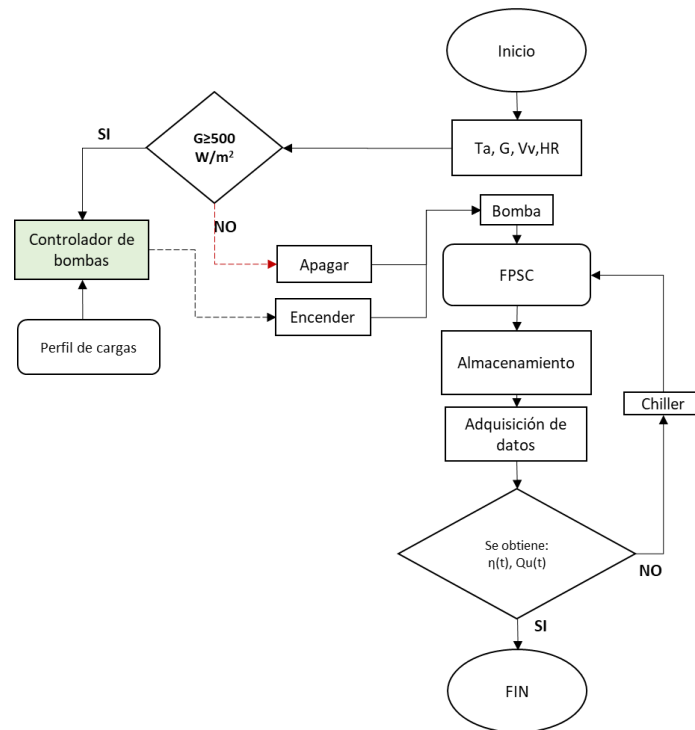


Figura 15. Evaluación de la eficiencia, a partir de la energía útil.

El potencial-Z se mide en intervalos de 15 días, y los cambios en las muestras de nanofluidos se documentan utilizando un Zetasizer Nano ZSP con el fin de identificar la deriva de nanofluido en términos de la dispersión de los coloides en milivoltios, cómo se especifica en la Sección 2.3.1.

Modelo matemático (Térmico)

La eficiencia térmica del colector solar con nanofluido considera modelos reportados de propiedades termofísicas de nanofluidos (conductividad térmica, calor específico y densidad). La eficiencia se determina con la **Ecuación 2.10**.

$$\eta = a_0 + a_1 \left(\frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (2.10)$$

a_0 y a_1 se determinan con las ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$a_0 = F_R (\tau\alpha) \quad (2.11)$$

$$a_1 = F_R U_L \quad (2.12)$$

El producto absorbancia-transmitancia, se determina con la **Ecuación 2.13**, donde τ es la transmitancia de la cubierta (0.92), α es la absorptancia de la placa absorbadora (0.93), ρ_{dif} es la reflectancia del vidriado (0.04). Con lo anterior $(\tau\alpha)_n$ tiene valor de 0.86.

$$(\tau\alpha)_\theta = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_{dif}} \quad (2.13)$$

El U_L se calcula con balances de energía, considerando los flujos de calor que entran y que salen del colector solar **Figura 14**, despreciando el calor que se puede almacenar en el colector solar.

$$\Sigma Q_{ent} = \Sigma Q_{sal} \quad (2.14)$$

U_L se determina con la **Ecuación 2.15**.

$$U_L = \frac{[(A_c * I) - [\dot{m} C_p (T_o - T_i)]]}{A_c (T_{mp} - T_a)} \quad (2.15)$$

La eficiencia estándar de las aletas rectas con perfil rectangular se calcula con la **Ecuación 2.16**, donde m se calcula con la **Ecuación 2.17**, W y D son medidas características del colector solar, obtenidas en trabajos anteriores García Rincón *et al.* (2022) [29].

$$F = \frac{\tanh\left[\frac{m(W-D)}{2}\right]}{\frac{m(W-D)}{2}} \quad (2.16)$$

$$m = \sqrt{\frac{UL}{k\delta}} \quad (2.17)$$

El factor de eficiencia del colector F' se determina con la **Ecuación 2.18**, donde D_i es el diámetro interno de los tubos aletados (m).

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W\left[\frac{1}{U_L[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h}\right]} \quad (2.18)$$

La conductancia de enlace C_b puede ser muy importante para describir con precisión el rendimiento del captador y se puede calcular con la **Ecuación 2.19**, donde k_b es la Conductividad térmica de la unión, γ es el espesor medio de la unión, y b es la anchura del enlace.

$$C_b = k_b \frac{b}{\gamma} \quad (2.19)$$

El factor de remoción de calor del colector puede calcularse con la **Ecuación 2.20**, donde, $\dot{m}$ es flujo másico (kg/s), C_P es el calor específico del fluido (J/kg K), A_c es el área del colector(m²).

$$F_R = \frac{\dot{m}C_P}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_P}\right) \right] \quad (2.20)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se determina con la **Ecuación 2.21**.

$$h = \frac{Nuk_f}{L} \quad (2.21)$$

La conductividad térmica del nanofluido a diferentes concentraciones se determina con la **Ecuación 2.22**, propuesto por Maxwell (1881), donde k_{NF} , k_f y k_s representan las conductividades

térmicas del nanofluido, el fluido base y las nanopartículas, respectivamente, y φ la fracción volumétrica de las partículas.

$$\frac{k_{NF}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\varphi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\varphi} \quad (2.22)$$

El calor específico del nanofluido se calcula con la **Ecuación 2.23**, siguiendo a Xuan y Roetzel (2000)[106], donde $(C_p)_{NF}$, $(C_p)_f$, $(C_p)_s$ son respectivamente los calores específicos del nanofluido, el fluido base y las nanopartículas.

$$(c_p)_{NF} = \frac{\varphi * \rho_s * (c_p)_s + (1 - \varphi) * \rho_f * (c_p)_f}{\rho_{NF}} \quad (2.23)$$

La densidad del nanofluido ρ_{nf} se calcula con la **Ecuación 2.24**.

$$\rho_{NF} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi * \rho_s \quad (2.24)$$

2.4 Evaluación de la viabilidad

El modelo experimental para el análisis termo-económico se basa en dos elementos: la eficiencia térmica del FPSC en función del tiempo y la estabilidad del nanofluido determinada por su potencial-Z. Una vez obtenido el modelo de eficiencia y los tiempos de estabilidad, se procede al cálculo económico mediante el LCOE para evaluar la viabilidad del uso de nanofluidos en FPSC.

La viabilidad del uso de nanofluidos en colectores solares planos (FPSC) se evalúa mediante el Costo Nivelado de Energía (LCOE), comparando la operación del FPSC con agua, con nanofluido y la referencia convencional de calentamiento con gas LP a lo largo de su vida útil. La **Figura 16** muestra en secciones el diseño experimental, donde se especifican el objetivo del estudio, las variables independientes utilizadas para determinar la eficiencia térmica, la ecuación general de trabajo y los criterios de estabilidad del fluido.

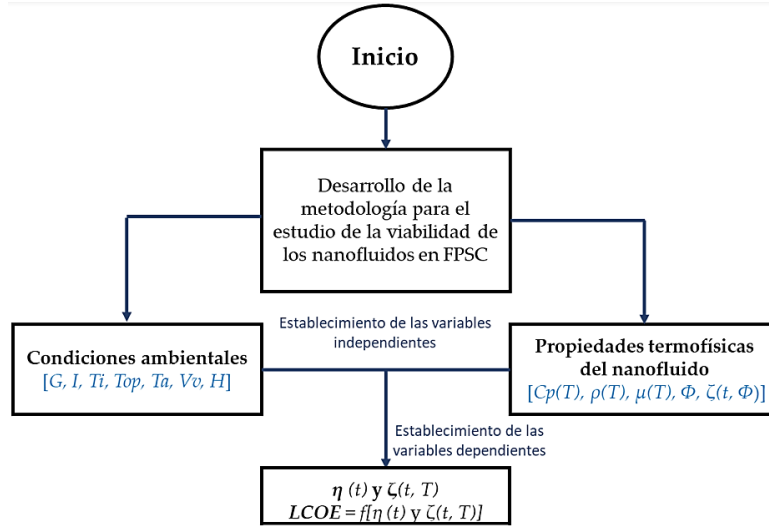


Figura 16. Diseño experimental.

El LCOE se determinó con base en la **Ecuación 2.25**.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{th}}{(1+i)^t}} \quad (2.25)$$

donde I_0 representa la inversión inicial, A_t los costos de operación y mantenimiento anuales, i la tasa de descuento, y M_{th} la energía térmica útil generada en cada periodo t . La suma pondera los flujos económicos y energéticos en valor presente, permitiendo una comparación equitativa entre tecnologías con diferentes estructuras de costos y desempeños térmicos.

3. Calorimetría de flujo: η y ζ

En este capítulo se describen los procedimientos experimentales desarrollados en la calorimetría de flujo. Inicialmente se presenta de manera general el diseño y la implementación del banco de pruebas empleado para llevar a cabo las mediciones de calorimetría de flujo hacia el exterior, detallando los elementos principales que lo conforman y su funcionamiento. Posteriormente, se expone el método de procesamiento de señales utilizado, incluyendo las etapas de adquisición, filtrado y análisis de los datos obtenidos. Finalmente, se aborda la estimación de la incertidumbre experimental asociada a las mediciones, con el propósito de evaluar la confiabilidad y la trazabilidad de los resultados obtenidos.

3.1 Configuración experimental

3.1.1 Sistemas y equipos

Para las pruebas de eficiencia y energía útil se realiza el comparativo de los rendimientos térmicos de dos FPSC trabajando en paralelo, el de la izquierda con el fluido convencional (agua) y el segundo a la derecha con el fluido caso de estudio (Al_2O_3 -agua). La **Figura 17** muestra el equipo experimental utilizado para la evaluación térmica del uso de nanofluidos con el método de calorimetría de flujo al exterior.



Figura 17. Calentadores solares de estudio.

Por otro lado, la **Figura 18** muestra el equipo experimental subdividido en dos partes. La primera denominada Calorimetría de flujo al exterior donde se presenta **1a) La termo-hidráulica** para

determinar la eficiencia de los dos colectores solares, el primero es la referencia y el segundo es el de estudio. La implementación del sistema termo-hidráulico implica: el soporte y fijación de muestras de colectores, Estación meteorológica, Acondicionador de fluidos para la calorimetría y Sistema de adquisición y monitoreo de datos.

Las energías útiles $Q_{u\ Ag}$ y $Q_{u\ NF}$ se determinan con la **Ecuación 2.9**, con las mediciones de $T_{i\ Ag}$, $T_{i\ NF}$, $T_{o\ Ag}$, $T_{o\ NF}$, $\dot{m}_{Ag}$, $\dot{m}_{NF}$, T_a y G (8 señales analógicas). La segunda llamada Procesamiento de señales subdividida en dos, adquisición y monitoreo de señales y monitoreo remoto, **1b)** Adquisición y monitoreo de señales. El sistema de adquisición y monitoreo de datos permite registrar la lectura de las ocho señales analógicas, las convertirte en señales digitales, ordena los datos digitales para la construcción de la base de datos, y envía con un formato específico los datos a un dispositivo remoto por Wi-Fi. **1c)** El monitoreo remoto permite el ordenamiento de los datos procesados por los sensores para realizar el almacenamiento es online mediante *Arduino IoT Cloud*, para el cálculo de la energía útil y la eficiencia. Para esto, se reciben los datos enviados por *Wi-Fi*, en archivos “*csv*”, y se procesan en Excel. Las historias de las ocho señales se utilizan para determinar los calores útiles y eficiencias. El arreglo experimental de calorimetría de flujo al exterior es concordante con lo reportado por García-Rincón *et al.* (2022) [29].

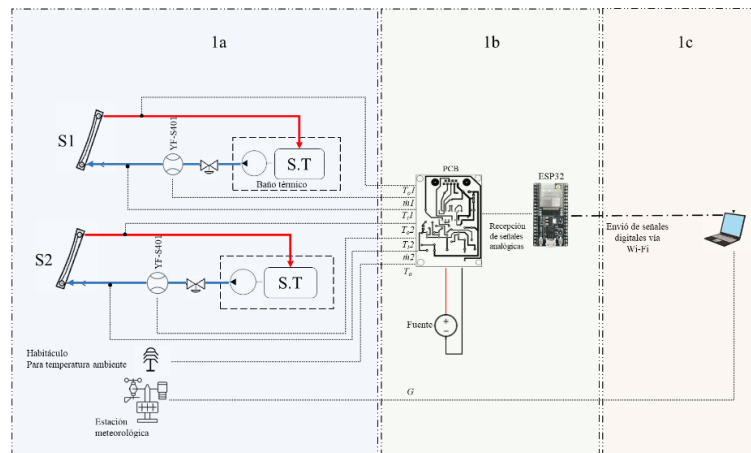


Figura 18. Equipo calorimetría de flujo al exterior dividido en subsistemas 1a) Termo-hidráulico, 1b) Adquisición y monitoreo de datos y 1c) Dispositivo de monitoreo remoto.

3.1.1.1 Soporte y fijación de muestras de colectores

El soporte se construye en acero inoxidable, con inclinación de 21° al sur, concordando con el intervalo de $10-30 \pm 5^\circ$, de acuerdo con la latitud del lugar y la estación del año, siguiendo la norma NMX-ES-003- NORMEX-2007.

3.1.1.2 Estación meteorológica

La estación meteorológica utilizada fue de tipo Ambient Weather WS-2902c, **Figura 19**. El intervalo de medición de la irradiancia solar es de $0-2367 \text{ W/m}^2$ con precisión de $\pm 15 \%$. La temperatura ambiente con precisión de $\pm 1.1^\circ \text{C}$. Las variables involucradas se miden y registran a intervalos de 10 min.

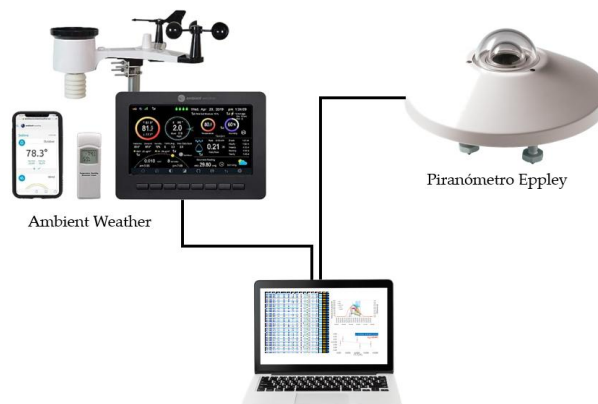


Figura 19. Estación meteorológica.

El sensor de irradiancia solar es un piranómetro Eppley modelo SPP con intervalo espectral de 295-2800 nm, lo que en lectura digital se puede manifestar en valores de hasta milivolts. La ESP32 es un microcontrolador que presenta un punto muerto de 0.2 V, lo que significa que las mediciones de voltaje inferiores a este umbral no son detectadas. Esto obligó al uso de un amplificador de bits que incrementó la resolución de la ESP32 de 12 a 16 bits, para detectar hasta 0.0078125 mV. En esta arquitectura, el piranómetro mediante una señal analógica se conecta al módulo ADS1115, el cual se encarga de convertir y amplificar dicha señal para mejorar la exactitud en su digitalización.

3.1.1.3 Colector solar de placa plana

Para esta etapa del Desarrollo experimental, se restauraron dos colectores solares de placa plana los cuales se encontraban deteriorados, **Figura 20**. Se desarmó cada colector y se restauró cada uno de sus componentes, alisando las aletas de la placa absorbedora, lijando, puliendo cada componente y volviendo a pintar, se realizó un barrido con agua caliente para expulsar impurezas en tuberías, se armó la caja del encapsulado, se agregó fibra de vidrio como aislante y se usó una cubierta de vidrio de 4 mm de espesor con alta transmisividad y poca reflectividad.

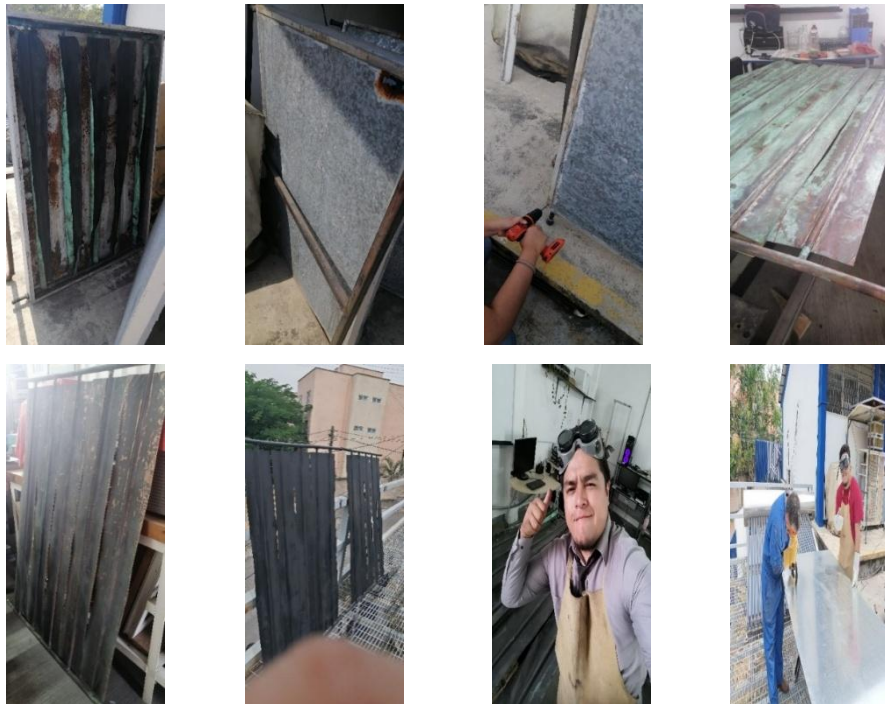


Figura 20. Proceso de restauración del colector solar.

3.1.1.4 Acondicionador de fluidos para la calorimetría

El acondicionador de fluido consta de dos baños térmicos conectado en serie, que funcionan como controladores de temperatura y flujo, donde el primero reduce de manera poco precisa la temperatura del flujo y el segundo es para dar la precisión requerida a la temperatura y al flujo. El sistema cuenta con un arreglo de válvulas esfera y sensor tipo turbina con efecto Hall para controlar el flujo con una precisión del 3.0 %. El baño 1 (chiller) cuenta con una potencia de enfriamiento de 2.0 kW, el baño 2 y 3 (Polyscience) tienen una potencia de enfriamiento de 0.5

kW y de calentamiento de 1.0 kW. La estabilidad de la temperatura es de $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ y permite controlar la temperatura en el intervalo de $30.0\text{--}60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

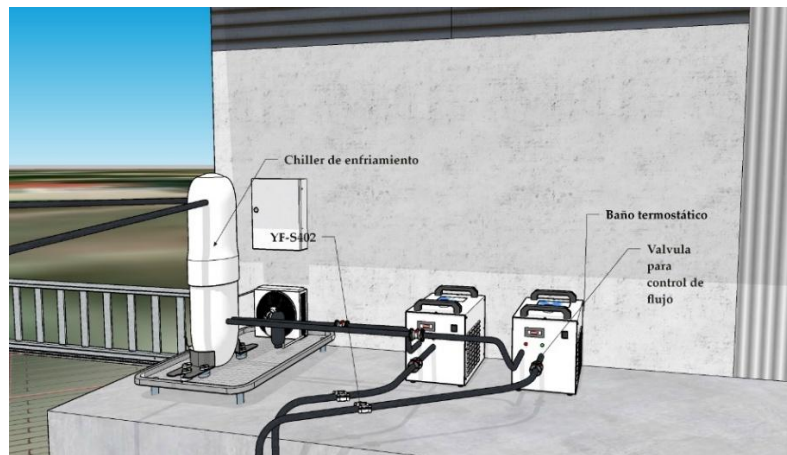


Figura 21. Acondicionador de flujo y temperatura de entrada con baños térmicos y chiller de enfriamiento.

En la **Figura 22** se muestra el baño térmico, donde se utiliza el PolyScience 9112, el cual trabaja en un intervalo de -20 a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$. El sistema cubre los requerimientos de la norma ANSI/ASHRAE 93-1986 [108], permite acondicionar el fluido de trabajo, y establecer la temperatura.



Figura 22. Baño térmico.

3.1.1.5 Sistema de enfriamiento

La potencia por trabajar es de 1.4 kW_t por colector solar, con lo que se contempla un chiller de enfriamiento con capacidad para enfriar 3.5 kW_t . Con esto el sistema de enfriamiento cumple el requerimiento para poder bajar la temperatura al fluido de trabajo y tener un buen control de la temperatura de entrada (T_i), **Figura 23**. Además, el sistema de enfriamiento recibió un mantenimiento correctivo por la falta de uso, asegurando que el chiller no presente fallas durante

el año de prueba utilizando como base la norma NOM-026-ENER-2015, *eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire, límites, métodos de prueba y etiquetado* [110].



Figura 23. Sistema de enfriamiento para control de Temperatura de entrada (T_i).

3.1.1.6 Bomba de circulación

El sistema de bombeo hace fluir el nanofluido y el agua, es una bomba periférica para agua modelo QB-60 de $\frac{1}{2}$ HP, la cual se rehabilitó con mantenimiento, siguiendo las normas IRIM 1001-20100101 a IRIM 1001-20100107, referidas a las tareas de mantenimiento mínimas que deben aplicarse a bombas centrífugas de todo tipo [107].



Figura 24. Mantenimiento de bomba hidráulica.

3.1.2 Sensores y controladores

3.1.2.1 Control de flujo másico

Se realizó un control del flujo másico con el fin de evaluar la eficiencia térmica conforme a las normas aplicables y garantizar un comparativo confiable entre los sistemas analizados. Se utilizó un sensor de flujo YF-S201 **Figura 25**, es un sensor compatible con el controlador Arduino. El sensor internamente tiene un rotor cuyas paletas tiene un imán, la cámara en donde se encuentra el rotor es totalmente aislado evitando fugas de agua, externamente a la cámara tiene un sensor de efecto hall que detecta el campo magnético del imán de las paletas y con esto el movimiento del rotor, el sensor de efecto hall envía los pulsos por uno de los cables del sensor, los pulsos se convierten posteriormente a flujo mediante una calibración por gravimetría.

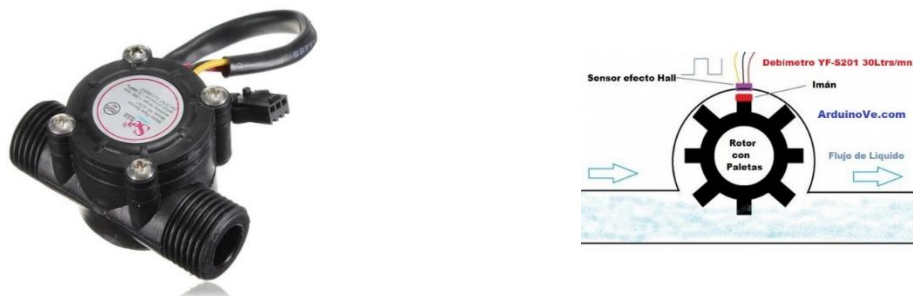


Figura 25. Sensor de flujo YF-S201.

El sensor se ubicó después de una válvula de control de flujo para poder regular el caudal másico a 0.02 kg/s por colector según el caudal másico estándar ASHRAE 93-77 **Figura 26** para probar colectores solares de agua planos convencionales [108], [109].

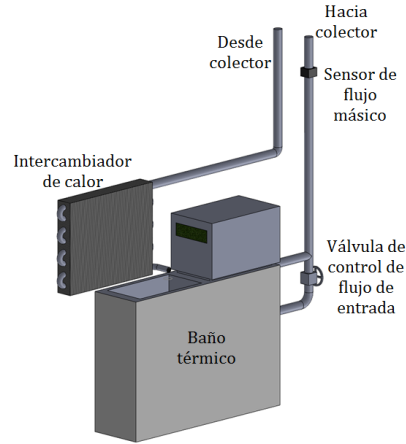


Figura 26. Arreglo de control de flujo del sistema de calentamiento solar de agua.

El sensor de flujo es YF-S201 se calibró siguiendo la **Ecuación 3.1**:

$$\dot{m} = \frac{f}{k} * 0.016 \quad (3.1)$$

donde $\dot{m}$ es el caudal en L/min, f la frecuencia en Hz y k es la constante del sensor (7.5), que se determina experimentalmente.

La calibración se realizó mediante un comparativo experimental vs modelo del fabricante para calibrar el sensor de flujo, a partir de su desviación estándar. La **Figura 27** muestra los datos de la calibración del flujo masico en el sistema; la desviación estándar promedio fue de 0.18 por lo que el error es de ± 0.09 LPM.

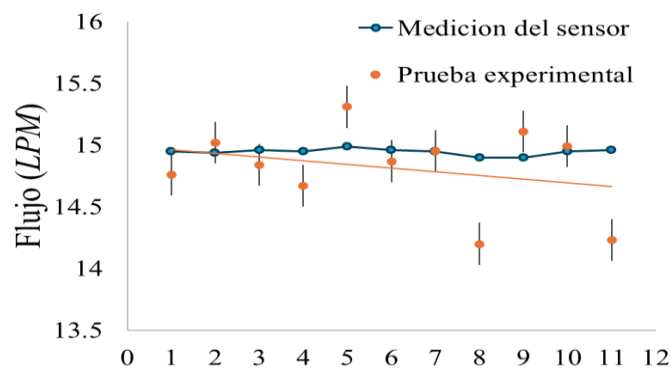


Figura 27. Resultados de pruebas de sensores de flujo másico.

3.1.2.2 Sensores de temperatura

El sensor **DS18B20** se ha utilizado en aplicaciones de calorimetría de flujo [112] y [113]. También se ha utilizado en aplicaciones industriales y de investigación como lo reporta [114]. La calibración implicó determinar la constante que en su caso fue de 0.0625, por lo que la temperatura se determina con la **Ecuación 3.2**:

$$T (^{\circ}C) = 0.0625 \times \text{Lectura digital} \quad (3.2)$$

La caracterización de los sensores se realiza tomando de referencia una temperatura fija y controlada por un baño termostático. El baño termostático permitió ajustar los datos de temperatura y a su vez permitió medir el flujo másico, debido a su intervalo de temperaturas y precisión de trabajo, y a que también funciona como bomba hidráulica **Figura 28**.



Figura 28. Prueba de sensores con baño termostático PolyScience.

Las pruebas se realizaron para 6666 segundos, evaluando 607 puntos donde la temperatura de referencia fue de 25°C. La **Figura 29** muestra una desviación estándar promedio de 0.18 °C. Los resultados mostraron funcionalidad y certidumbre del programa y de los sensores.

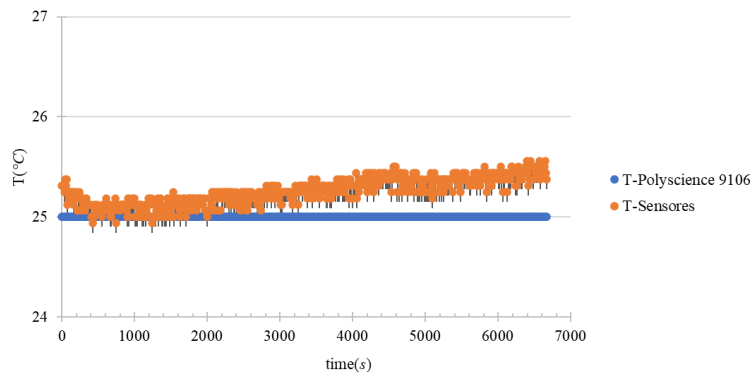


Figura 29. Resultados de pruebas de sensores de temperatura.

3.2 Procesamiento de señales

El procesamiento de señales comprende la adquisición, digitalización, monitoreo y el registro de datos experimentales utilizados en la calorimetría de flujo al exterior. La **Figura 30** muestra la arquitectura general del sistema empleado que permite capturar y analizar las señales en tiempo real. Los sensores instalados en el módulo experimental detectan los cambios de temperatura, flujo y condiciones ambientales. En el proceso de adquisición de datos, las señales de los sensores se envían a una placa de conexión tipo PCB y de ahí a un microcontrolador ESP32, que realiza la adquisición y digitalización. La información digitalizada del microcontrolador se transmite de manera inalámbrica hacia una tarjeta maestra (Raspberry PI), que permite dar formato a los datos mediante un programa para poder ser enviados a la nube vía *Wi-Fi*. En la base de datos se almacenan y visualizan los datos, provenientes de la tarjeta maestra y los envía a terminales vía *Wi-Fi* para su monitoreo y registro. El monitoreo y registro se realiza accediendo al servidor de la nube vía *Wi-Fi*, como ya se dijo, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real y el registro histórico de las variables medidas de la misma manera.

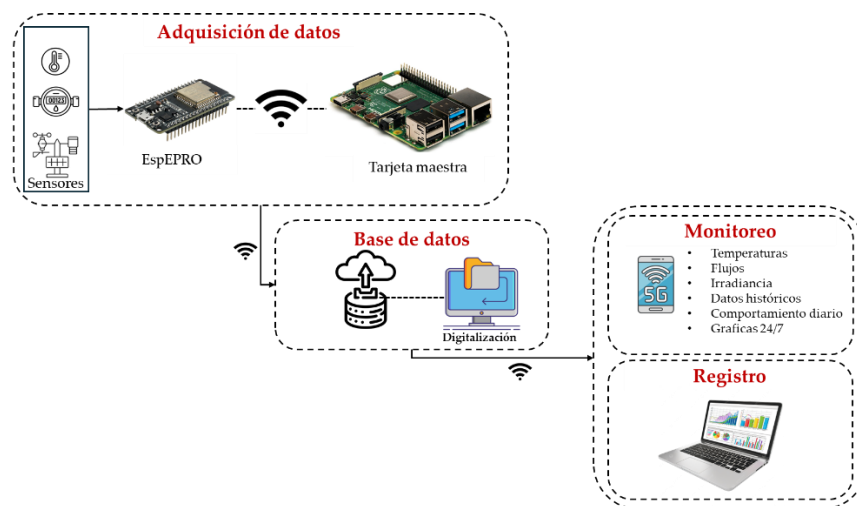


Figura 30. Etapas del procesamiento de señales para la calorimetría de flujo al exterior.

3.2.1 Adquisición de datos

La integración de la placa receptora con el microprocesador permite la adquisición de datos en tiempo real de las variables físicas del sistema, con alta precisión, así como su procesamiento y

almacenamiento para estudios posteriores, de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 9806:2013. El adquisidor de datos comprende el Microprocesador ESP32 y la placa PCB receptora de señales analógicas. La placa PCB recibe señales analógicas provenientes de los sensores, las acondiciona y transmite hacia el microprocesador ESP32, encargado de su digitalización.

Microprocesador ESP32

El microprocesador recopila datos de cinco sensores de temperatura tipo termopares, dos sensores de flujo tipo turbina y un piranómetro Eppley. La información analógica se convierte a digital, y los datos se envían vía Wi-Fi para su tratamiento y para la toma de decisiones en un procesador de manera remota. El microprocesador es de 32 bits, y utiliza la plataforma de Arduino IoT Cloud para la transmisión de datos para el monitoreo remoto.

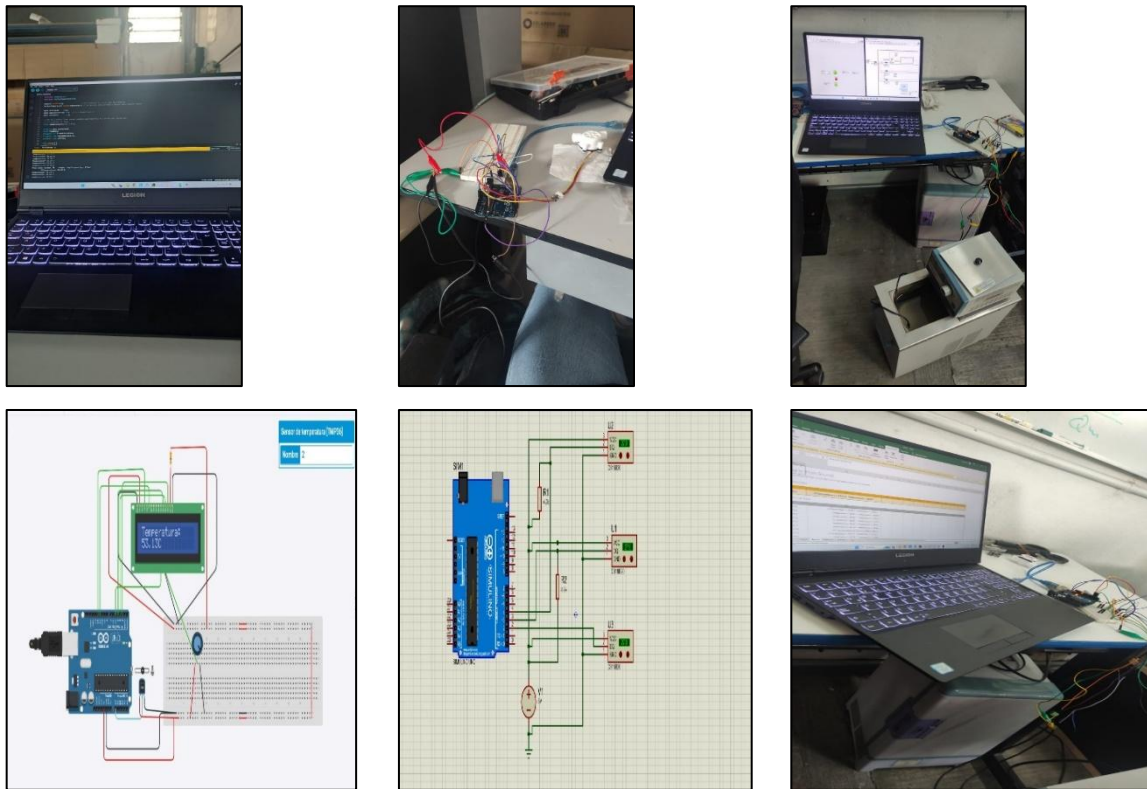


Figura 31. Microprocesador ESP32 con sensores para la calorimetría de flujo.

Placa receptora de señales analógicas

La placa receptora de señales analógicas está diseñada para recibir y distribuir las señales provenientes de los sensores, convirtiéndolas en información eléctrica en mV, que puede

procesarse por el microcontrolador. El receptor es una placa tipo PCB (Printed Circuit Board). La **Figura 32a** muestra el circuito realizado en LIVEWIRE, donde se incluyen las entradas de los sensores, resistencias, fuente de alimentación y salidas correspondientes a cada sensor. El diseño se exporta a PCB WIZARD para su fabricación. La **Figura 32b** presenta la placa impresa, obtenida mediante el planchado sobre placa de cobre y un baño de ácido férrico para eliminar el exceso.

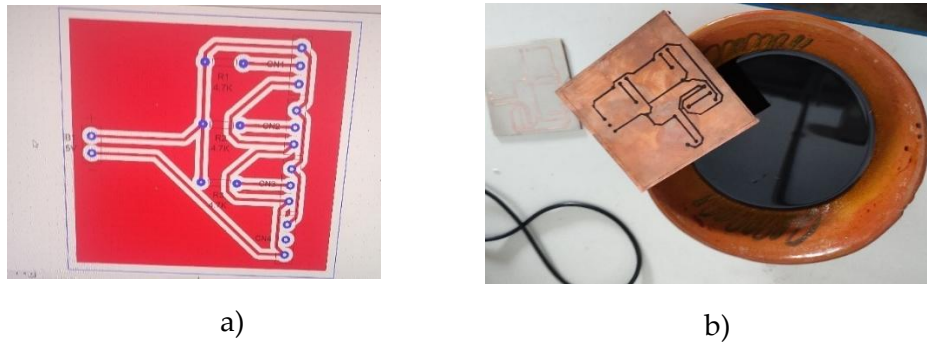


Figura 32. a) Circuito PCB en PCB WIZARD y b) Tratamiento con ácido férrico de la PCB.

3.2.2 Base de datos

En la base de datos se almacenan y visualizan los datos, provenientes de la tarjeta maestra y los envía a terminales vía *Wi-Fi* para su monitoreo y registro

Almacenamiento

El almacenamiento registra en tiempo real, datos de las temperaturas entrada-salida, temperatura ambiente, flujo volumétrico y radiación solar. El almacenamiento de los datos digitales involucra la recepción de datos analógicos provenientes de la placa PCB en el microprocesador ESP32, los datos digitalizados se transmiten vía *Wi-Fi* mediante un servidor remoto a la nube de *Arduino IoT Cloud*.

Visualizador de datos.

La tarjeta ESP32, se programa en lenguaje C++, recibe y procesa las señales provenientes de los diferentes sensores mediante su convertidor analógico-digital, el cual opera con una resolución de 5 V/1024 unidades (0.0049 V por unidad digital). Estas señales se transforman posteriormente en sus magnitudes físicas como temperatura (°C) y flujo másico (L/s) utilizando las ecuaciones características de cada sensor. Durante la etapa de desarrollo, Tinkercad se empleó para simular

el comportamiento del sistema, validar la lectura de sensores y comprobar el funcionamiento de la pantalla LCD destinada a la visualización local de los datos. Una vez verificado el código, la implementación final en la ESP32 permitió no solo mostrar las variables experimentales en la pantalla, sino también transmitir las en tiempo real a la plataforma *IoT Cloud* mediante su conectividad *Wi-Fi* integrada. Esta funcionalidad garantiza el monitoreo remoto, el almacenamiento continuo y el análisis detallado de las mediciones, aportando precisión, trazabilidad y confiabilidad al proceso experimental.

3.2.3 Monitoreo y registro

El monitoreo y registro se realiza accediendo al servidor de la nube vía *Wi-Fi*, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real. En esta sección también se presenta la verificación del funcionamiento y el registro histórico a través de la plataforma *IoT Cloud* de las variables medidas de la misma manera.

Lectura de datos

El código en la plataforma de *Arduino IDE* permite imprimir los datos recibidos por el puerto serie gracias a la función *serialprint* y a la versatilidad de este entorno de programación para múltiples aplicaciones como se observa en la **Figura 33**.

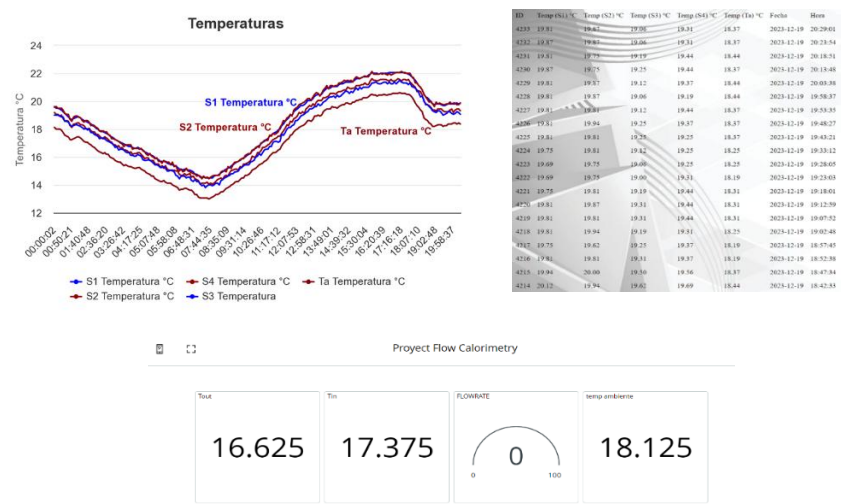


Figura 33. Transmisión de datos.

Monitoreo desde la nube

El monitoreo del sistema se realiza mediante la plataforma *IoT Cloud*, lo que garantiza que todas las variables experimentales se registren y supervisen en tiempo real de manera confiable y representativa. La interfaz de la nube permite visualizar los valores instantáneos, así como los máximos y mínimos alcanzados, y generar tablas completas organizadas por fecha y hora, como se muestra en la **Figura 34**. Los gráficos de temperatura e irradiancia solar facilitan el seguimiento dinámico del sistema a lo largo del día y apoyan el filtrado y tratamiento estadístico de los datos. Esta funcionalidad asegura que la información obtenida sea consistente y útil para los cálculos posteriores de energía absorbida, energía útil y eficiencia térmica del colector solar.

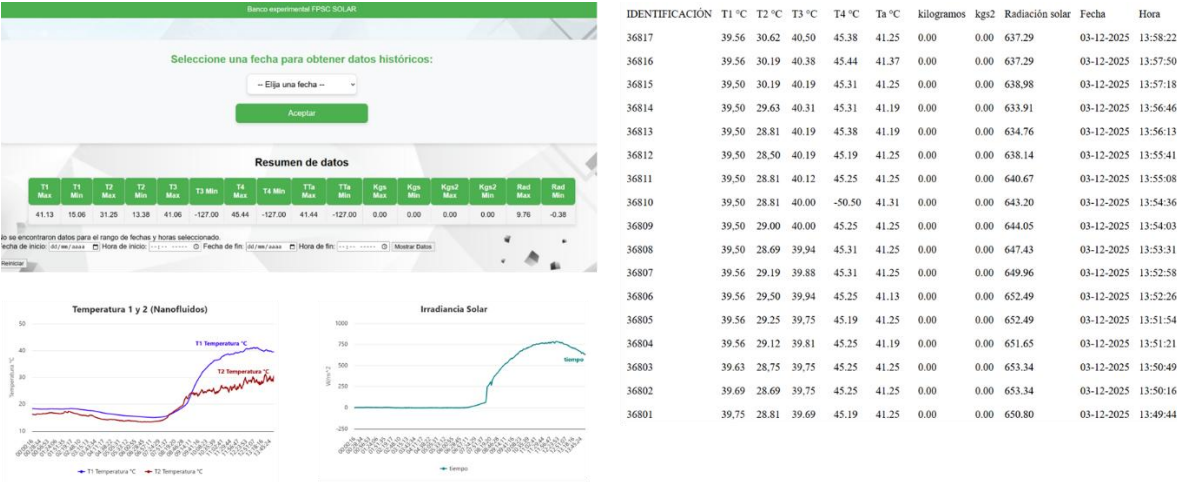


Figura 34. Plataforma de monitoreo de parámetros para la calorimetría de flujo al exterior.

Verificación del sistema de adquisición de datos

Se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la unidad de monitoreo. Estas pruebas consistieron en confirmar, mediante la plataforma *IoT Cloud*, que el sistema se conectara automáticamente a la red *Wi-Fi* disponible y operara en línea de manera estable. Además, se evaluó que los datos correspondientes a temperatura, flujo másico e irradiancia se actualizarán periódicamente cada minuto, garantizando la disponibilidad continua de información confiable para el monitoreo en tiempo real y el análisis energético posterior. Este procedimiento asegura que el sistema cumple con los requisitos de precisión, consistencia y trazabilidad exigidos en el estudio experimental.

Registro histórico

Los datos registrados se pueden exportar de forma ordenada en formato png, pdf, csv y xlsx, para su mejor control y ordenamiento como se muestra en la **Figura 35**. Finalmente, los datos ordenados se procesan manualmente para la obtención de las figuras principales en este trabajo como lo son la eficiencia térmica solar, las ganancias y las pérdidas globales de los FPSC con y sin nanofluidos.

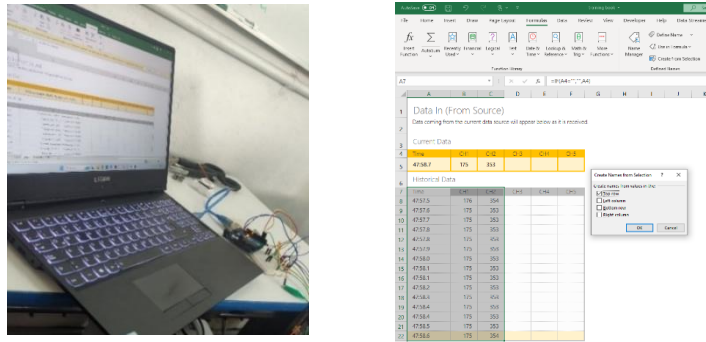


Figura 35. Obtención de datos con librería Data Streamer.

3.3 Incertidumbre experimental

Las incertidumbres de los sensores calibrados y utilizados en nuestra propuesta tecnológica se establecen en la **Tabla 2** y se contrastan con la plataforma de monitoreo alámbrica de referencia.

Tabla 2. Precisión del sensor.

	<i>Incertidumbre sensores caso de referencia</i>	<i>Incertidumbre sensores propuesta tecnológica</i>
T_a	$\pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
T_o y T_i	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\dot{m}$	$\pm 10\text{ }\%$	$\pm 9\text{ }\%$
G_a	$\pm 15\text{ }\%$	$\pm 1\text{ }\%$
microprocesador	10 bits	16 bits

3.3.1 Análisis de correlación e importancia

Mediante una matriz completa de coeficientes de correlación de Pearson se analizó los parámetros con mayor sensibilidad en el rendimiento térmico del colector solar [111]. El análisis revela correlaciones significativas a medida que el coeficiente se aproxima a uno, siendo el diferencial de temperatura el que muestra la relación más pronunciada con la eficiencia del colector solar de 0.61, como se muestra en la **Figura 36**.

Este minucioso análisis proporciona información valiosa sobre las correlaciones entre T_R , η , Q_u y Q_{abs} y las condiciones meteorológicas involucradas en el rendimiento del FPSC y las temperaturas involucradas en el proceso (T_i , T_o , T_{amb} y G_s).

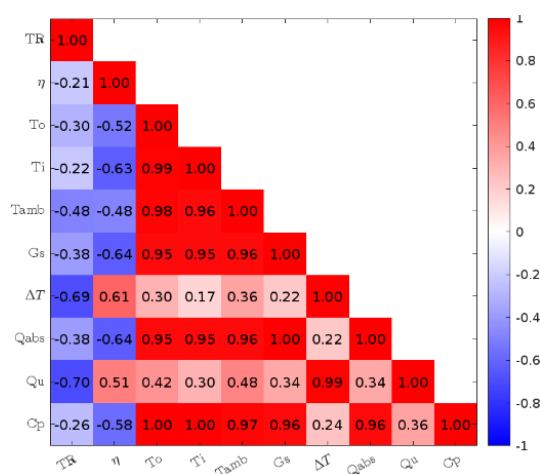


Figura 36. Análisis de correlación de Pearson FPSC.

La **Figura 37** ilustra tras el análisis de importancia por el método de bosque aleatorio, los parámetros más importantes que hacen sensibles las cifras de mérito del rendimiento del FPSC (T_R , η , Q_u y Q_{abs}). El ΔT es el parámetro más sensible. En el FPSC, los parámetros ΔT , C_p , T_i y G_s (0.61, 0.58, 0.63 y 0.64) son los más sensibles en la determinación del rendimiento térmico; siendo directamente proporcional el ΔT e inversamente proporcional los otros tres parámetros.

Este análisis subraya el papel crucial de estos parámetros en el proceso de la evaluación del rendimiento térmico de colectores solares, destacando su importancia para lograr resultados óptimos.

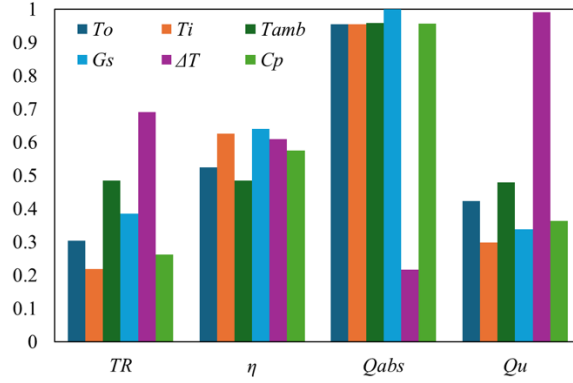


Figura 37. Parámetros de importancia en el rendimiento de FPSC.

3.3.2 Análisis de error

La incertidumbre de monitorización de la eficiencia del equipo $\partial(\varphi)$, se calculó combinando las contribuciones de cada variable medida según las ecuaciones (3.1) y (3.2), y los datos presentados en la **Tabla 2**, en concordancia con [111].

$$\partial(\varphi_R) = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \varphi_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \varphi_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$\partial(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial T_o} \cdot \delta T_o \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_i} \cdot \delta T_i \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} \cdot \delta \dot{m} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial G} \cdot \delta G_s \right)^2} \quad (3.2)$$

Los resultados obtenidos muestran que la incertidumbre de monitorización para el sistema propuesto y para el sistema de referencia fue de 0.05 y 0.12, respectivamente. Estos valores indican que la eficiencia se determinó con una precisión adecuada, y permiten comparar la confiabilidad de las mediciones entre ambos sistemas.

4. Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la caracterización del nanofluido, destacando sus propiedades más relevantes para su uso en sistemas solares térmicos. También, se presentan los resultados del análisis térmico del colector solar plano (FPSC), comparando la eficiencia del sistema al operar con agua y con el nanofluido desarrollado. Seguidamente, se presenta la evaluación de la estabilidad del nanofluido en dos condiciones: en interiores, sin exposición solar, y en exteriores, bajo condiciones reales de radiación. Finalmente, se incluye el estudio económico del sistema, mediante el cálculo del Costo Nivelado de Energía (LCOE) para tres escenarios: con agua, con nanofluido y con combustibles fósiles, permitiendo así una comparación integral desde el punto de vista técnico y económico.

4.1 Caracterización del nanofluido

La caracterización del nanofluido implicó las pruebas de DRX de las nanopartículas, las pruebas al nanofluido por SEM, la caracterización de la preparación del nanofluido y la caracterización del nanofluido con relación al tamaño y dispersión de las nanopartículas.

4.1.1 Verificación del material Al_2O_3

Las pruebas de dispersión de luz en las nanopartículas se realizaron para confirmar que los ángulos dobles de los picos característicos fueran similares a los reportados en análisis de difracción de rayos X (DRX) de Al_2O_3 . La **Figura 38** muestra el gráfico de difracción de rayos X, con tres picos significativos en ángulos 2θ de 28, 37 y 48°, tal y como suele ocurrir con la alúmina. Los picos de concentración alcanzan más de 15000 nanopartículas, mostrando la calidad cristalina según como se reporta en [115], [116].

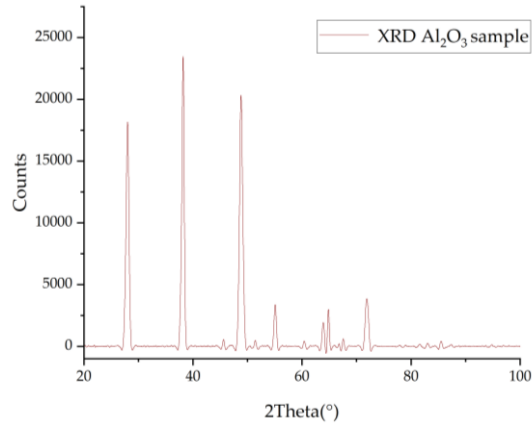


Figura 38. Análisis por difracción de rayos X (DRX) de una muestra de Al_2O_3 .

Siguiendo a Waseda Y., Matsubara E. y Shinoda K., el óxido de aluminio se cristaliza en una estructura tipo corindón hexagonal [117]. El difractograma obtenido mediante esta técnica muestra los reflejos hkl en ángulos 2θ de 28.0075° (PSD de 18,159.46), 38.2007° (PSD de 23,482.95) y 48.8229° (PSD de 20,337.64). Así, los índices de Miller permitieron los planos de 100, 110 y 200; en comparación con el patrón de difracción ASTM 10-0173, se analizó el óxido de aluminio en la fase corindón ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) [118].

4.1.2 Microscopía electrónica de barrido

El SEM se utilizó para caracterizar los materiales compuestos. La **Figura 39** presenta micrografías de nanopartículas de Al_2O_3 . El modelo del microscopio es JEOL JSM-6701 Fiel Scanning Electron Microscope (Tokio, Japón). Las condiciones en las que se observaron las muestras fueron una distancia de trabajo de 10.2 mm, un detector de electrones secundarios con una tensión de aceleración de 10 kV y aumentos en el rango de 1000 a 200000x. El estudio muestra una nanopartícula de Al_2O_3 amorfa cuasi esférica y una superficie porosa con tamaños heterogéneos inferiores a 50 nm.

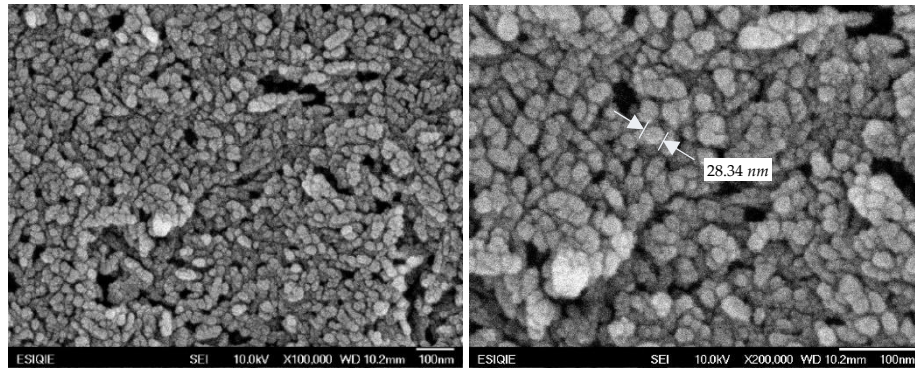


Figura 39. Nanopartícula de Al_2O_3 , nanopartícula amorfa altamente autodispersable de 50 nm.

El análisis estadístico de la distribución del diámetro del Al_2O_3 a partir de la imagen SEM (**Figura 39**) se realizó para identificar el tamaño real promedio de las nanopartículas, lo que permitió, identificar nueve clases de tamaños. La distribución de diámetros en forma de histograma se presenta en la **Figura 40**. El tamaño de partícula más pequeño fue de 20.19 nm y el más grande, de 38.21 nm. Tras realizar cálculos estadísticos con los datos agrupados, se obtuvo una media de 26.67 nm, con una desviación estándar de 4.19 nm y una moda de 24.57 nm.

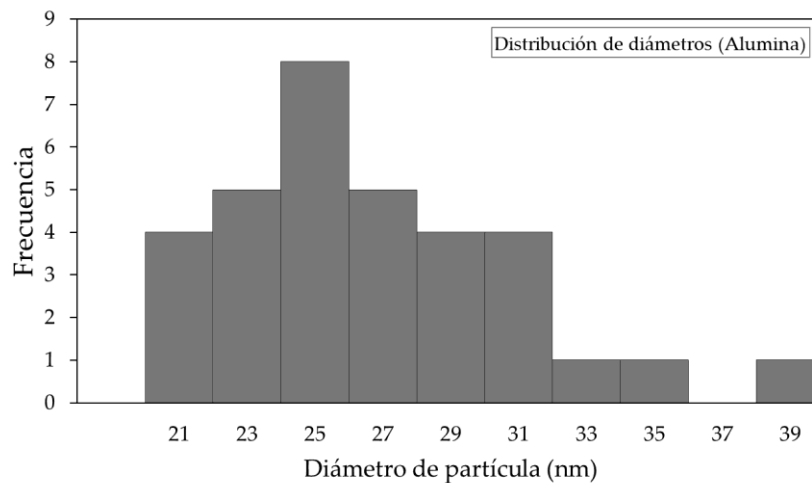


Figura 40. Análisis estadístico de la distribución del diámetro del Al_2O_3 a partir de la imagen SEM (Figura 45).

4.1.3 Caracterización de la preparación del nanofluido Al_2O_3

Las muestras de alúmina preparadas en 30.0 g de agua como base con un 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 % en peso de nanopartículas demostraron los mejores porcentajes para evitar sedimentación. Los resultados de la verificación mediante la determinación de la relación de cambio de masa de las nanopartículas tras un proceso de secado con una balanza térmica OHAUS MB45, a 105 °C, con una precisión de 0.001 g y 0.015 % respecto al porcentaje de humedad. La **Tabla 3** muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3. Preparación de la muestra.

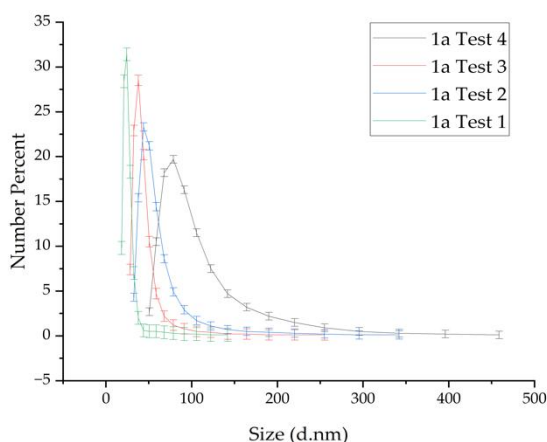
Concentración Al_2O_3 (%p/p)	Estabilidad inicial	Estabilidad a largo plazo	Conductividad térmica	Eficiencia FPSWH	Observaciones
< 1.0 %	Muy baja	Sedimenta rápidamente	Mínimo aumento	Baja	Dispersión nula
1.0–1.5 %	Moderada	Disminuye con el tiempo	Mejora leve	Media	A veces estable con dispersante
≈ 2.0 %	Buena	Se mantiene	Alta	Óptima	Homogeneización progresiva
> 3.0 %	Variable	Tiende a aglomerar	Muy alta	Menor (por viscosidad)	Riesgo de sedimentación

A concentraciones moderadas, cercanas al 2.0 % en peso, el nanofluido con nanopartículas de alúmina presenta un equilibrio favorable entre conductividad térmica y estabilidad, lo que se puede traducir en una mayor eficiencia del sistema de calentamiento solar (FPSC). En este rango, la dispersión de las partículas mejora la transferencia de calor sin aumentar de forma significativa la viscosidad, permitiendo un flujo adecuado y un rendimiento térmico más estable. En cambio, a concentraciones inferiores al 1.5 %, la inestabilidad del sistema provoca una sedimentación más rápida, mientras que concentraciones superiores al 3.0 % incrementan la viscosidad. Con el paso del tiempo, los nanofluidos menos concentrados tienden a desestabilizarse de manera temprana, evidenciando separación de fases, mientras que aquellos con un 2.0 % en peso logran mantener una estabilidad más duradera o incluso mostrar cierta homogeneización progresiva, resultado del equilibrio entre las fuerzas atractivas y repulsivas de las partículas. Esta estabilidad sostenida permite conservar el comportamiento térmico del fluido a lo largo del tiempo, favoreciendo su desempeño continuo en condiciones reales de operación.

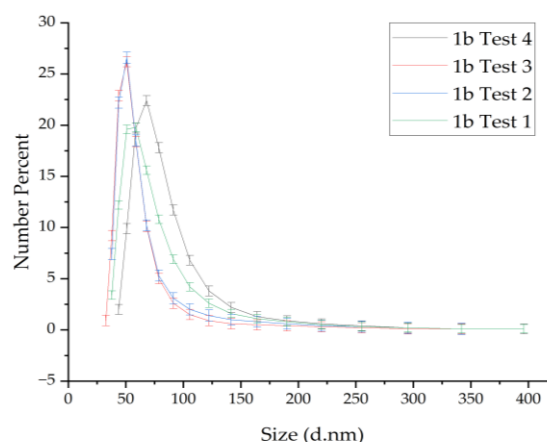
4.1.4 Caracterización de nanofluidos

Tamaño de las nanopartículas

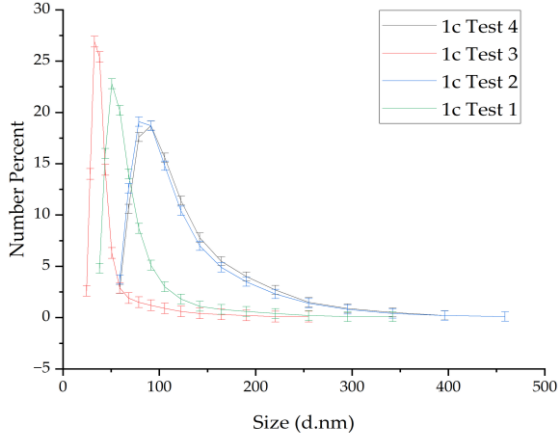
Los resultados de la evaluación de los diámetros de las partículas de las cuatro muestras de Al_2O_3 -agua al 2.0 % en peso (a) 1a, (b) 1b, (c) 1c y (d) 1ub se grafican con ayuda del Zetasizer Nano ZSP, **Figura 41**. La muestra de nanofluido 1ub se preparó con un baño ultrasónico a una frecuencia de 20.0 kHz, con una temperatura de 25.0 °C, añadiendo nanopartículas parciales en el fluido y un tiempo de 30.0 min con intervalos de pausas de dos y un minuto. Las ecuaciones (2.3)-(2.6) permiten calcular el diámetro de las nanopartículas D_z y el índice de polidispersidad PDI, que establece la relación entre la masa molar media y el número de cadenas de óxido metálico. Los resultados muestran un PDI superior a 2.0, lo que significa que la longitud de las cadenas de óxido metálico es variable. Sin embargo, la muestra 1ub tiene un PDI inferior a dos, lo que indica que la longitud de las cadenas de óxido metálico tiene tamaños similares. Los tamaños medios encontrados para 1a, 1b, 1c y 1ub fueron 185.22, 226.94, 221.26 y 93.15 nm, lo que muestra un error experimental de 38.45, 5.07, 22.96 y 22.86 nm. Los métodos de preparación y dispersión de nanofluidos mostraron ser fundamentales para establecer una dispersión estable y homogénea.



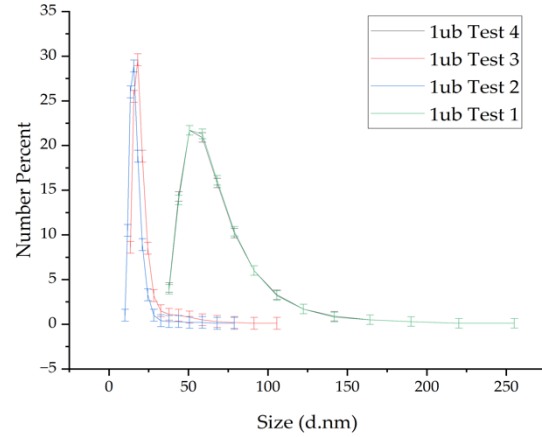
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 41. (a) Muestra 1a Al_2O_3 -agua 2.0 %p/p, (b) Muestra 1b Al_2O_3 -agua 2.0 %p/p, (c) Muestra 1c Al_2O_3 -agua 2.0 %p/p, y (d) Muestra 1ub Al_2O_3 -agua 2.0 %p/p con preparación en baño ultrasónico.

Tamaño de las nanopartículas vs tiempo

Los resultados obtenidos del diámetro hidrodinámico de las partículas, en contraste con el índice de polidispersidad (PDI) de las muestras analizadas, evidencian que, en las etapas iniciales, el tamaño promedio de las nanopartículas es relativamente bajo. No obstante, con el transcurso del tiempo se observa un incremento progresivo del diámetro, atribuible a la aglomeración de las partículas presentes en el sistema, lo que genera fluctuaciones tanto en el tamaño como en la polidispersidad. La **Figura 42** muestra las gráficas correspondientes a la evolución temporal del tamaño de las nanopartículas en el nanofluido.

En fases intermedias, el sistema presenta una polidispersión elevada, reflejando una distribución heterogénea de tamaños de partícula y una interacción dinámica entre los aglomerados formados. Finalmente, hacia las etapas posteriores del estudio, tanto el tamaño de partícula como el índice de polidispersidad tienden a estabilizarse, alcanzando valores promedio de aproximadamente 200 nm y un PDI cercano a 2, respectivamente. Estos resultados indican que el nanofluido alcanza un estado de equilibrio coloidal aparente; sin embargo, el tamaño final de las partículas sugiere una alta probabilidad de sedimentación a largo plazo, debido al incremento de la masa efectiva y a la disminución de la energía de estabilización estérica o electrostática.

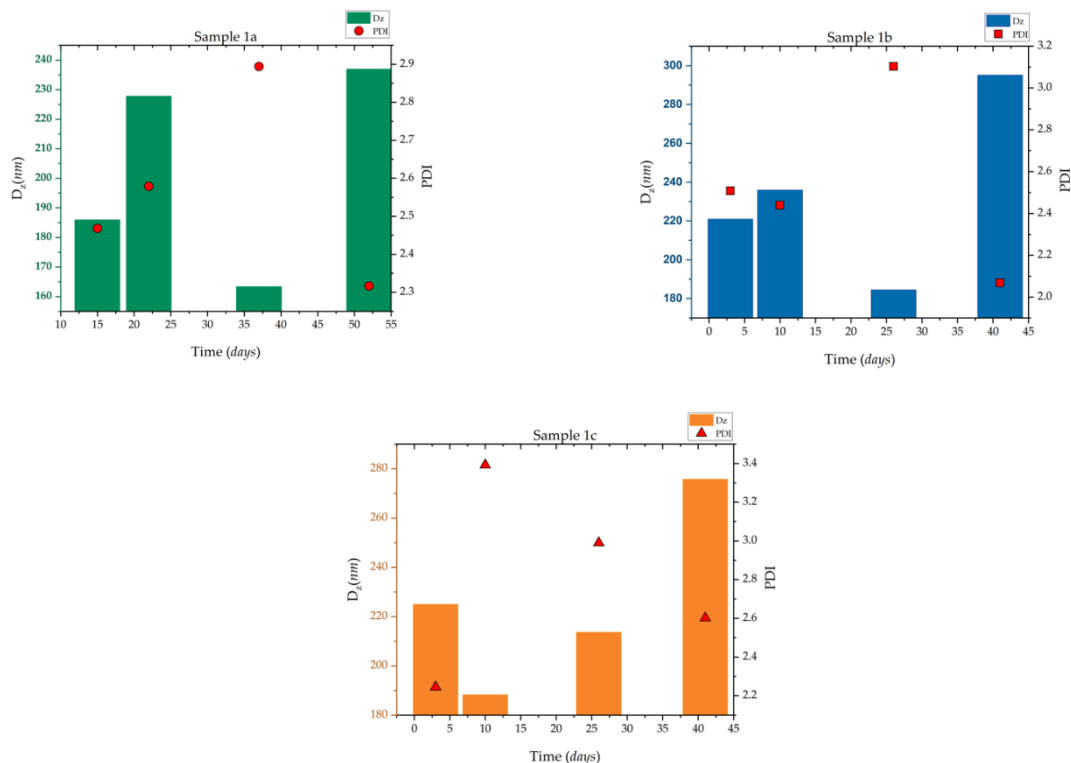


Figura 42. Historial del diámetro de las partículas (D_z) y del índice de polidispersidad (PDI) de las muestras 1a, 1b y 1c.

Potencial-Z del nanofluido

La **Figura 43** muestra los resultados del potencial-Z para las 4 muestras de nanofluido Al_2O_3 -agua al 2.0 %p/p. Las muestras (a) 1a, (b) 1b y (c) 1c se prepararon con agitación mecánica no controlada, y la muestra (d) 1ub se preparó con un baño ultrasónico. Los valores del potencial-Z para las muestras 1a, 1b, 1c y 1ub fueron 33.05, 33.62, 29.65 y 33.48 mV, con errores experimentales de 0.21, 0.23, 0.11 y 0.25 mV. Los resultados del potencial-Z muestran que las dispersiones están por encima de 30 mV, lo que indica una estabilidad aceptable. El potencial-Z fue de hasta 44.4 mV, lo que muestra la estabilidad en la preparación de la muestra mediante el método del baño ultrasónico.

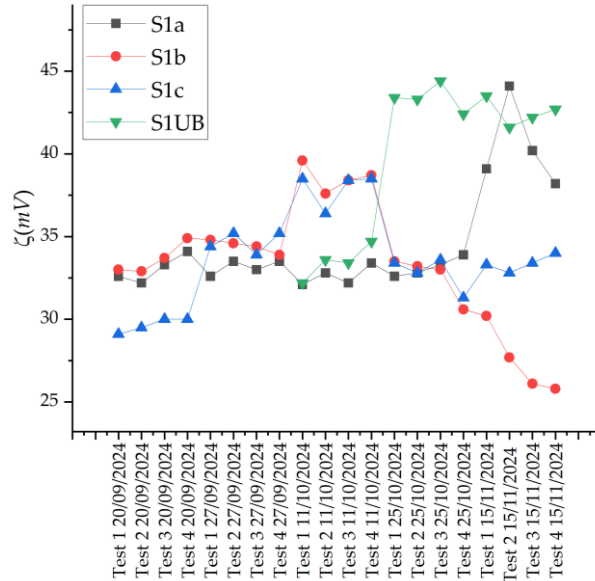


Figura 43. Pruebas de potencial-Z para cuatro muestras 1a, 1b, 1c y 1ub de Al_2O_3 -Agua 2.0 % p/p.

4.2 Pruebas de dispersión de partículas en el nanofluido

Esta sección aborda la dispersión de las partículas bajo condiciones al interior, con control de variables físicas y químicas en laboratorio, y bajo condiciones al exterior, donde se evalúan las variaciones en la dispersión frente a factores ambientales no controlados.

4.2.1 Condiciones al interior

Se observa una tendencia decreciente del valor del potencial-Z conforme aumenta la temperatura, describiéndose adecuadamente mediante un ajuste exponencial de la forma $y = A_1 e^{-x/t_1} + y_0$, con un coeficiente de determinación (R^2 ajustado) de 0.9992, lo que indica una excelente correlación entre el modelo y los datos experimentales, **Figura 44**.

Inicialmente, a temperaturas cercanas a 30 °C, el potencial-Z alcanza valores alrededor de 44 mV, lo cual sugiere una elevada estabilidad coloidal atribuida a la fuerte repulsión electrostática entre las partículas. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta, el potencial-Z disminuye progresivamente hasta alcanzar valores próximos a 34 mV a 60 °C. Esta reducción puede asociarse al incremento en la energía cinética de las partículas, que favorece colisiones más frecuentes y una posible compresión de la doble capa eléctrica, reduciendo así las fuerzas de

repulsión y aumentando la posibilidad de aglomeración. El comportamiento observado indica que la estabilidad del nanofluido disminuye con el aumento de la temperatura, aunque los valores de potencial-Z superiores a ± 30 mV sugieren que el sistema aún mantiene una estabilidad coloidal moderada dentro del rango de temperaturas estudiado. En términos generales, los resultados evidencian que la temperatura es un factor determinante en el control del equilibrio electrostático y la dispersión de las nanopartículas en el fluido base.

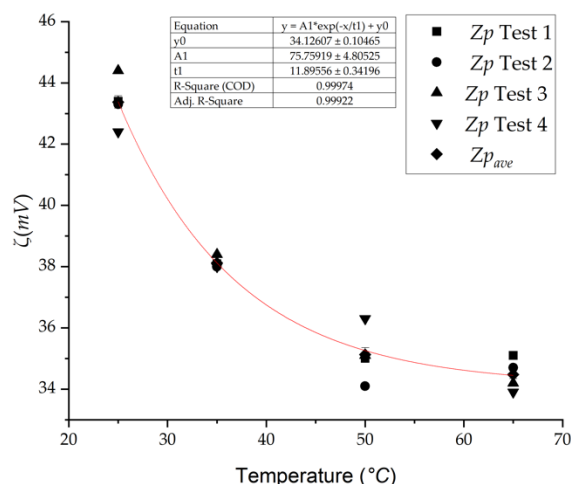


Figura 44. Análisis de la deriva del potencial-Z en función de la temperatura.

4.2.2 Condiciones al exterior

La variación del potencial-Z (ζ) en milivoltios (mV) para el sistema FPSC y la eficiencia correspondiente realizada durante el periodo comprendido entre abril y junio de 2025 se analizó. Se observa que, en las primeras tres pruebas, el potencial-Z del FPSC se mantiene relativamente estable alrededor de los 35–40 mV, lo que indica una buena estabilidad electrostática del sistema. Sin embargo, a partir de la cuarta prueba se evidencia una disminución marcada del ζ hasta valores cercanos a 20 mV, lo que sugiere una pérdida progresiva de la estabilidad coloidal, posiblemente asociada a cambios en la composición o condiciones del fluido. En contraste, la eficiencia muestra un incremento sostenido a partir del mismo punto, alcanzando su valor máximo en la cuarta prueba, lo que podría reflejar una mejora temporal en el desempeño del sistema.

Las pérdidas de dispersión coloidal resultan críticas desde el punto de vista operativo, ya que, al encontrarse el fluido en movimiento dentro de tuberías ascendentes, válvulas y sistemas de bombeo, la aglomeración de partículas podría generar estancamientos, requerir un aumento en la potencia de bombeo o incluso ocasionar un deterioro prematuro del sistema. Por tanto, es indispensable implementar medidas preventivas y estrategias de mantenimiento que eviten estos efectos, preservando tanto la estabilidad del fluido como la eficiencia energética y la integridad de la infraestructura.

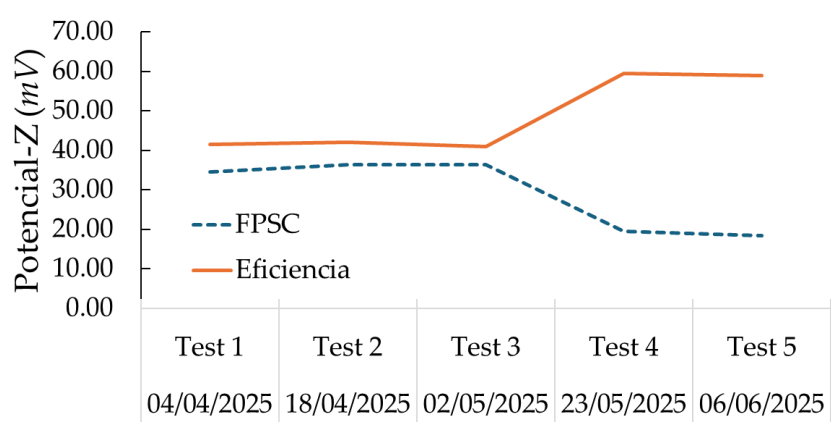


Figura 45. Estabilidad de los nanofluidos en FPSWH en condiciones exteriores.

4.3 Pruebas de estabilidad del nanofluido

Se muestran los resultados de la deriva de la estabilidad en términos del potencial-Z y el tiempo para los casos al interior y al exterior.

4.3.1 Condiciones al interior

La evolución del potencial-Z (ζ) en milivoltios (mV) para las muestras S1a, S1b, S1c y S1UB a lo largo de las diferentes pruebas realizadas entre septiembre y diciembre de 2024 fue analizada. En general, las muestras presentan valores del ζ dentro del rango de estabilidad coloidal (30–45 mV), aunque con variaciones notables entre tratamientos. La muestra S1a mantiene una tendencia ascendente hasta mediados de noviembre, alcanzando un máximo cercano a 45 mV, lo que indica una mayor estabilidad superficial. Por su parte, S1b muestra un comportamiento más irregular, con un incremento inicial seguido de una disminución pronunciada a partir de noviembre,

sugiriendo posibles cambios en la composición o en las condiciones de la suspensión. La muestra S1c presenta valores relativamente constantes, lo que podría interpretarse como una estabilidad moderada sin alteraciones significativas. Finalmente, S1UB registra los valores más altos de potencial-Z durante todo el periodo, destacándose por su notable incremento a partir de finales de octubre, lo que sugiere un mejor comportamiento electrocinético y una mayor repulsión entre partículas. Estos resultados evidencian diferencias en la estabilidad coloidal de las muestras, probablemente asociadas a las variaciones en su tratamiento o formulación. La muestra S1UB se mantiene en un promedio de 38 mV después de un año sin tener ninguna alteración.

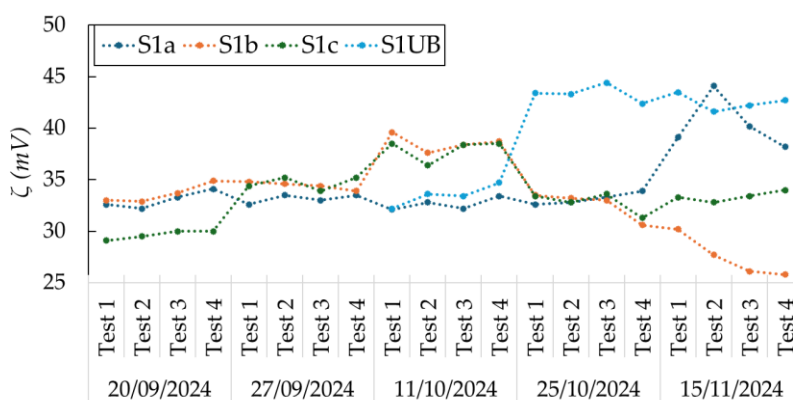


Figura 46. Estabilidad del nanofluido en función del tiempo en condiciones interiores.

4.3.2 Condiciones al exterior

La evolución del potencial-Z para un nanofluido de Al_2O_3 -agua al 2.0 %p/p en el colector solar plano (FPSC), se midió a lo largo de cinco fechas entre marzo y julio de 2025. El ζ muestra en general una tendencia decreciente en el tiempo, ajustada mediante una regresión lineal y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8848$, como se observa en la **Figura 47**. La disminución sugiere una pérdida continua de estabilidad coloidal. Durante las pruebas, los valores del ζ descendieron desde cerca de 40 mV hasta aproximadamente 20 mV en 3 meses, lo que indica que, aunque las muestras inicialmente presentaban una estabilidad aceptable (>30 mV), esta se redujo con el tiempo, posiblemente por agregación de partículas o por la degradación de los efectos estabilizantes. Al cuarto mes el medidor del ζ registro dispersión nula, lo que evidenció que el nanofluido había perdido su estabilidad por completo. La curva discontinua representa el comportamiento dentro del colector FPSC, en donde también se aprecia una disminución, aunque

no perfectamente lineal, lo que podría reflejar condiciones térmicas y de flujo variables dentro del sistema. Estos resultados refuerzan la importancia del método de preparación y del monitoreo periódico de la estabilidad del nanofluido para asegurar su eficacia en aplicaciones térmicas.

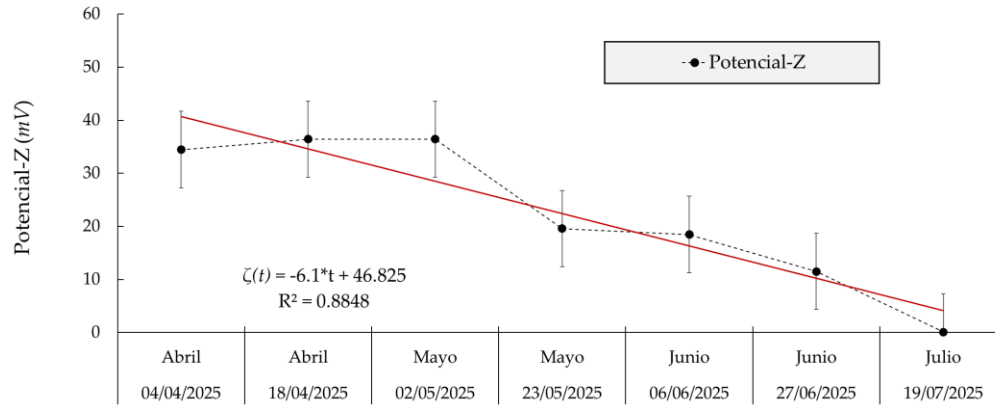


Figura 47. Análisis de estabilidad del nanofluido en el FPSC.

4.4 Análisis térmico de colectores solares de placa plana

Esta sección presenta el análisis comparativo del funcionamiento del FPSC mediante la calibración del banco de pruebas agua-agua, la evaluación de la eficiencia con agua respecto a reportes previos, la comparación de las curvas de eficiencia entre agua y nanofluido, y el contraste de temperaturas, energía útil y flujo, con el fin de determinar el desempeño relativo del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

4.4.1 Calibración de banco de pruebas agua-agua

El análisis comparativo del desempeño del FPSC se llevó a cabo con el propósito de corroborar que ambos equipos, operando con idéntico fluido de trabajo, exhiben respuestas de temperatura equivalentes. Las pruebas experimentales se realizaron bajo las mismas condiciones de caudal y temperatura de entrada. La **Figura 48** presenta la evolución de las temperaturas obtenidas, donde se observa un margen de diferencia de ± 0.02 °C. Los resultados confirman que la plataforma

experimental es adecuada para efectuar un análisis comparativo, dado que, al emplear el mismo fluido, registran comportamientos de temperatura dentro del intervalo de incertidumbre.

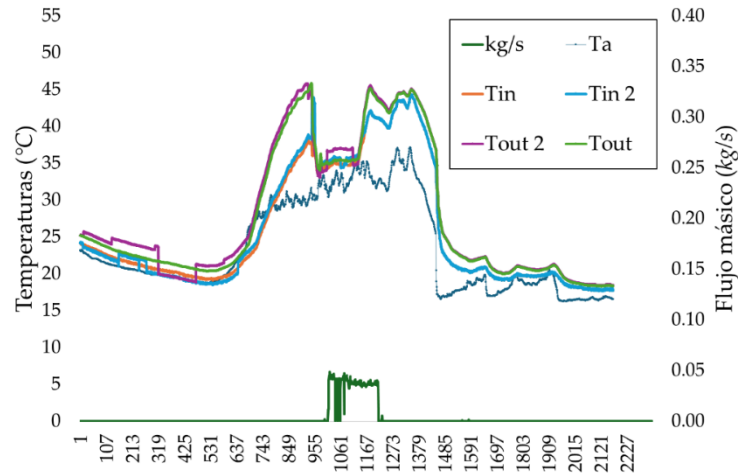


Figura 48. Error experimental entre FPSC del banco de pruebas.

4.4.2 Comparativo de eficiencia con agua respecto a reportes previos

También los datos experimentales de una semana permitieron comparar nuestra caracterización mostrando ganancias ópticas en el FPSC con agua mayor a lo reportado por otros autores con colectores solares planos similares. En la caracterización del colector solar, el a_0 fue de 0.5497 y el a_1 de 3.9228 kWm^{-2} , donde a_0 fue 12 % mayor a los reportados por O. Montoya-Márquez y J. J. Flores-Prieto (2017) y a Prakasam *et al.* (2018) [28], [33], donde a_1 fue prácticamente el doble indicando mayor pérdida de energía, como se muestra en la **Figura 49**.

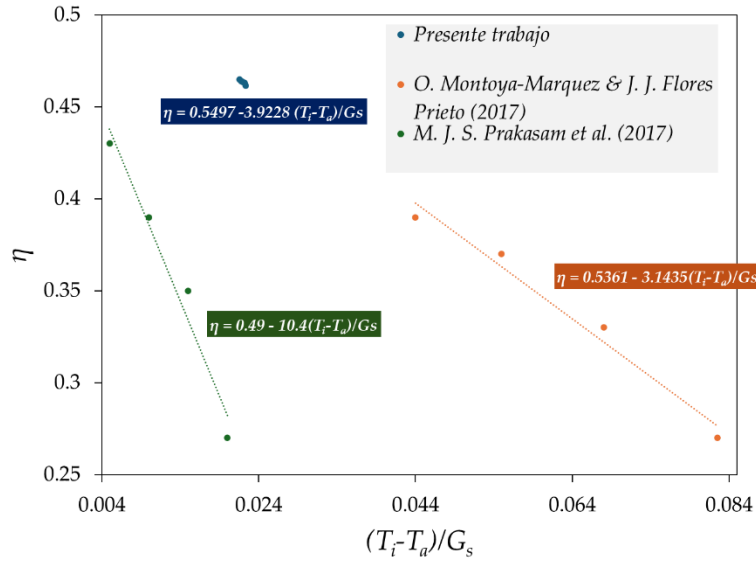


Figura 49. Comparativo de a_0 y a_1 con trabajos previos.

4.4.3 Comparativo de curva de eficiencia con agua y nanofluido

Agua

La **Figura 50** muestra un ajuste lineal muy consistente, donde el coeficiente óptico ($\eta_0 = 0.51$) representa las ganancias ópticas del colector solar con agua, es decir, la fracción de la radiación que el sistema es capaz de convertir en energía útil, mientras que el coeficiente de pendiente ($a_1 = 7.36$) refleja las pérdidas térmicas globales del FPSC. Se observa que los datos experimentales siguen de manera coherente esta relación, con una dispersión mínima representada por barras de error de apenas ± 0.007 , lo que evidencia buena calidad experimental. El descenso progresivo de la eficiencia en función del parámetro $(T_i - T_a)/G_s$ confirma el comportamiento típico de los FPSC, altas ganancias ópticas cuando el gradiente térmico es bajo y pérdidas crecientes conforme aumenta la diferencia entre la temperatura de entrada y la ambiente. Esto respalda que el colector analizado opera dentro de los rangos esperados para su tipo y que el modelo obtenido describe adecuadamente su desempeño térmico.

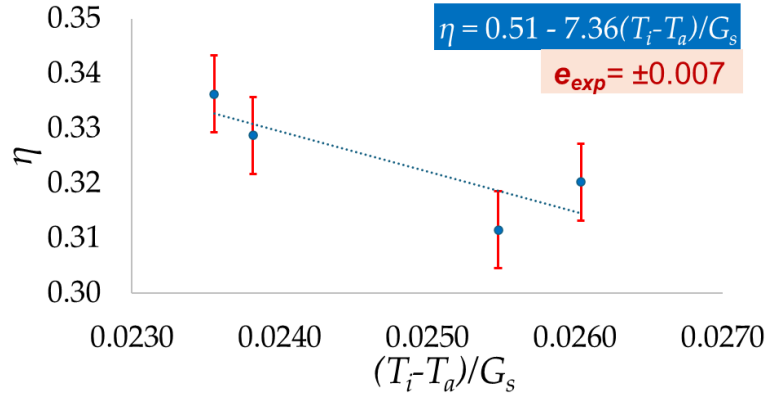


Figura 50. Caracterización del FPSC con agua.

Nanofluido

El ajuste lineal obtenido, $\eta = 0.87 - 6.14 (T_i - T_a) / G_s$, indica que el colector con nanofluidos presenta mayores ganancias ópticas ($\eta_0 = 0.87$), y también pérdidas térmicas globales similares que con agua ($a_1 = 6.14$), **Figura 51**. La dispersión experimental es mayor que en el caso anterior, con un error de ± 0.08 , lo cual indica una variabilidad más alta entre los puntos medidos, posiblemente por fluctuaciones térmicas, mayor sensibilidad a condiciones ambientales o menor estabilidad del sistema. El uso de nanofluidos en el colector solar de placa plana no incrementa las pérdidas térmicas en comparación con el uso de agua. Sin embargo, se registra una mejora en las propiedades ópticas del sistema, lo que favorece el desempeño del FPSC.

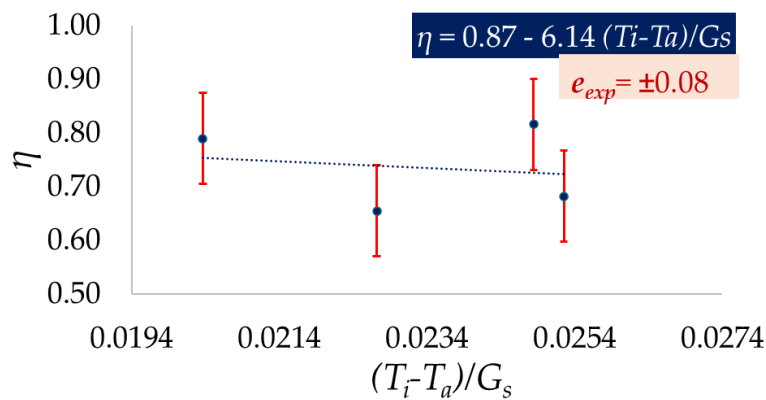


Figura 51. Caracterización del FPSC con nanofluido.

Al contrastar ambos modelos, se observa una diferencia clara en su desempeño. El primer colector presenta ganancias ópticas moderadas ($\eta_0 = 0.51$) y pérdidas térmicas relativamente bajas ($a_1 =$

7.3), lo que resulta en un comportamiento más estable y eficiencia menos sensible al aumento del parámetro $(T_i - T_a)/G_s$. En cambio, el segundo colector exhibe ganancias ópticas notablemente superiores ($\eta_0 = 0.8711$), sin pagar ese beneficio con pérdidas térmicas ya que el comportamiento es similar al FPSC con el fluido de referencia. Esto indica que el colector que emplea nanofluido es capaz de convertir una mayor fracción de la radiación solar incidente en energía útil, como se refleja en su mayor eficiencia óptica. Además, el menor valor del coeficiente de pérdidas térmicas sugiere que la disminución de la eficiencia con el aumento del gradiente térmico es menos pronunciada en comparación con el colector que utiliza agua como fluido de trabajo. Por el contrario, el colector con agua presenta una caída más acelerada de la eficiencia conforme aumentan las diferencias térmicas con el ambiente. En conjunto, el colector con nanofluido muestra un mejor desempeño tanto en condiciones de bajo como de mayor gradiente térmico, mientras que el colector con agua resulta más limitado por sus mayores pérdidas térmicas.

4.4.4 Comparativo de temperaturas, energía útil y flujo

El comparativo involucra resultados de la evaluación de las temperaturas a la entrada y salida del colector, la evaluación del rendimiento energético y la evaluación del desempeño en el flujo másico.

Temperaturas de entrada y salida

La **Figura 52** muestra la evolución temporal de las temperaturas de entrada y salida del fluido térmico en el colector. Se observa que el nanofluido (NF) presenta temperaturas de salida (T_{out} NF) más elevadas que el agua, con un rango de 36 °C a 49 °C, mientras que el agua mostró un rango de 33 °C a 43 °C. Las temperaturas de entrada (T_{in} y T_{in} NF) se mantuvieron en un intervalo estable de 31 °C a 37 °C, lo cual permite asegurar condiciones comparables de operación.

Este comportamiento térmico evidencia una mejor capacidad del nanofluido para absorber y transferir energía solar térmica, manteniendo gradientes térmicos favorables para el aprovechamiento energético.

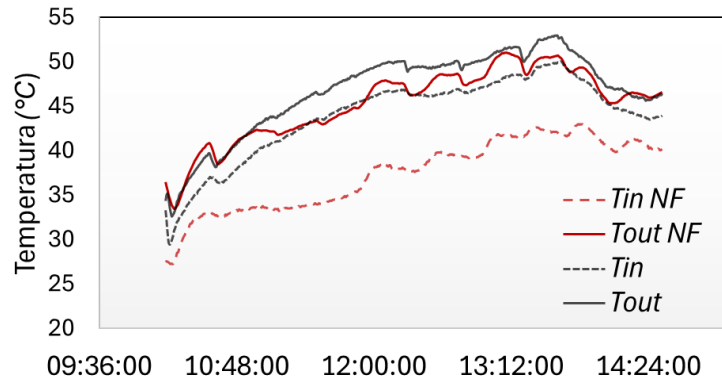


Figura 52. Comportamiento térmico Nanofluido vs. Agua.

Calor útil

La potencia útil (Q_u) generada por el colector para ambos fluidos, junto con la irradiancia solar incidente (G_s) y la eficiencia térmica instantánea (η), permite comparar el desempeño térmico del sistema bajo las mismas condiciones de operación. La potencia útil con nanofluido ($Q_{u\ NF}$) alcanzó valores máximos de 950 W a 1050 W, y mínimos cercanos a 200 W, mientras que con agua la potencia útil fluctuó entre 100 W y 380 W. La irradiancia solar incidente en el FPSC (G_s) varió dentro de un rango razonablemente estable de 900 a 1750 W. La eficiencia térmica del colector con nanofluido osciló entre 0.30 y 0.55, mientras que con agua estuvo entre 0.20 y 0.40. Estos resultados sugieren una mejora sustancial del rendimiento energético cuando se utiliza nanofluido como fluido de trabajo, debido a sus propiedades mejoradas de transferencia de calor.

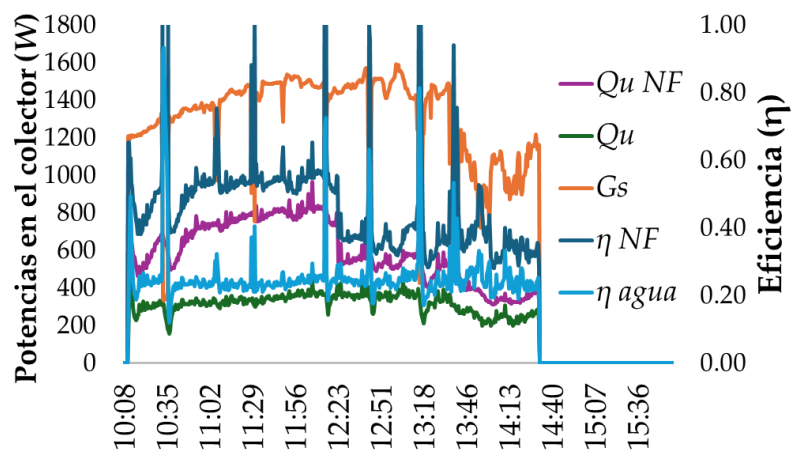


Figura 53. Comparativo de rendimiento energético Nanofluido vs. Agua en el FPSC.

Flujo

Durante el experimento, se registró la evolución del flujo másico para el agua (curva celeste) y el nanofluido de Al_2O_3 al 2.0 % p/p (curva naranja), permitiendo analizar su comportamiento y efectos sobre la eficiencia térmica del sistema, **Figura 54**. Se observa que el nanofluido presentó un flujo másico mayor, con valores que oscilaron entre 0.027 kg/s y 0.034 kg/s, mientras que el agua se mantuvo en un rango inferior, entre 0.02 kg/s y 0.026 kg/s. Esta diferencia sugiere que el sistema permitió una mayor circulación del nanofluido, posiblemente debido a su menor viscosidad relativa en condiciones térmicas reales o una interacción más eficiente con el sistema de bombeo.

Este comportamiento hidráulico, además de ser estable a lo largo del ensayo, refuerza su viabilidad para aplicaciones térmicas, ya que una mayor tasa de flujo másico implica una mayor capacidad de transferencia de energía. En conjunto con los resultados térmicos y energéticos, esta evidencia respalda la implementación práctica del nanofluido en colectores solares térmicos.

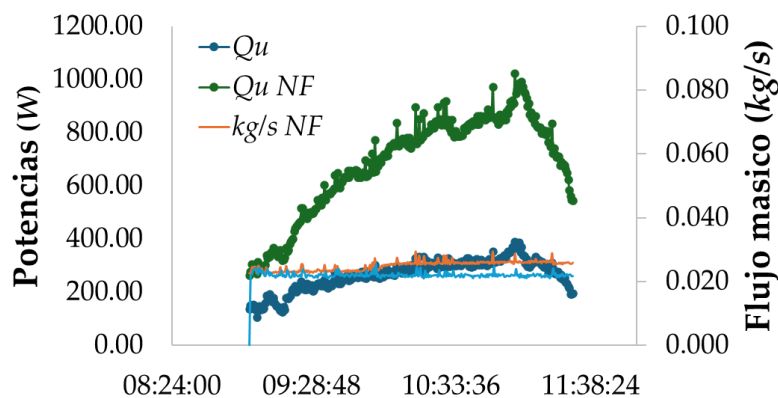


Figura 54. Comparativo del comportamiento de los flujos en el FPSC Nanofluido vs. Agua.

Los resultados experimentales presentados en las figuras 52, 53 y 54 demuestran que el uso de un nanofluido de alúmina al 2.0 %p/p mejora significativamente el desempeño térmico de un colector solar plano, tanto en términos de potencia útil como de eficiencia térmica. Además, el comportamiento hidráulico observado evidencia que el nanofluido mantiene un flujo estable y superior al del agua, sin comprometer la operación del sistema.

4.5 Análisis económico

Se comparan los resultados del LCOE cuando se usa gas L.P. con caldera para calentar agua en un sistema con intercambio de calor, colectores solares de placa plana con fluido convencional y con nanofluidos.

4.5.1 LCOE con combustibles de referencia

El análisis del LCOE convencional se realizó considerando una tasa de referencia del 7 %, un costo de mantenimiento equivalente al 15 % del costo anual, y un incremento anual en operación y mantenimiento del 1 %. Asimismo, se incorporó una inflación del combustible del 15 %, con una operación anual de 261 días y una eficiencia global de planta del 85 %. En el caso de la caldera, que utiliza Gas L.P. como fuente energética, se estimó una eficiencia combinada caldera-planta del 87 %, con una energía térmica a entregar de 13.78 unidades y una energía de combustible requerida de 15.79 unidades. El poder calorífico inferior (LHV) del gas empleado fue de 0.0237 MWh/Lt, y el costo del combustible considerado fue de \$18.80 por litro, resultando en un costo total de combustible de \$793.95. Los costos anuales totales ascendieron a \$12,534.18, con un costo de mantenimiento anual de \$1,880.13. Bajo estas condiciones, el modelo de evaluación económica arrojó un Costo Nivelado de Energía (LCOE) de \$14.84 MXN por kWh, valor que representa el costo promedio de generación térmica considerando los factores técnicos, energéticos y financieros asociados al uso de Gas L.P. en el sistema de caldera.

4.5.2 Análisis económico con colectores solares de placa plana

El análisis se realizó bajo condiciones climáticas y de operación representativas de la región de estudio, considerando una irradiancia solar global promedio diaria (G) de 5.89 kWh/m²-día y una temperatura ambiente promedio de 21.45 °C. Asimismo, se asumieron parámetros económicos y operativos comúnmente empleados en estudios de evaluación tecno-económicos de sistemas solares térmicos: una tasa de descuento del 7 %, costos de operación y mantenimiento equivalentes al 1.5 % de la inversión inicial con un incremento anual del 1 %, 261 días de operación al año con un rango de temperatura de 30 a 60 °C, y una eficiencia de planta del 85 % para el sistema auxiliar o convencional.

LCOE con agua

El sistema con fluido convencional (agua) cuenta con 4 colectores, inversión inicial de \$89,070.00 MXN y eficiencia del colector del 42 %, con un área de colección de 7.2 m². La energía entregada alcanza 15.25 kWh/día, o 3,981.44 kWh/año (14.33 GJ/año), con una energía térmica anual específica de 1.99 GJ/m². Los costos de O&M anuales ascienden a \$1,336.05 MXN (\$214.63/m²), resultando en un LCOE de \$1.48 MXN/kWh_t.

LCOE con nanofluido

En el sistema con nanofluidos se consideraron dos escenarios económicos uno donde no se considera el problema de tener que cambiar el nanofluido periódicamente por su deriva cuatrimestral y otro donde si se considera.

En el **caso 1** se emplearon 3 colectores con una inversión inicial de \$100,450.00 MXN y eficiencia del colector del 68 %, captando un área de 5.4 m². Este sistema entrega 18.28 kWh/día, equivalentes a 4,770.42 kWh/año (17.17 GJ/año), con una energía térmica anual específica de 3.18 GJ/m². Los costos anuales de O&M son de \$1,506.75 MXN, equivalentes a \$242.05/m², resultando en un LCOE de \$1.28 MXN/kWh_t.

En el **caso 2** considerando que el nanofluido debe reemplazarse cada 4 meses debido a su deriva de estabilidad, se debe anticipar en la inversión inicial la preparación y adquisición del fluido total para toda la vida útil del sistema, lo que eleva la inversión inicial a \$1,280,450.00 MXN antes de IVA. Como resultado, el LCOE aumenta a \$16.26 MXN/kWh_t, perdiendo competitividad frente a otras alternativas, incluida la caldera a Gas L.P.

La **Figura 55** muestra que ambos sistemas solares presentan un LCOE significativamente menor que la caldera a Gas L.P., cuyo costo nivelado de energía es de \$14.84 MXN/kWh_t. El sistema que utiliza nanofluidos alcanza un LCOE de \$1.28 MXN/kWh_t, siendo más competitivo que el sistema con agua convencional, cuyo valor es de \$1.48 MXN/kWh_t. Esta ventaja se explica principalmente por la mayor eficiencia del colector solar (68 % frente a 42 %) y un mejor rendimiento térmico

específico por unidad de área, lo que permite generar más energía útil con una inversión similar o ligeramente menor.

Sin embargo, al considerar la deriva de la eficiencia asociada a la estabilidad del nanofluido, se requiere una inversión inicial mayor para asegurar la reposición del fluido durante toda la vida útil del sistema. Esto eleva el LCOE a valores cercanos al de los combustibles fósiles, haciendo que la tecnología deje de ser económicamente competitiva.

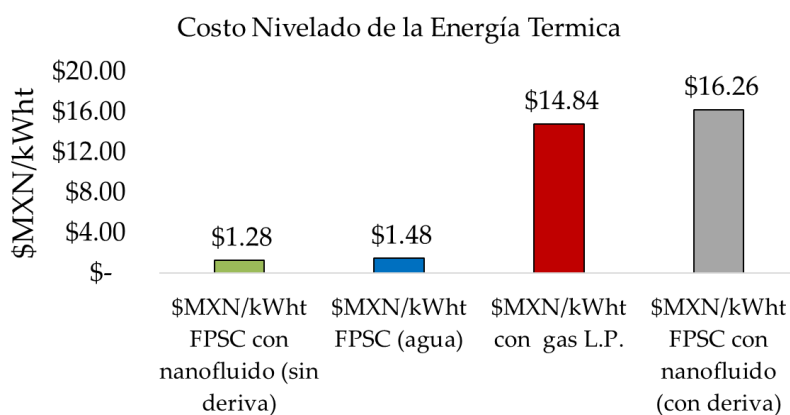


Figura 55. Comparativo del costo nivelado de la energía.

Los supuestos que más influyen en el cálculo del LCOE son el DNI, la eficiencia del colector, el área de captación, la vida útil del sistema, la tasa de referencia y los costos de operación y mantenimiento (O&M). En conclusión, la necesidad de reposición periódica del nanofluido incrementa significativamente la inversión inicial y el LCOE, comprometiendo la viabilidad económica de esta tecnología frente a otras opciones de generación térmica.

4.6 Modelado de eficiencia vs estabilidad, $\eta(\zeta, t)$

Durante el periodo analizado (marzo–julio de 2025), se observó una variación significativa tanto en el potencial-Z como en la eficiencia del sistema, lo que permite evaluar la relación entre la estabilidad del nanofluido y el desempeño térmico. El potencial-Z, representado en la **Figura 56** por la línea naranja y referido al eje derecho, inició con un valor aproximado de 38 mV en marzo y permaneció relativamente estable hasta abril; sin embargo, a partir de mayo experimentó una disminución progresiva hasta alcanzar valores cercanos a 0 mV en julio. Paralelamente, la

eficiencia (η) mostró un comportamiento inverso, aumentó de alrededor del 40 % a inicios del periodo hasta un máximo cercano al 60 % entre mayo y junio, seguido de un descenso moderado hacia finales de julio. Esta relación inversa sugiere que una reducción controlada del potencial-Z favorece la eficiencia del sistema, posiblemente por una disminución parcial de las fuerzas de repulsión electrostática que facilita la interacción entre las partículas o fases activas. No obstante, cuando el potencial-Z se aproxima a valores cercanos a cero, la pérdida de estabilidad coloidal se traduce en una disminución de la eficiencia. Por otro lado, el contenido de agua se mantuvo prácticamente constante durante todo el periodo, indicando que su influencia sobre las variaciones observadas en el comportamiento del sistema es mínima.

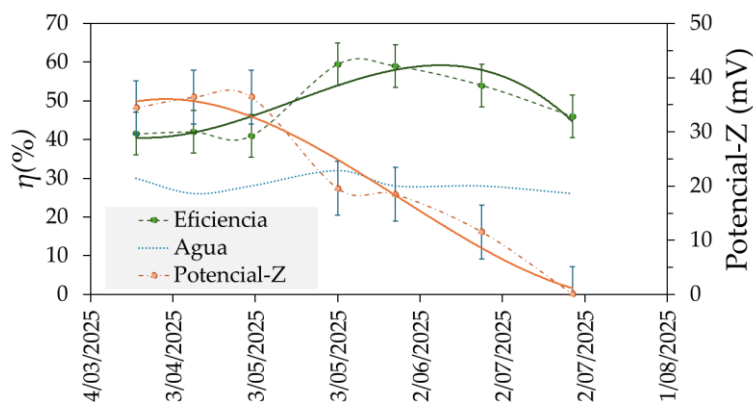


Figura 56. Comparativo de la estabilidad (potencial-Z) y de la eficiencia del nanofluido en referencia al agua como fluido de trabajo.

La **Figura 57** muestra el modelo multivariable obtenido para describir la relación entre la eficiencia (η), el potencial-Z y el tiempo. El ajuste se realizó mediante una regresión polinomial de segundo orden, según la **Ecuación 4.1**:

$$\eta(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 \quad (4.1)$$

donde x corresponde al tiempo (días) y y al potencial-Z (mV). Con, Los coeficientes con intervalos de confianza del 95 % se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4. Coeficientes de ajuste multivariable.

$p_{00} = -17.46$	(878.7, 843.8)
$p_{10} = 4.159$	(38.87, 47.19)

$p_{01} = 1.752$	(13.43, 16.93)
$p_{20} = -0.07157$	(0.6005, 0.4574)
$p_{11} = -0.03783$	(0.4168, 0.3411)
$p_{02} = -0.01089$	(0.07984, 0.05805)

Los términos lineales p_{10} y p_{01} presentan valores positivos, lo que sugiere que tanto el aumento del tiempo como del potencial-Z contribuyen inicialmente a incrementar la eficiencia del sistema. En contraste, los coeficientes cuadráticos p_{20} , p_{11} y p_{02} son negativos, lo que indica una curvatura descendente en la superficie de respuesta y, por tanto, la existencia de un máximo local de eficiencia. Este comportamiento parabólico es característico de sistemas donde, tras un incremento inicial de la eficiencia, se alcanza un punto óptimo y posteriormente se observa una disminución debida a la pérdida de estabilidad del sistema o a efectos de saturación.

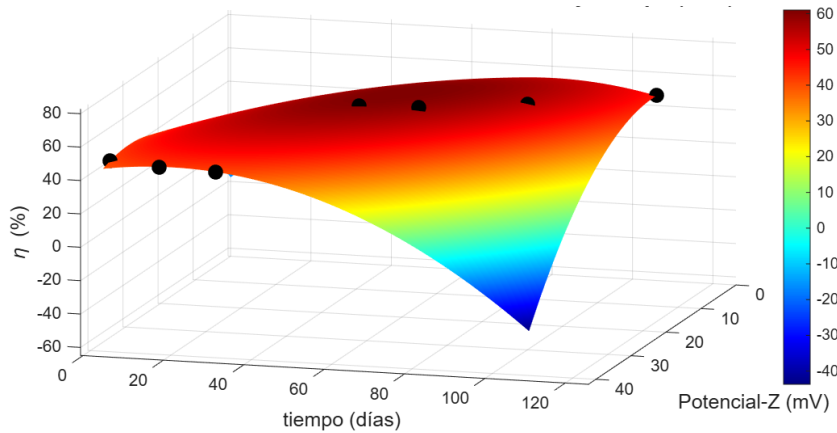


Figura 57. Modelado de la eficiencia en términos del potencial-Z y el tiempo.

Por otra parte, los valores entre paréntesis representan los intervalos de confianza al 95 % de cada coeficiente, los cuales delimitan el rango dentro del cual es probable que se encuentre el valor real del parámetro. La amplitud considerable de estos intervalos indica cierta incertidumbre asociada al ajuste, posiblemente derivada del número limitado de datos experimentales o de la variabilidad inherente al sistema. No obstante, la forma general de la superficie ajustada reproduce adecuadamente la tendencia experimental: los valores máximos de eficiencia se localizan en la región donde el potencial-Z se encuentra entre 25 y 35 mV y el tiempo entre 40 y 80 días. A medida que el potencial-Z disminuye hacia valores próximos a cero o el tiempo se prolonga más allá de ese intervalo, la eficiencia decrece, lo cual coincide con la pérdida de

estabilidad coloidal observada experimentalmente. En conjunto, el modelo polinomial describe con fidelidad la respuesta global del sistema y permite identificar la zona de operación óptima en la que la interacción entre el potencial superficial y el tiempo maximiza la eficiencia.

4.7 Análisis de resultados

La caracterización del fluido de trabajo y su estabilidad térmica se analizaron tanto en condiciones interiores como exteriores. Posteriormente, se determinaron los parámetros característicos del FPSC operando con y sin nanofluidos. Asimismo, se realizó una evaluación comparativa del desempeño térmico del colector para establecer la viabilidad técnica asociada al uso de nanofluidos. Finalmente, se examinó la viabilidad económica mediante el cálculo del LCOE, comparando el uso de nanofluidos con métodos de referencia y con el fluido convencional.

En la caracterización del nanofluido, se encontró que el método de dos pasos fue adecuado para la elaboración del nanofluido al utilizar equipo de alta precisión como las balanzas térmicas para hacer la mezcla proporcional adecuada entre masa de fluido base y masa de nanopartícula. A su vez, el método por agitación controlada y constante y el de dispersión por baño ultrasónico presenta una mejora del potencial-Z aumentando la dispersión hasta un 30 %.

En las pruebas de estabilidad del nanofluido se encontró que en condiciones controladas al interior la estabilidad del nanofluido es constante y no presenta un nivel de sedimentación considerable, manteniendo la dispersión de nanopartículas entre 20 y 30 mV a la fecha. Sin embargo, en condiciones reales al exterior, el potencial zeta del nanofluido derivó de casi 40 mV a 0 mV en menos de cuatro meses. Los resultados comprueban lo encontrado en el estado del arte, donde el máximo tiempo de vida útil para nanofluidos en colectores solares en comparación a la vida útil del FPSC no supera el 2 %.

Se encontró que la calorimetría de flujo al exterior siguiendo la norma UNE-EN ISO 9806:2017 y NMX-ES-001-NORMEX, 2018 es adecuada para determinar el rendimiento térmico de los

nanofluidos en el FPSC, encontrando mejoras en las ganancias ópticas, así como mejores eficiencia térmica y mayores temperaturas de salida en porcentajes de 87, 67 y 14 %, respectivamente.

El análisis experimental mostró una mejora en el flujo masico del FPSC con nanofluido, mostrando un incremento de 0.02 a 0.034 kg/s durante su funcionamiento, lo que podría justificarse que se presentaron mejores propiedades viscosas.

El análisis económico permitió encontrar los costos nivelados de la energía, es decir, cuanto se pagaría por el kWh_t en concordancia con los resultados experimentales. El uso de nanofluido por su breve estabilidad en condiciones reales hace que el costo de la energía se incremente, y para un proyecto en tiempos de vida real sean superiores a los costos con el uso de sistemas de calentamiento con energías fósiles, haciéndolo 39 % más caro. Evidentemente el análisis del costo de la energía en el caso de que no existiera la deriva pondría la alternativa de los nanofluidos en primer lugar teniendo un LCOE de \$1.28 MXN/kWh_t, siendo 19 % menor a los FPSC con fluido convencional agua y 91 % menor a los sistemas de calentamiento con combustibles fósiles.

5. Conclusiones y recomendaciones trabajos futuros

5.1 Conclusiones

La viabilidad termo-económica de los nanofluidos como alternativa para mejorar la eficiencia térmica de los colectores solares, su rentabilidad y competitividad en un mercado creciente y con desafíos ambientales, constituye el eje central de este trabajo, considerando además la posible deriva de los nanofluidos en los calentadores solares. En esta sección se sintetizan los hallazgos más relevantes del estudio, incluyendo los resultados del estado del arte, que proporcionan un marco de referencia y destacan las tendencias y limitaciones de tecnologías similares. Se presentan también las conclusiones derivadas de la caracterización y evaluación de la estabilidad del fluido de trabajo, así como de la determinación de los parámetros característicos del FPSC con y sin nanofluidos. Los hallazgos del análisis comparativo del desempeño térmico evidenciaron la viabilidad si no se considera la estabilidad, y no mostró viabilidad al considerar la estabilidad. Finalmente, se exponen las conclusiones relativas a la evaluación económica basada en el LCOE, considerando tanto las opciones de referencia como el fluido convencional, lo que permite determinar el potencial de los nanofluidos como alternativa rentable y competitiva.

En el estado del arte de este trabajo se identificaron aspectos fisicoquímicos de los nanofluidos para establecer la viabilidad desde un punto termo-económico. En general, los nanofluidos permiten un mayor desempeño de los sistemas de calentamiento de agua y mejoran al mejorar sus propiedades termofísicas, específicamente la conductividad térmica. La eficiencia del FPSC puede incrementarse con nanofluidos en 33-63 % respecto al fluido convencional. El rendimiento térmico se encontró que depende considerablemente del flujo másico en el sistema y de la cantidad de nanopartícula dispersa en el fluido. Sin embargo, la estabilidad del nanofluido a lo largo de la vida útil del sistema de calentamiento de agua limita su uso en proyectos con

escenarios de 20-30 años ya que este representa solo el 2 %, así como se estableció también en el artículo derivado de este trabajo de tesis [105].

La caracterización del nanofluido permitió observar que la dispersión de partículas en el fluido base afecta las propiedades de transporte de energía del fluido a lo largo del tiempo y consecuentemente el rendimiento térmico del FPSC; sin embargo, una adecuada preparación del nanofluido prolonga su vida útil. Así, se evidencia que el desarrollo experimental del rendimiento térmico-económico de los calentadores solares con nanofluidos es considerablemente afectado por la forma de preparación del nanofluido, y es esencial considerar la preparación del nanofluido en el desempeño térmico de los colectores solares. Un control adecuado en la preparación y el análisis de los diámetros de las partículas en el fluido son fundamentales para garantizar la viabilidad de los nanofluidos antes de su aplicación en los colectores solares. Así, se observó que el potencial-Z es un parámetro importante en la identificación de las propiedades del nanofluido y que es conveniente considerarlo para reducir las incertidumbres en la determinación de los escenarios termo económicos de los calentadores solares.

El potencial-Z indicó un valor máximo de hasta 44.4 mV, lo que evidencia una estabilidad excepcional en la muestra preparada mediante el método de baño ultrasónico. El efecto de las interacciones térmicas con el nanofluido genera deriva en el potencial-Z, que puede llegar a ocasionar la sedimentación de las nanopartículas. El método de preparación mejoró 30 % aproximadamente el valor de potencial-Z y redujo 55 % el tamaño de partículas en el fluido base.

La eficiencia del FPSC con agua como fluido de trabajo evaluada en términos de los parámetros característicos a_0 y a_1 fue de 0.54 y 3.92 kWm⁻² comparados con trabajos previos demuestran que los colectores solares propuestos para realizar el presente trabajo doctoral son adecuados. La caracterización del colector con nanofluido arrojó una eficiencia óptica inicial de $a_0 = 0.87$, lo que representa un incremento del 58.5% respecto al colector con agua ($a_0 = 0.54$). En cuanto a las pérdidas térmicas globales, el comportamiento es similar (-6.14 con nanofluido frente a -7.36 con agua). El uso de calorimetría y el estudio del potencial-Z en el tiempo para modelar la eficiencia

vs. la estabilidad del fluido; garantizan la evaluación que permite determinar que el uso de los nanofluidos son una opción viable termo-económicamente.

El nanofluido analizado en términos energéticos representa una alternativa aparentemente viable y eficiente frente al agua como fluido caloportador en aplicaciones solares térmicas, al no considerar la deriva de la estabilidad. Sin embargo, la vida útil del nanofluido se demerita de la misma forma que su viabilidad a lo largo de la operación en FPSC bajo condiciones al exterior. El nanofluido se deterioró linealmente cambiando su potencial-Z de 36 mV a 18 mV en menos de cuatro meses. El potencial-Z llegó a ser 0 mV a los cuatro meses.

De acuerdo con los costos nivelados de la energía, se observó que el precio del kWh_t con nanofluidos podría ser significativamente más bajo que con los fluidos convencionales si no se considera la deriva del potencial-Z. La evidente sedimentación después de los cuatro meses indica que, para el dimensionamiento del sistema, es necesario considerar los costos asociados a la preparación, caracterización y obtención del nanofluido, los cuales deben realizarse tres veces al año. Así, a lo largo de los 20 años de vida útil del sistema FPSC, los costos podrían incrementarse hasta diez veces, lo que afectaría negativamente su viabilidad económica, superando incluso la opción basada en combustibles fósiles.

Los resultados de este estudio muestran que los nanofluidos pueden ser una alternativa para potenciar los sistemas de calentamiento solar, siempre y cuando se logre aumentar la estabilidad del coloide.

5.2 Limitaciones del estudio

El proyecto presentó limitaciones, al pretender obtener la curva comparativa η vs ζ a lo largo de un año, debido a que antes de llegar a cuatro meses de funcionamiento en condiciones al exterior el potencial-Z llegó a tener un valor de 0 mV (sin dispersión). Se intentó agitar algunas muestras con baño ultrasónico pero la estabilidad ya no se logró.

5.3 Recomendaciones para trabajos futuros

- Estudios de estabilidad de nanofluidos con dinámica molecular de partículas para predecir el comportamiento de las nanopartículas y anticipar fenómenos de sedimentación o aglomeración, considerando las interacciones entre partículas y las propiedades termofísicas del fluido.
- Diseño experimental con la implementación de un excitador de partículas para prolongar la estabilidad de nanofluidos. La idea es tratar de evitar la sedimentación manteniendo la homogeneidad del fluido durante largos períodos de operación, lo que es clave para aplicaciones continuas y confiables.
- Estudio de estabilidad de nanofluidos en colectores solares con tuberías de aluminio anodizado y con recubrimiento selectivo. Buscando comprender cómo los diferentes tratamientos de superficie afectan la adhesión de partículas y la eficiencia térmica, información esencial para optimizar el diseño del colector.
- Analizar el comportamiento de las curvas de eficiencia de un colector solar de placa plana operando en rangos de temperatura media y alta, con el fin de evaluar el impacto del uso de nanofluidos en el desempeño térmico del sistema.

5.4 Resultados obtenidos

Con fines de familiarización en la evaluación de la eficiencia térmica de colectores solares planos, se retomó el trabajo realizado en la maestría sobre calorimetría de flujo al interior y se publicó un artículo en la revista *Journal of Solar Energy Engineering-ASME*, indexado en el *Journal Citation Reports*, JCR, con título Thermal Performance of a Low and Medium Temperature Flat Plate Solar Collector When Controlling the Output-Input Temperature Difference and the Tilt Angle donde se evalúa la eficiencia de un colector solar plano cuando se modifica su ángulo de inclinación y la diferencia de temperatura entrada-salida.

La metodología utilizada permitió evaluar las pérdidas globales de calor del captador solar plano con un nivel de incertidumbre de $\pm 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$. El estudio del estado del arte sobre la estabilidad de los nanofluidos en calentadores solares propició un manuscrito enviado a una segunda revista *Solar Energy Materials and Solar Cells* indexada en JCR, con título Nanofluids stability in flat-plate solar collectors: A review.

6 Referencias

- [1] Q. He, S. Zeng, and S. Wang, "Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids," *Appl Therm Eng*, vol. 88, pp. 165–171, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.053.
- [2] J. A. Rosas-Flores, D. Rosas-Flores, and J. L. Fernández Zayas, "Potential energy saving in urban and rural households of Mexico by use of solar water heaters, using geographical information system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 243–252, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.202.
- [3] L. Salgado-Conrado and A. Lopez-Montelongo, "Barriers and solutions of solar water heaters in Mexican household," *Solar Energy*, vol. 188, pp. 831–838, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.021.
- [4] O. Montoya-Márquez and J. Flores-Prieto, "Heat Removal Factor in Flat Plate Solar Collectors: Indoor Test Method," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 10, p. 2783, Oct. 2018, doi: 10.3390/en11102783.
- [5] A. K. Hussein, "Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors - Recent advances and overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 767–792, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.050.
- [6] O. A. Hussein, K. Habib, A. S. Muhsan, R. Saidur, O. A. Alawi, and T. K. Ibrahim, "Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid," *Solar Energy*, vol. 204, pp. 208–222, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.034.
- [7] K. M. Pandey and R. Chaurasiya, "A review on analysis and development of solar flat plate collector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 641–650, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.078.
- [8] N. B. Ziyadanogullari, H. L. Yucel, and C. Yildiz, "Thermal performance enhancement of flat-plate solar collectors by means of three different nanofluids," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, pp. 55–65, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.07.005.
- [9] G. M. Wallner, M. Povacz, R. Hausner, and R. W. Lang, "Lifetime modeling of polypropylene absorber materials for overheating protected hot water collectors," *Solar Energy*, vol. 125, pp. 324–331, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.035.
- [10] A. Ghozatloo, M. Shariaty-Niasar, and A. M. Rashidi, "Preparation of nanofluids from functionalized Graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp. 89–94, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.12.007.
- [11] T.-P. Teng, L. Lin, and C.-C. Yu, "Preparation and Characterization of Carbon Nanofluids by Using a Revised Water-Assisted Synthesis Method," *J Nanomater*, vol. 2013, pp. 1–12, 2013, doi: 10.1155/2013/582304.
- [12] S. P. Aghili Yegane and A. Kasaeian, "Thermal performance assessment of a flat-plate solar collector considering porous media, hybrid nanofluid and magnetic field effects," *J Therm Anal Calorim*, vol. 141, no. 5, pp. 1969–1980, Sep. 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09710-y.
- [13] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," 1935.
- [14] N. Akram *et al.*, "A comprehensive review on nanofluid operated solar flat plate collectors," *J Therm Anal Calorim*, vol. 139, no. 2, pp. 1309–1343, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08514-z.
- [15] Y. Lee, H. Jeong, J.-T. Park, A. Delgado, and S. Kim, "Experimental Investigation on Evaluation of Thermal Performance of Solar Heating System Using Al₂O₃ Nanofluid," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 16, p. 5521, Aug. 2020, doi: 10.3390/app10165521.
- [16] S. P. Jang and S. U. S. Choi, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids," *Appl Phys Lett*, vol. 84, no. 21, pp. 4316–4318, May 2004, doi: 10.1063/1.1756684.
- [17] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: Processes and systems*. 2009. doi: 10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5.
- [18] A. K. Tiwari, P. Ghosh, and J. Sarkar, "A review on application of nanofluids in solar heating systems Thermal analysis of flat plate solar collector using nanofluid View project A review on application of nanofluids in solar water heating systems," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/235785077>
- [19] S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. doi: 10.1002/9780470180693.
- [20] S. kumar verma and A. K. Tiwari, "Application of Nanoparticles in Solar collectors: A Review," *Mater Today Proc*, vol. 2, no. 4–5, pp. 3638–3647, 2015, doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.121.

- [21] K. Khanafer and K. Vafai, "A review on the applications of nanofluids in solar energy field," *Renew Energy*, vol. 123, pp. 398–406, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.097.
- [22] T. Yousefi, F. Veisy, E. Shojaeizadeh, and S. Zinadini, "An experimental investigation on the effect of MWCNT-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 39, pp. 207–212, 2012, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.025.
- [23] N. Akram *et al.*, "An experimental investigation on the performance of a flat-plate solar collector using eco-friendly treated graphene nanoplatelets–water nanofluids," *J Therm Anal Calorim*, vol. 138, no. 1, pp. 609–621, 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08153-4.
- [24] E. Ponticorvo, M. Iuliano, C. Cirillo, A. Maiorino, C. Aprea, and M. Sarno, "Fouling Behavior and Dispersion Stability of Nanoparticle-Based Refrigeration Fluid," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093059.
- [25] F. Fan, C. Qi, J. Tu, and Z. Ding, "Effects of variable magnetic field on particle fouling properties of magnetic nanofluids in a novel thermal exchanger system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 175, no. January, p. 107463, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107463.
- [26] S. Yao and Z. Teng, "Effect of nanofluids on boiling heat transfer performance," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 14, 2019, doi: 10.3390/app9142818.
- [27] R. W. Bertram, "Testing and standards for thermal solar collectors," in *Solar Energy Conversion II*, Elsevier, 1981, pp. 73–91. doi: 10.1016/B978-0-08-025388-6.50019-2.
- [28] O. Montoya-Marquez and J. Flores-Prieto, "The Effect of the Angle of Inclination on the Efficiency in a Medium-Temperature Flat Plate Solar Collector," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 71, Jan. 2017, doi: 10.3390/en10010071.
- [29] M. A. García-Rincón, J. J. Flores-Prieto, and O. Montoya-Márquez, "Thermal Performance of a Low and Medium Temperature Flat Plate Solar Collector When Controlling the Output-Input Temperature Difference and the Tilt Angle," *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 144, no. 2, 2022, doi: 10.1115/1.4053177.
- [30] L. S. Sundar, M. K. Singh, V. Punnaiah, and A. C. M. Sousa, "Experimental investigation of Al₂O₃/water nanofluids on the effectiveness of solar flat-plate collectors with and without twisted tape inserts," *Renew Energy*, vol. 119, pp. 820–833, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.056.
- [31] A. A. Hawwash, A. K. Abdel-Rahman, and S. A. Nada, "Experimental Study of Alumina Nanofluids Effects on Thermal Performance Efficiency of Flat Plate Solar Collectors," in *5th Annual International Conference on Sustainable Energy and Environmental Sciences (SEES 2016)*, Global Science & technology Forum (GSTF), Feb. 2016. doi: 10.5176/2251-189X_SEES16.29.
- [32] F. Kiliç, T. Menlik, and A. Sözen, "Effect of titanium dioxide/water nanofluid use on thermal performance of the flat plate solar collector," *Solar Energy*, vol. 164, pp. 101–108, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.02.002.
- [33] M. Prakasam, T. Arjunan, and S. Nataraj, "An experimental study of the mass flow rates effect on flat-plate solar water heater performance using Al₂O₃/water nanofluid," *Thermal Science*, vol. 21, no. suppl. 2, pp. 379–388, 2017, doi: 10.2298/TSCI17S2379P.
- [34] P. Raj and S. Subudhi, "A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 84, pp. 54–74, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.012.
- [35] N. Singh Rajput, D. Dilipbhai Shukla, D. Rajput, and S. Kumar Sharm, "Performance Analysis of Flat Plate Solar Collector using Al₂O₃/Distilled Water Nanofluid: An Experimental Investigation," *Mater Today Proc*, vol. 10, pp. 52–59, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.02.188.
- [36] H. Babar, M. Sajid, and H. Ali, "Viscosity of hybrid nanofluids: A critical review," *Thermal Science*, vol. 23, no. 3 Part B, pp. 1713–1754, 2019, doi: 10.2298/TSCI181128015B.
- [37] A. H. Elsheikh, S. W. Sharshir, M. E. Mostafa, F. A. Essa, and M. K. Ahmed Ali, "Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. October 2017, pp. 3483–3502, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.108.
- [38] M. Shafiey Dehaj, M. Rezaeian, D. Mousavi, S. Shamsi, and M. Salarmofrad, "Efficiency of the parabolic through solar collector using NiFe₂O₄/Water nanofluid and U-tube," *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 120, pp. 136–149, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2021.02.029.
- [39] Z. Said, R. Saidur, M. A. Sabiha, N. A. Rahim, and M. R. Anisur, "Thermophysical properties of Single Wall Carbon Nanotubes and its effect on exergy efficiency of a flat plate solar collector," *Solar Energy*, vol. 115, pp. 757–769, May 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.02.037.

- [40] K. R. V. Subramanian, T. N. Rao, and A. Balakrishnan, *Nanofluids and Their Engineering Applications*. CRC Press, 2019. doi: 10.1201/9780429468223.
- [41] O. Montoya-Marquez and J. J. Flores-Prieto, "Overall heat loss from both sides of a tilted unglazed solar collector under indoor conditions using flow calorimetry and thermography," *Journal of Enhanced Heat Transfer*, vol. 22, no. 6, pp. 527–539, 2015, doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2017014426.
- [42] J. A. D. Deceased and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, vol. 3, no. 3. 1982. doi: 10.1016/0142-694x(82)90016-3.
- [43] A. N. Abdalla and A. Shahsavari, "An experimental comparative assessment of the energy and exergy efficacy of a ternary nanofluid-based photovoltaic/thermal system equipped with a sheet-and-serpentine tube collector," *J Clean Prod*, vol. 395, p. 136460, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136460.
- [44] N. Ali, J. A. Teixeira, and A. Addali, "A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties," *J Nanomater*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/6978130.
- [45] K. H. Teng *et al.*, "Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces," *Powder Technol*, vol. 315, pp. 216–226, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.03.057.
- [46] H. S. Majidi, H. A. Alabdly, B. O. Hasan, and M. M. Hathal, "Oil fouling in double-pipe heat exchanger under liquid-liquid dispersion and the influence of copper oxide nanofluid," *Heat Transfer - Asian Research*, vol. 48, no. 5, pp. 1963–1981, 2019, doi: 10.1002/htj.21473.
- [47] Y. Menni, A. J. Chamkha, G. Lorenzini, N. Kaid, H. Ameur, and M. Bensafi, "Advances of nanofluids in solar collectors - a review of numerical studies," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 6, no. 3, pp. 415–427, 2019, doi: 10.18280/mmep.060313.
- [48] N. Sezer, M. A. Atieh, and M. Koç, "A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids," *Powder Technol*, vol. 344, pp. 404–431, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.12.016.
- [49] S. Choudhary, A. Sachdeva, V. Jaiswal, and M. N. Qureshi, "Thermal Performance and Economic Analysis of MgO and ZnI Nanofluid Based Flat Plate Solar Collector," *SSRN Electronic Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3947581.
- [50] W. Kang, Y. Shin, and H. Cho, "Economic Analysis of Flat-Plate and U-Tube Solar Collectors Using an Al₂O₃ Nanofluid," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 11, p. 1911, Nov. 2017, doi: 10.3390/en10111911.
- [51] L. S. Sundar, Y. T. Sinti, Z. Said, M. K. Singh, V. Punnaiah, and A. C. M. Sousa, "Energy, efficiency, economic impact, and heat transfer aspects of solar flat plate collector with Al₂O₃ nanofluids and wire coil with core rod inserts," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 40, p. 100772, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100772.
- [52] M. Shanbedi, S. Zeinali Heris, and A. Maskooki, "Experimental investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants," *J Therm Anal Calorim*, vol. 120, no. 2, pp. 1193–1201, May 2015, doi: 10.1007/s10973-015-4404-8.
- [53] M. E. Zayed, J. Zhao, Y. Du, A. E. Kabeel, and S. M. Shalaby, "Factors affecting the thermal performance of the flat plate solar collector using nanofluids: A review," *Solar Energy*, vol. 182, pp. 382–396, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.054.
- [54] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, and M. Arıcı, "Single and Hybrid Nanofluids to Enhance Performance of Flat Plate Solar Collectors: Application and Obstacles," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 86–102, Dec. 2020, doi: 10.3311/PPme.17312.
- [55] A. Rafiei, R. Loni, S. B. Mahadzir, G. Najafi, S. Pavlovic, and E. Bellos, "Solar desalination system with a focal point concentrator using different nanofluids," *Appl Therm Eng*, vol. 174, p. 115058, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115058.
- [56] Razvan Silviu Luciu, T. Mateescu, V. Cotorobai, and T. Mare, "Nusselt number and convection heat transfer coefficient for a coaxial heat exchanger," *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi*, vol. 15, no. January 2014, 2009.
- [57] S. Yan, F. Wang, Z. Shi, and R. Tian, "Heat transfer property of SiO₂/water nanofluid flow inside solar collector vacuum tubes," *Appl Therm Eng*, vol. 118, pp. 385–391, May 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.108.
- [58] A. Borode, N. Ahmed, and P. Olubambi, "A review of solar collectors using carbon-based nanofluids," *J Clean Prod*, vol. 241, p. 118311, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118311.
- [59] "Finite Element Simulation of Forced Convection in a Flat Plate Solar Collector: Influence of Nanofluid with Double Nanoparticles," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 7, no. 03, Jul. 2014, doi: 10.36884/jafm.7.03.21416.

- [60] S. S. Meibodi, A. Kianifar, O. Mahian, and S. Wongwises, "Second law analysis of a nanofluid-based solar collector using experimental data," *J Therm Anal Calorim*, vol. 126, no. 2, pp. 617–625, Nov. 2016, doi: 10.1007/s10973-016-5522-7.
- [61] M. A. Sharafeldin and G. Gróf, "Experimental investigation of flat plate solar collector using CeO₂-water nanofluid," *Energy Convers Manag*, vol. 155, pp. 32–41, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.070.
- [62] R. Nasrin, M. Alim, and S. Ahmed, "Comparative Study between 2D and 3D Modeling of Nanofluid Filled Flat Plate Solar Collector," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 34, no. 3, pp. 527–536, Sep. 2016, doi: 10.18280/ijht.340326.
- [63] Y. Tong, H. Lee, W. Kang, and H. Cho, "Energy and exergy comparison of a flat-plate solar collector using water, Al₂O₃ nanofluid, and CuO nanofluid," *Appl Therm Eng*, vol. 159, p. 113959, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113959.
- [64] E. Bellos, C. Tzivanidis, and Z. Said, "A systematic parametric thermal analysis of nanofluid-based parabolic trough solar collectors," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, p. 100714, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100714.
- [65] P. Michael Joseph Stalin, T. V. Arjunan, M. M. Matheswaran, and N. Sadanandam, "Experimental and theoretical investigation on the effects of lower concentration CeO₂/water nanofluid in flat-plate solar collector," *J Therm Anal Calorim*, vol. 135, no. 1, pp. 29–44, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10973-017-6865-4.
- [66] M. Siavashi, K. Ghasemi, R. Yousofvand, and S. Derakhshan, "Computational analysis of SWCNH nanofluid-based direct absorption solar collector with a metal sheet," *Solar Energy*, vol. 170, pp. 252–262, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.05.020.
- [67] S. Mesgari, S. Coulombe, N. Hordy, and R. A. Taylor, "Thermal stability of carbon nanotube-based nanofluids for solar thermal collectors," *Materials Research Innovations*, vol. 19, no. sup5, pp. S5-650-S5-653, May 2015, doi: 10.1179/1432891714Z.0000000001169.
- [68] I. Wole-oshio, E. C. Okonkwo, S. Abbasoglu, and D. Kavaz, "Nanofluids in Solar Thermal Collectors: Review and Limitations," *Int J Thermophys*, vol. 41, no. 11, p. 157, Nov. 2020, doi: 10.1007/s10765-020-02737-1.
- [69] S. K. Verma, A. K. Tiwari, and D. S. Chauhan, "Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids," *Energy Convers Manag*, vol. 134, pp. 103–115, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.037.
- [70] M. Mirzaei, "Experimental investigation of the assessment of Al₂O₃-H₂O and CuO-H₂O nanofluids in a solar water heating system," *J Energy Storage*, vol. 14, pp. 71–81, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.09.012.
- [71] S. T. J. Suthahar, S. Jaisankar, and S. Saravanan, "Experimental investigation on solar flat plate collector using alumina nanofluid with tube inserts," *Materials Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 179–189, Feb. 2022, doi: 10.1080/10667857.2020.1824146.
- [72] H. J. Jouybari, M. E. Nimvari, and S. Saedodin, "Thermal performance evaluation of a nanofluid-based flat-plate solar collector," *J Therm Anal Calorim*, vol. 137, no. 5, pp. 1757–1774, Sep. 2019, doi: 10.1007/s10973-019-08077-z.
- [73] M. Hamdan and M. Sarsour, "Effect of Nanoparticles on the Performance of Solar Flat Plate Collectors," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 1–7, Mar. 2018, doi: 10.12911/22998993/81163.
- [74] M. Mirzaei, "Experimental investigation of CuO nanofluid in the thermal characteristics of a flat plate solar collector," *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 260–267, Jan. 2019, doi: 10.1002/ep.12902.
- [75] A. M. Genc, M. A. Ezan, and A. Turgut, "Thermal performance of a nanofluid-based flat plate solar collector: A transient numerical study," *Appl Therm Eng*, vol. 130, pp. 395–407, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.166.
- [76] S. S. Meibodi, A. Kianifar, O. Mahian, and S. Wongwises, "Second law analysis of a nanofluid-based solar collector using experimental data," *J Therm Anal Calorim*, vol. 126, no. 2, pp. 617–625, 2016, doi: 10.1007/s10973-016-5522-7.
- [77] M. M. Mohamed, N. H. Mahmoud, and M. A. Farahat, "Energy storage system with flat plate solar collector and water-ZnO nanofluid," *Solar Energy*, vol. 202, no. March, pp. 25–31, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.03.060.
- [78] R. Nasrin and M. A. Alim, "Thermal performance of nanofluid filled solar flat plate collector," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 17–24, 2015, doi: 10.18280/ijht.330203.
- [79] I. N. Unar et al., "Modeling and simulation of solar flat plate collector for energy recovery at varying regional coordinates," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 3, pp. 4748–4761, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15869-0.

- [80] E. Arikian, S. Abbasoğlu, and M. Gazi, "Experimental performance analysis of flat plate solar collectors using different nanofluids," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 6, 2018, doi: 10.3390/su10061794.
- [81] A. F. Aljohani, A. Ebaid, E. H. Aly, I. Pop, A. O. M. Abubaker, and D. J. Alanazi, "Explicit solution of a generalized mathematical model for the solar collector/photovoltaic applications using nanoparticles," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 67, pp. 447–459, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.12.044.
- [82] M. Amar *et al.*, "Energy, exergy and economic (3E) analysis of flat-plate solar collector using novel environmental friendly nanofluid," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 1–21, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-27491-w.
- [83] D. Anin Vincely and E. Natarajan, "Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation," *Energy Convers Manag*, vol. 117, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.015.
- [84] E. Natarajan and R. Sathish, "Role of nanofluids in solar water heater," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 3–7, 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1876-8.
- [85] E. Shojaeizadeh, F. Veysi, and A. Kamandi, "Exergy efficiency investigation and optimization of an Al₂O₃-water nanofluid based Flat-plate solar collector," *Energy Build*, vol. 101, pp. 12–23, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.048.
- [86] H. Kim, J. Kim, and H. Cho, "Experimental study on performance improvement of U-tube solar collector depending on nanoparticle size and concentration of Al₂O₃ nanofluid," *Energy*, vol. 118, pp. 1304–1312, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.009.
- [87] H. Chaji, Y. Ajabshirchi, E. Esmaeilzadeh, S. Z. Heris, M. Hedayatizadeh, and M. Kahani, "Experimental study on thermal efficiency of flat plate solar collector using tio₂/water nanofluid," *Mod Appl Sci*, vol. 7, no. 10, pp. 60–69, 2013, doi: 10.5539/mas.v7n10p60.
- [88] M. A. Sharafeldin, G. Gróf, and O. Mahian, "Experimental study on the performance of a flat-plate collector using WO₃/Water nanofluids," *Energy*, vol. 141, pp. 2436–2444, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.068.
- [89] Z. Said, R. Saidur, M. A. Sabiha, N. A. Rahim, and M. R. Anisur, "Thermophysical properties of Single Wall Carbon Nanotubes and its effect on exergy efficiency of a flat plate solar collector," *Solar Energy*, vol. 115, pp. 757–769, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.02.037.
- [90] T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, and S. Zinadini, "An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors," *Renew Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 293–298, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.056.
- [91] I. Harrabi, M. Hamdi, and M. Hazami, "Potential of simple and hybrid nanofluid enhancement in performances of a flat plate solar water heater under a typical North-African climate (Tunisia)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 12, pp. 35366–35383, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-24703-0.
- [92] J. Akhter, S. I. Gilani, H. H. Al-kayiem, M. Ali, and F. Masood, "Characterization and stability analysis of oil-based copper oxide nanofluids for medium temperature solar collectors," *Materwiss Werksttech*, vol. 50, no. 3, pp. 311–319, Mar. 2019, doi: 10.1002/mawe.201800220.
- [93] G. Colangelo, E. Favale, P. Miglietta, M. Milanese, and A. de Risi, "Thermal conductivity, viscosity and stability of Al₂O₃-diathermic oil nanofluids for solar energy systems," *Energy*, vol. 95, pp. 124–136, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.11.032.
- [94] A. S. Abdelrazik, K. H. Tan, N. Aslfattahi, A. Arifuzzaman, R. Saidur, and F. A. Al-Sulaiman, "Optical, stability and energy performance of water-based MXene nanofluids in hybrid PV/thermal solar systems," *Solar Energy*, vol. 204, pp. 32–47, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.04.063.
- [95] S. Choudhary, A. Sachdeva, and P. Kumar, "Influence of stable zinc oxide nanofluid on thermal characteristics of flat plate solar collector," *Renew Energy*, vol. 152, pp. 1160–1170, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.142.
- [96] O. Gulzar, A. Qayoum, and R. Gupta, "Experimental study on stability and rheological behaviour of hybrid Al₂O₃-TiO₂ Therminol-55 nanofluids for concentrating solar collectors," *Powder Technol*, vol. 352, pp. 436–444, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2019.04.060.
- [97] J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, and S. Lee, "Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids," *MRS Proceedings*, vol. 457, p. 3, Feb. 1996, doi: 10.1557/PROC-457-3.
- [98] K. H. Krishna, S. Neti, A. Oztekin, and S. Mohapatra, "Modeling of particle agglomeration in nanofluids," *J Appl Phys*, vol. 117, no. 9, Mar. 2015, doi: 10.1063/1.4913874.
- [99] Y. Hwang *et al.*, "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids," *Thermochim Acta*, vol. 455, no. 1–2, pp. 70–74, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.tca.2006.11.036.

- [100] X. Li, G. Zeng, and X. Lei, "The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC) application," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 206, no. 1, p. 110323, 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2019.110323.
- [101] N. Ali *et al.*, "Oil fouling in double-pipe heat exchanger under liquid-liquid dispersion and the influence of copper oxide nanofluid," *Open Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 216–226, 2019, doi: 10.1038/s41598-023-27491-w.
- [102] A. Goswami, S. C. Pillai, and G. McGranaghan, "Micro/Nanoscale surface modifications to combat heat exchanger fouling," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 16, p. 100519, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.100519.
- [103] R. S. Mishra, "Method for improving thermodynamic performance of vapour compression refrigeration system using nanofluids- A Review," *International Journal of Research in Engineering and Innovation*, vol. 2, no. 4, pp. 374–383, 2017, [Online]. Available: <http://www.ijrei.com>
- [104] R. Caro-Briones *et al.*, "Influence of monomeric concentration on mechanical and electrical properties of poly(styrene-co-acrylonitrile) and poly(styrene-co-acrylonitrile/acrylic acid) yarns electrospun," *J Appl Polym Sci*, vol. 137, no. 39, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1002/app.49166.
- [105] M. A. García-Rincón and J. J. Flores-Prieto, "Nanofluids stability in flat-plate solar collectors: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 271, no. March, 2024, doi: 10.1016/j.solmat.2024.112832.
- [106] Y. Xuan and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 43, no. 19, pp. 3701–3707, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
- [107] Comité de Normalización del Instituto RENOVETEC, "Normas IRIM 1001-20100101 a IRIM 1001-20100107," Normas IRIM 1001-20100101 a IRIM 1001-20100107, referidas a las tareas de mantenimiento mínimas que deben aplicarse a bombas centrífugas de todo tipo. [Online]. Available: <http://www.renovetec.com/irim/revista/inspecciones/mobile/index.html>
- [108] J. P. Jenkins and J. E. Hill, "Testing of water-heating collectors according to ashrae standard 93-77," in *Sun: Mankind's Future Source of Energy*, Elsevier, 1978, pp. 1021–1028. doi: 10.1016/B978-1-4832-8407-1.50203-8.
- [109] K. Zelzouli, A. Guizani, R. Sebai, and C. Kerkeni, "Solar Thermal Systems Performances versus Flat Plate Solar Collectors Connected in Series," *Engineering*, vol. 04, no. 12, pp. 881–893, 2012, doi: 10.4236/eng.2012.41212.
- [110] Secretaría de Energía, "NORMA Oficial Mexicana NOM-023-ENER-2018, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire. Límites, métodos de prueba y etiquetado," *Diario Oficial de la Federación*, p. 2016, 2018.
- [111] D. Santizo-Díaz and J. J. Flores-Prieto, "Thermo-economic comparative of open-greenhouse and sun-patio coffee drying in the Sierra Mariscal Chiapas-México," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 70, p. 106072, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.106072.
- [112] K. Koritsoglou *et al.*, "Improving the accuracy of low-cost sensor measurements for freezer automation," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 21, pp. 1–16, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20216389.
- [113] C. X. García Álvarez, R. A. López Lozano, and V. A. Peñaranda Idrovo, "Implementación de prototipo IOT para la monitorización ambiental y radiación solar utilizando hardware de bajo costo y energía solar," Guayaquil, 2024. Accessed: Mar. 30, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27419>
- [114] Z. Runjing, X. Hongwei, and R. Guanzhong, "Design of temperature measurement system consisted of FPGA and DS18B20," in *Proceedings - 2011 International Symposium on Computer Science and Society, ISCCS 2011*, 2011, pp. 90–93. doi: 10.1109/ISCCS.2011.32.
- [115] S. N. S. Mohamad, N. Mahmed, D. S. Che Halin, K. Abdul Razak, M. N. Norizan, and I. S. Mohamad, "Synthesis of alumina nanoparticles by sol-gel method and their applications in the removal of copper ions (Cu²⁺) from the solution," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 701, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/701/1/012034.
- [116] S. Carstens, C. Splith, and D. Enke, "Sol-gel synthesis of α -Al₂O₃ with enhanced porosity via dicarboxylic acid templating," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-56294-1.
- [117] Y. Waseda, E. Matsubara, and K. Shinoda, *X-Ray Diffraction Crystallography*, vol. 46, no. 1. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-16635-8.
- [118] JCPDS and American Ceramic Society, "Selected powder diffraction data for education & [and] training: search manual and data cards," in *JCPDS, The Centre., Swarthmore, PA, U.S.A., 1988.*

Anexo: Prueba de funcionalidad 1: Rendimiento diario del colector solar con y sin nanofluidos

Se evaluó el comportamiento de la energía útil entregada por el sistema de captación solar de placa plana bajo las condiciones ambientales de Cuernavaca, Morelos, para analizar su desempeño térmico durante el periodo de estudio. La temperatura ambiente promedio fue de 28 °C, la irradiancia solar máxima alcanzada fue de 2,469 kJ/hr m² (685.8 W/m²), a una temperatura de entrada de 20 °C, logrando alcanzar una temperatura de salida de 43.1 °C y una potencia máxima de 983 kW.

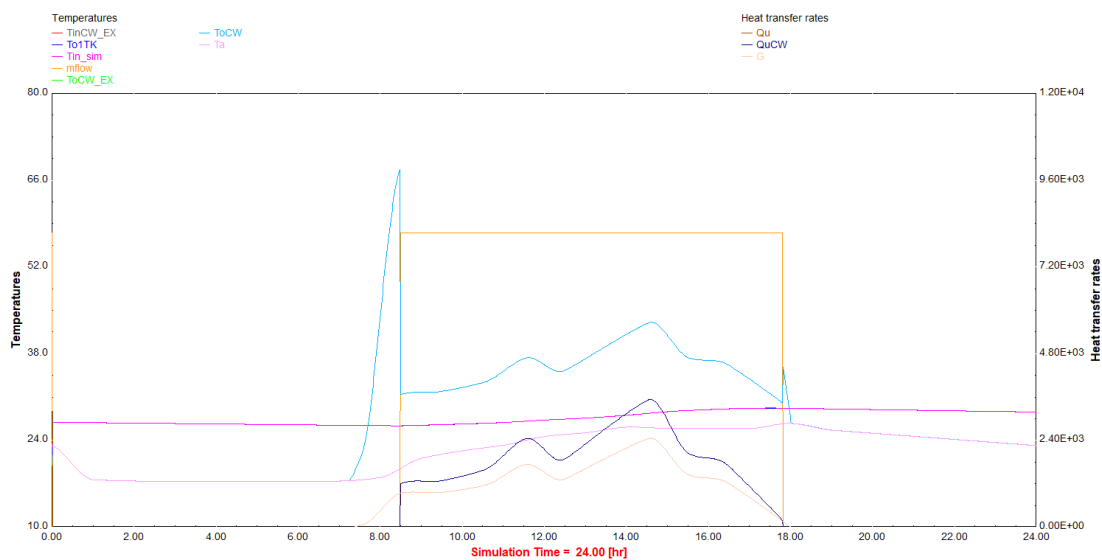


Figura 58. Energía útil en el FPSWH usando agua como fluido caloportador con condiciones meteorológicas de Cuernavaca, Morelos.

La **Figura 59** muestra la eficiencia térmica del colector con alúmina y con el fluido convencional. La eficiencia térmica teórico-experimental con fluido convencional es prácticamente constante y se sitúa en la media del 50 %. También, se observa que al añadir las nanopartículas de óxido metálico Al₂O₃ la eficiencia aumenta hasta un 63 %, acercándose al 80 %, encontrando así que la adición de nanopartículas mejora significativamente la eficiencia térmica del colector solar y reduciendo las pérdidas de calor del colector hasta en un 84 %.

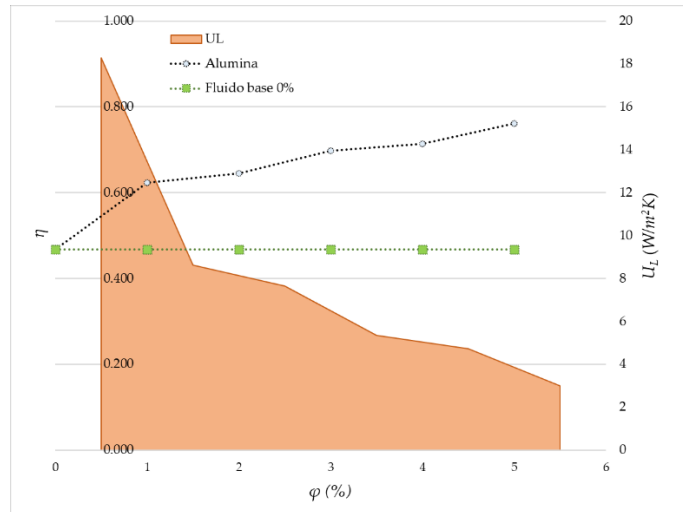


Figura 59. Eficiencia térmica y pérdidas globales de calor del colector solar usando diferentes concentraciones de nanopartículas en agua con modelos matemáticos de Duffie and Beckman.

En la **Figura 60** se muestra la eficiencia térmica del colector con alúmina, óxido de cobre y cobre respecto al fluido convencional. Los resultados revelan que la eficiencia aumenta hasta un 63 % alcanzando 76 %, el óxido de cobre alcanza 60 % y el cobre solo alcanza el 56 % pero a una concentración de nanopartícula de 0.01 %p/p.

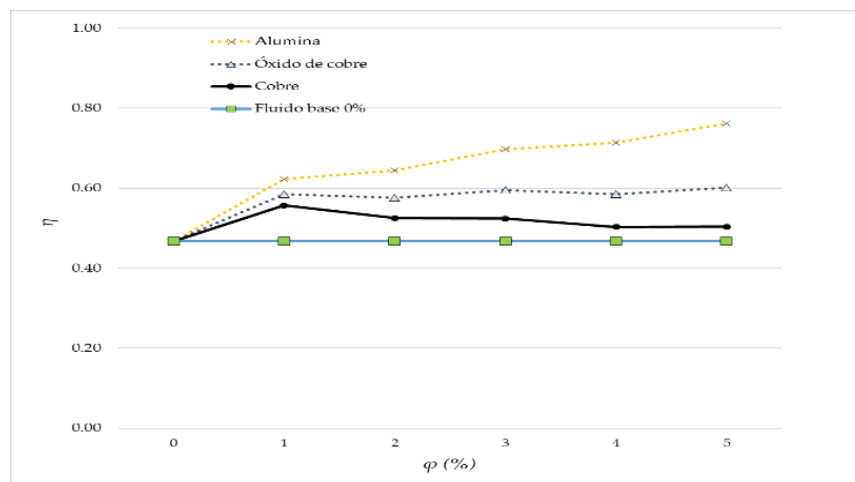


Figura 60. Eficiencia térmica del colector solar usando diferentes nanopartículas y concentraciones de nanopartículas en agua con modelos matemáticos de Duffie and Beckman.