

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
“MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA DE LOS
COLECTORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO MEDIANTE LA
INTELIGENCIA ARTIFICIAL”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

WASSILA AJBAR

DIRECTORES:

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ – CIICAp
DRA. ARIANNA PARRALES BAHENA – Cátedra CONACYT

SINODALES: DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ
DR. ALBERTO ALVAREZ GALLEGOS
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ

CUERNAVACA, MORELOS

Agosto, 2022

Cuernavaca, Morelos, 02 de febrero de 2022.

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA DE LOS COLECTORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO MEDIANTE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL, que presenta la alumna **WASSILA AJBAR**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS

DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ

DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ

DR. RAFAEL ROJAS RODRÍGUEZ

DRA. FLOR LIZETH TORRES ORTIZ

DRA. ARIANNA PARRALES BAHENA

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ

Se adiciona efirma UAEM

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ | Fecha:2022-03-23 09:17:30 | Firmante

jWuXAqAGf/grWAQgZZfsCjDjIITAJCmT3XA2XHYW+HAKClwPymMgTOTPFpksVjYB2pJ1clkWne3486+hN6SBUjILMnHTWJuYmzbFXCYWhTynRYRgv4nD+Niczxh5dqRPqk4xjPPWgSPH0mLm/3Kdg3tvcz111bxG8FEqSN2Bf4RFXF19TjYWBcjEw6dfqOpHRTYKj0BxfSSEwTTmk22BXi81zMFIRMH6vA60C3aol6y6btDiyJx4e0bwlFBuASXeKAdhcxO3HDKrEz+RAz44pUc4xKP3w+FyT4+wzKDKKW26q3oJw47YszP/Hvk3BZNqXlg9Ynm0wousvWOMiw==

ALBERTO ARMANDO ALVAREZ GALLEGOS | Fecha:2022-03-23 09:22:52 | Firmante

JZr3aKH13Qd0A0+AY5qvwTBMNu4BWNnT+3EXv4HW9KDIVXDxX9AafDVlIFQDvWkxdbtVf86jSn2pUGJHaUE/oG8C2I7SMOKLeDCxGLpYxiygFAhQs7vcmmHVWu4kN7h4zMQGZ3HE27IT8yNV0XfCQne+1v1pD+sZIFlz0KQzEL9GgxRcKRv06A5Qdnl5diczyuBq/qMAcNT5+9BOsOuu1zLkKHAmdCuLY4cBv2hccy+H8UvTof44iSVWYUviQF6RDrcb+z08ZIWUYOdb1Wejs5V0t8j36uJa7MYJvON/BO+5FD9/5q2oeJ4JH6qoagjPZb37ftP/+BN4J/llEQ==

ARIANNA PARRALES BAHENA | Fecha:2022-03-23 09:39:33 | Firmante

GdEz1dHJ90Eup2ZqsGYXg4fnUqH565AX5odQdeSO3a1BOIn8H9zKsgf+pCJ4aTqyNi0bfHOnv2D0S7tGxaDotTjvFRMkgGXR1rQ47BvksZoOWxU4Tos46KW5LsRsO3+16Uk5bzX909upUF3wi6gWdekaq1FDaA30dduzwhDe+vgj6VGENn6/RZfM4n28lcYU07tgMFAlXq7NjYvmSkK4N+pvEwmF6eCSZxSom840WueXwuOEj6G1W18pvcC65M91ZRkaZ7UB2zGURTYL02ROQLoGSKH4tcdH1KamGGOa18hsyrJtBMFa+gGKvfjXOq6OzQ454/BGwD4N+I4Z2Lmzg==

SUSANA SILVA MARTINEZ | Fecha:2022-03-23 09:51:35 | Firmante

vdC6GwZuF3Gss18oj6GLP+JoBHHiBYszVhaUltYr/ce7hRBNV1gG9FQb3WxV17PsfmcSc2BNY3w1hrxliSw1EpiB5xLG6QdVzHwK+NJ8/M3Qz94u1CBwXmnOFvUalPYds+fsi9XPcllgoc+wZwEBZ/nSRM4EGGY9D4ZfTKQgn/gHR1f0B/sTSOo6SFJU78tjrNS3Bw+GGRI5t58tK/Ocxk2UKqmM2etZdJhCfv0F3L/uuBckRGZBvs+sAdjcVpUU8Fi31Se1gEvtDxzXYN9o3oloWzIOYEjPQK5tksSpG3k3+TcMWI0SvMXbq10ShmVSTAnjn+u84Rnr6sUq7Txy0g==

RAFAEL ROJAS RODRIGUEZ | Fecha:2022-03-23 12:39:42 | Firmante

XKMwTCSqMXGqwyifLR6D7XB1vwmCq73YDeivdp0WsiPiGXIDrKMSuhL4QompzAphY4gQcnpWBnPPXDM5Z1ZCYWqs/TjpUvnqMQ95BssST5zgRVyTl6GC8pPz/k8WYaisyL/VjWKFpRUnHpaKYKkBCER2sPcfi03EpcSSPdiMMF85inlwKAv6dQ91ZsL/G3lk0DDNuDv6+CdESrrRqqK5Ju3U8P3HqfJLrG4S+beoyCQXjrYPV77Lc4P/eTlILB2WPKkE82W+9mj0vF/QJ5s2EzoClyc40ibnzLj+Ug7YbyUQE4w8Inzn+Zl6ZYafGhraNFESft5BKka3xGWpYQ==

JOSE ALFREDO HERNANDEZ PEREZ | Fecha:2022-03-23 14:40:53 | Firmante

gvd45a68W/t9FyHBw2Nbe9Jd6z7g1x9PHPDmVrLR90S0Hy1oTmltBweT3+fZWT9A8kwaLsA5pRctMOSyKOCz3CwctXmsehKIQKp185yKOPK5I4LD/7ApiX4Grk/f0nujVcPKKEHkR3VzL6kGwhdTsv1jXk6RnBjFRmUaC4HRsOlsvdEYrS9s2AVVHsHKQYQQAYp52WJKvRz5PEbz7fwln51pvmh0a0JxCxnXH21awAk6CfiFTrFD7UUEABKblgaOhNm+ZSG/ikhMxN81Ql/yx9nSkQ6uGMygxfLY2RpA9u4n/qF/vKNtT7T25li+IGzdJcLjJ030jipaw==

FLOR LIZETH TORRES ORTIZ | Fecha:2022-03-24 12:01:40 | Firmante

qO9sQg9Cg0zll79C748q+IE5ql6Zy2GqJsDeus7zkrAdvgdRLS3FY0nS/Zml91Veumc2Ek4GFxNfl1PNjKLV3qhOFNtl7dQMqr8Erfe98vXTefl8gN+fbK9tZlZRzYDx8WDVnMGvw3FFYFK8xW5JGKlpUquYwCYYckjE7tJgYaJkbb9LiQt2ID8C2ZM1PzwYfypADIZbnypQI3bO5Y8U1ztGvFqUpd3hV0foV2717mAZdz8GNSgKK/EAncPcVbXUYrcsDI/zlCuz2xrK0sx3CylXREGzlAomqX4zFzfmz84X9probYwqikr+zqzgyziDDrl2P/KSv/ABLSqnpQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



eF96QkbB1

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/97YQ2guDa2l4YzhrdYGRpKtYU3LW4b0>

RESUMEN

El presente trabajo de investigación llevó a cabo una nueva estrategia capaz de mejorar el rendimiento térmico del colector solar de canal parabólico (CCP) mediante la determinación de las condiciones óptimas de más de una variable de entrada del sistema CCP. Para ello, se desarrolló una red neuronal artificial inversa multivariable (ANNim) mediante la aplicación de dos funciones de transferencia en combinación con los algoritmos metaheurísticos. De primera instancia, se realizaron dos modelos ANN para predecir la eficiencia térmica (η_t) del CCP. Un modelo emplea un algoritmo genético (GA) y el otro un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO). Ambos modelos ANNim-GA y ANNim-PSO fueron validados y comparados en detalle. Se describe también la metodología para la aplicación de ANNim-GA y ANNim-PSO. Los resultados mostraron que ambos modelos desarrollados de ANN lograron resultados satisfactorios con un coeficiente de determinación de 0.9511 y una raíz del error cuadrático medio de 0.0193. Posteriormente, para obtener los valores óptimos de las variables: ángulo de borde, temperatura de entrada y caudal volumétrico de agua, ambos modelos ANN se invirtieron para adquirir la función objetivo multivariable que se resuelve con GA y PSO. La función *Tansig* demostró una mejor adaptación al modelo ANNim al encontrar todas las variables de entrada en una prueba aleatoria con un error de 3.96% con un tiempo computacional de 14.39 s aplicando PSO. Los resultados mostraron que al utilizar la metodología ANNim es factible mejorar el desempeño del CCP optimizando desde una, dos y tres variables al mismo tiempo. Al optimizar una variable a la vez, fue posible aumentar el rendimiento de una prueba aleatoria hasta 54.78%, 27.62% y 51.92% al encontrar la temperatura de entrada, el ángulo de borde y el caudal volumétrico de agua, respectivamente. Al optimizar dos variables simultáneamente, fue posible aumentar el rendimiento de una prueba aleatoria hasta en un 36.73% al encontrar la temperatura de entrada y el caudal volumétrico de agua adecuados. Al optimizar tres variables simultáneamente, fue posible aumentar una prueba experimental aleatoria de hasta un 67.12%. Finalmente, el nuevo método ANNim propuesto puede incrementar la eficiencia térmica de un CCP en tiempo real debido al acoplamiento de algoritmos metaheurísticos que permiten obtener variables óptimas en el menor tiempo posible. Por tanto, puede ser un

método prometedor y ampliamente utilizado para optimizar y controlar los procesos térmicos.

ABSTRACT

In the present research work, a new strategy capable of improving a parabolic trough solar collector (PTSC)'s thermal performance by determining the optimal conditions of more than a single input variable of the PTSC system was carried out. For this reason, a multivariable inverse artificial neural network (ANNim) is developed by applying two transfer functions combined with metaheuristic algorithms. At first, two ANN models were performed to predict the PTSC thermal efficiency (η_t), validated, and compared in detail. The methodology for the application of ANNim-GA and ANNim-PSO is also described in more detail. The results showed that both ANN models developed achieved satisfactory results with a coefficient of determination of 0.9511 and a root mean square error of 0.0193. Then, to obtain the optimal values of the variable: rim angle, inlet temperature, and volumetric flow rate of water, both ANN models were inverted to acquire the multivariate objective function that could be solved with genetic algorithms (GA) and particle swarm optimization (PSO). The *Tansig* function demonstrated better adaptation to the ANNim model by finding all the input variables in a random test with an error of 3.96% with a computational time of 14.39 s applying PSO. The results showed that by using the ANNim methodology, it is feasible to improve the performance of the PTSC by optimizing from one, two, and three variables at the same time. In optimizing one variable at a time, it was possible to increase a random test's performance up to 54.78%, 27.62%, and 51.92% by finding the rim-angle inlet-temperature and water volumetric flow rate, respectively. In optimizing two variables simultaneously, it was possible to increase a random test's performance up to 36.73% by finding the appropriate inlet-temperature and water volumetric flow rate. In optimizing three variables simultaneously, it was possible to increase a random experimental test of up to 67.12%. Finally, the new ANNim method proposed may increase the thermal efficiency of a PTSC in real-time because of the coupling of metaheuristic algorithms that allow obtaining optimal variables in the shortest possible time. Therefore, it can be a promising and widely used method for optimizing and controlling thermal processes.

AGRADECIMIENTOS

Es honorable para mí expresar mi agradecimiento y gratitud a todas aquellas personas que han dejado su huella, amor y conocimiento. Ya que han sido parte de este camino emprendido y que con sus virtuosos consejos, amistad y apoyo hicieron posible alcanzar una de mis metas más queridas en la vida.

Al **Dr. José Alfredo Hernández Pérez**, mi tutor, por su confianza desde mi llegada al CIICAp en la maestría y por su apoyo en el doctorado. Por su noble esfuerzo, dedicación, compromiso y por su gran calidez humana que lo caracteriza.

A la **Dra. Arianna Parrales**, mi cotutor, por guiarme y brindarme su apoyo para concretar este trabajo durante toda esta aventura, sobre todo por tenerme tanta paciencia.

A los Doctores: **Alberto Armando Álvarez Galleos**, **Armando Huicochea Rodríguez** y **Susana Silva Martínez**, mi comité tutorial, por sus valiosos comentarios y aportaciones durante el desarrollo de esta Tesis.

Al **Dr. Bassam Ali** que amablemente vía electrónica ha confiado en mí, proporcionándome información y datos experimentales, sin ellos, este documento no habría sido posible. En forma especial, Al **Dr. Outmane Oubram** porque siempre me atendió con amabilidad, respeto y gran profesionalismo, por su tiempo y amistad, Gracias Dr. por su ayuda, apoyo y grandes enseñanzas tanto personales como profesionales me enseñaron a ser una mejor persona.

Al **CONACyT** por la beca otorgada durante el tiempo de mi posgrado y realización de los estudios de doctorado.

Al **CIICAp** por ser parte de esta majestuosa casa de estudios que me ha abierto sus puertas para realizar y finalizar mis estudios de posgrado. Al personal administrativo, docente, intendente, de seguridad y técnico por su amabilidad y las facilidades prestadas a lo largo de mi estancia.

A todos los amigos que me acompañaron en esta etapa, en especial a Oscar Xosocotla, Ulises Cruz Jacobo, Jesús Emmanuel Solís Pérez y a todas las personas de la carrera, que me ofrecieron su mano y que de alguna u otra manera me hicieron saber que no estaba sola.

DEDICATORIAS

Le agradezco a **Dios**, ante todo, por darme la vida, guiarme hacía un camino correcto, estar siempre a mi lado y por darme la fortaleza e iluminación para superar y continuar en la prueba de la vida.

A mi Familia. A **Ahmed Ajbar** y **Zohra Ajbar**, mis Papás, no tengo más que palabras de agradecimiento, por siempre apoyarme y orientarme en mis decisiones, por ayudarme a ser una mejor persona y sobre todo por ser mis mejores amigos, muchas gracias mis papás por sus motivaciones, apoyos, consejos que me han servido en el transcurso de toda mi vida, por enseñarme a luchar hacia delante, por sus grandes corazones y capacidades de entrega, pero sobre todo por enseñarme a ser seria, trabajadora y responsable desde joven, gracias a ustedes he llegado a esta meta.

Sin dudar en agradecer también, A **Asmae, Rajae, Mohamed Arbi, Hicham y Idris**, mis hermanos, por sus cariños, apoyos, orientaciones y sus motivaciones. Particularmente, A **Rajae Ajbar** mi coach por ser la persona que siempre está apegada a mí en los buenos y malos momentos, que nunca me ha dejado sucumbir ante los obstáculos encontrados, y por recordarme que aprenda de mis errores y sobre todo por ser gran hermana, te amo hermanita.

En estas líneas tampoco dejaré de mencionar a mis dos queridos sobrinos, **Ayman** y **Tasnim** y su mamá **Souad**, que fueron mi inspiración en todo momento para seguir adelante.

A toda mi familia

(Wassila Ajbar, 2022)

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIAS	4
ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
NOMENCLATURA	9
CAPÍTULO 1. Antecedentes	12
1. Introducción	12
1.1. Preguntas de Investigación	17
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivo General	18
1.4. Objetivos específicos	18
CAPÍTULO 2. Estado del arte de las diferentes formas para mejorar el rendimiento térmico del CCP y sus aplicaciones	20
2.1. Estudios experimentales para mejorar el rendimiento de CCP	20
2.1.1. Estudios experimentales de rendimiento del tubo absorbedor	22
2.1.2. Estudios experimentales de nanofluidos en CCP	28
2.2. Estudios numéricos para mejorar el rendimiento CCP	34
2.2.1. Estudios numéricos de rendimiento del tubo absorbedor	34
2.2.2. Estudios numéricos de nanofluidos en CCP	41
2.2.3. Modelos numéricos, simulación y optimización de CCP	48
2.3. Aplicaciones	59
2.3.1. CCP en proceso de desalinización y destilación	59
2.3.2. Cocina solar	59
2.3.3. CCP para procesos industriales	60

2.3.4. CCP en proceso de calentamiento y enfriamiento	60
2.3.5. CCPs en planta de energía.....	61
CAPÍTULO 3. Modelos de simulación y optimización	63
3.1. Desarrollo de la red neuronal artificial	63
3.1.1. Normalización de datos.....	65
3.1.2. Análisis estadístico para la evaluación del desempeño del modelo ANN	65
3.1.3. Análisis de sensibilidad.....	66
3.2. Descripción del modelo ANNim enfocado en optimizar variables múltiples	66
3.3. Métodos metaheurísticos para resolver la función multivariable	68
3.4. Algoritmo Genético (GA).....	69
3.5. Optimización de enjambre de partículas (PSO).....	70
CAPÍTULO 4. Resultados del desarrollo y validación experimental del modelo computacional de simulación y optimización	71
4.1. Aplicación directa del modelo de red neural	74
4.2. Los resultados del análisis de sensibilidad	77
4.3. Los resultados de ANNim-GA y ANNim-PSO.....	80
CAPÍTULO 5. Conclusiones y perspectivas futuras	87
5.2 Perspectivas futuras	90
ANEXO A	91
PUBLICACIONES.....	91
Artículos como parte del proyecto doctoral	91
Capítulo del libro.....	92
Patente	92
Participación en congresos nacionales	92
REFERENCIAS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Revisión de diferentes configuraciones de PTSR estudiadas experimentalmente.	24
Tabla 2.2. Revisión de diferentes nanofluidos de PTSC estudiados experimentalmente.....	31
Tabla 2.3. Revisión de diferentes configuraciones de tubo absorbedor estudiadas numéricamente.....	37
Tabla 2.4. Revisión de diferentes nanofluidos de CCP estudiados numéricamente.....	44
Tabla 2.5. Modelos numéricos, simulación y optimización de CCP.....	50
Tabla 3.1. Pseudocódigo y parámetros utilizados para desarrollar el algoritmo genético ...	69
Tabla 3.2. Pseudocódigo y parámetros utilizados para desarrollar la optimización del enjambre de partículas.....	70
Tabla 4.1. Diseño de parámetros CCP con un ángulo de llanta de 45 ° y 90 °.	71
Tabla 4.2. Intervalo de condiciones de operación de entrada y salida experimentales	73
Tabla 4.3. Resultados de la red ANN utilizando la función Tansig en la capa oculta.....	75
Tabla 4.4. Resultados de la red ANN usando la función Logsig en la capa oculta.....	75
Tabla 4.5. Resultados del análisis estadístico con la prueba de pendiente de intersección..	76
Tabla 4.6. Los pesos y bias del modelo ANN para la función Tansig en la capa oculta	77
Tabla 4.7. Los pesos y bias del modelo ANN para la función Logsig en la capa oculta	77
Tabla 4.8. Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos del modelo ANNim aplicando la función Tansig.....	81
Tabla 4.9. Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos del modelo ANNim aplicando la función Logsig	81
Tabla 4.10. Pruebas de datos experimentales para optimizar con ANNim-PSO	82
Tabla 4.11. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del CCP optimizando una variable a la vez en las tres pruebas experimentales.....	83

Tabla 4.12. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del CCP optimizando dos variables a la vez en las tres pruebas experimentales.	84
Tabla 4.13. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del PTC optimizando tres variables a la vez en las tres pruebas experimentales	85
Tabla 4.14. Comparación de la potencia computacional de otros modelos y el presente trabajo	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación esquemática de los parámetros que afectan el rendimiento del CCP.....	21
Figura 2.2. Diferentes formas para el mejoramiento de la transferencia de calor en el tubo absorbedor del CCP.....	22
Figura 2.3. Detalle de nanofluido.	28
Figura 3.1. Diagrama esquemático del modelo ANNim para optimizar las múltiples variables de entrada del colector solar de canal parabólico.	67
Figura 4.1. Diagrama de un CCP experimental.....	71
Figura 4.2. Esquema del ciclo hidráulico diseñado del sistema experimental	73
Figura 4.3. Diagrama de bloques para la metodología de simulación y optimización de la CCP térmica.....	74
Figura 4.4. La importancia relativa de las variables de entrada en el valor de eficiencia térmica del CCP.....	78
Figura 4.5. Comparación estadística entre eficiencia térmica simulada y experimental.....	80

NOMENCLATURA

A_a	Área de apertura [m ²]
a_j	La salida de neuronas en la capa oculta
$b1_{(s)}$	Bias de las neuronas en la capa oculta
$b2_{(l)}$	Bias de las neuronas en la capa de salida.
C	Relación de concentración ($C = A_a/A_r$) [-]
C_p	Calor específico a presión constante [J/kg K]
D_{ext}	Diámetro externo del receptor [cm]
D_i	Diámetro interno del receptor [cm]
F	Función de activación
f	Distancia focal [m]
F_w	Flujo volumétrico [l/min]
G_b	Radiación solar [W/m ²]
I_j	Importancia de la variable de entrada
$IW_{(s,k)}$ or W_{km}^{ih}	Pesos de la matriz en la capa de entrada oculta
$LW_{(l,s)}$ or W_{mn}^{ho}	Pesos de la matriz en la capa oculta de salida
L	Longitud [m]
\dot{m}	Flujo másico ($\dot{m} = \rho F_w$) [kg/s]
N_h	Número de neuronas en la entrada y la capa oculta
N_i	Número de neuronas en la capa de salida
P_{in}	El valor real de la variable antes de la normalización
$p_{i,N}$	Variable normalizada
\dot{Q}_u	Calor útil [W]
\dot{Q}_c	Calor concentrado ($A_a G_b$) [W]
R^2	Coefficiente de determinación
R	Coefficiente de correlación
T	Temperatura [°C]
V_v	Velocidad del viento [m/s]

Y_k	La salida de neuronas en la capa de salida.
Y_{max}, Y_{min}	Máximo y mínimo de las variables después de la normalización
k, m, n	Neuronas de entrada, capa oculta y de salida
o	Neurona de salida

LETRAS GRIEGAS

φ_r	Ángulo de borde [°]
η_t	Eficiencia térmica

SUBÍNDICES

<i>amb</i>	Ambiente
<i>exp</i>	Experimental
<i>h</i>	Neuronas de la capa oculta
<i>i</i>	Neuronas de entrada
<i>in</i>	Entrada
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>out</i>	Salida
<i>r</i>	Receptor
<i>sim</i>	Simulado
<i>v</i>	Viento
<i>w</i>	Agua
<i>x</i>	Valor

ABREVIATURAS

<i>ANN</i>	Red neuronal artificial
<i>ANNi</i>	Red neuronal artificial inversa
<i>ANNim</i>	Red neuronal artificial inversa multivariable
<i>BPNN</i>	Retropropagación Neural Network
<i>GA</i>	Algoritmo genético
<i>LM</i>	Método de entrenamiento Levenberg-Marquardt
<i>Logsig</i>	La función de transferencia sigmoidea logarítmica
<i>MAPE</i>	Error porcentual absoluto medio
<i>PSO</i>	Optimización de Enjambre de partículas
<i>CCP</i>	Colector solar de canal parabólico
<i>PURELIN</i>	Función de transferencia lineal
<i>RMSE</i>	Error cuadrático medio
<i>Tansig</i>	La función de transferencia sigmoidea tangente

CAPÍTULO 1. Antecedentes

1. Introducción

Hoy en día, la energía renovable se considera la mejor solución para minimizar el consumo de combustibles fósiles, contrarrestar el calentamiento global y vivir en un entorno más sostenible. Su utilización en todo el mundo ascendió a 2351 GW, equivalente a un tercio del suministro total de energía. De acuerdo con los datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables, la expansión de la capacidad renovable sigue siendo impulsada principalmente por nuevas instalaciones de energía solar y eólica. Particularmente, en 2018, la energía solar aumentó un 24% (171 GW), respecto al año anterior [1], que demuestran la alta aceptación de su uso en diferentes aplicaciones [2].

Una forma fundamental de aplicar la energía solar térmica desde un punto de vista tecnológico, comercial y sostenible ha sido el colector solar de canal parabólico (CCP). Este sistema está compuesto básicamente con una lámina reflectora de forma de canal lo cual refleja la radiación solar directa sobre un tubo absorbedor ubicado en la línea focal de la parábola. La función principal del CCP es transformar la cantidad de calor proviene de la radiación del solar en energía térmica en forma del calentamiento del fluido del trabajo que circula por dentro del tubo absorbedor, para posteriormente ser utilizado o almacenado [3].

En general, en el período de verano, para un aprovechamiento óptimo de la radiación solar incidente, el CCP debe ser colocado en la dirección Norte-Sur y seguir el sol en la dirección Este-Oeste. Por otro lado, en el periodo de invierno, se debe colocar en la dirección Este-Oeste y seguir el sol en la dirección Norte-Sur [4]. Adicionalmente, se ha demostrado que la ganancia neta anual de calor en áreas ricas en sol es casi cuatro veces mayor que en áreas sin sol para el mismo sistema de seguimiento solar [5]. Además de eso, la energía solar recogida en la superficie móvil del CCP utilizando el sistema de seguimiento solar es aproximadamente 46.46% más alta que en la superficie fija [6].

Por otro lado, se debe considerar que el error de seguimiento debe ser menor a 4 mrad [7] porque a medida que aumenta el ancho del espejo, el ángulo de incidencia, el error óptico y el error de seguimiento, la eficiencia óptica del CCP disminuyen [8], y, por lo tanto, la

eficiencia térmica del CCP disminuye. El CCP se considera la tecnología más madura de todos los sistemas de energía solar concentrada (CSP) que comprende el 90% del grupo total de capacidad instalada [9].

En comparación con otros colectores solares, como las placas planas convencionales, el CCP puede lograr una mayor eficiencia termodinámica en una superficie más pequeña, lo que le permite ser más rentable. Además, los comunes CCPs se caracterizan con la utilización de estructuras simples que requieren menos material, tienen una concentración que varía entre 15 y 45 y sus temperaturas de funcionamiento oscilan entre 60 y 400 °C [10–12]. Los CCPs tienen una amplia gama de aplicación como: procesos industriales de calentamiento solar [13–15], uso doméstico, química solar [16], desalinización solar [17], refrigeración solar [18], pasteurización de agua [19], cocinas solares [20], absorción bomba de calor [21], generación de energía [22–24], fábrica de helados [25], entre otros. Por lo tanto, se están convirtiendo en una opción prometedora lo cual puede usarse como fuente de energía limpia y viable para reemplazar a los combustibles fósiles [26].

Sin embargo, uno de los problemas del sistema de CCP es la optimización de sus múltiples variables de entrada manipulables en tiempo real para mejorar su eficiencia. De acuerdo con Rabl y colaboradores [27], las condiciones de operación, propiedades de los materiales, tipo de receptor, geometría del concentrador, entre otras, son variables esenciales que influyen en el desempeño del CCP. Varios estudios se han centrado en el uso de modelos numéricos y herramientas de simulación como las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) para determinar el comportamiento termodinámico de los sistemas CCPs [28]. Debido de que los estudios experimentales son más costosos y requieren un tiempo significativo del trabajo en el laboratorio. Por lo tanto, la simplicidad, la alta velocidad y la capacidad de resolver relaciones complejas y no lineales entre variables son ventajas atractivas que hacen de ANN una solución potencial para el análisis de datos complejos [29]. Recientemente, la ANN se ha utilizado ampliamente para la predicción del rendimiento de sistemas de energía renovable, como plantas de energía solar térmica de canal parabólico [30], colectores solares [31], sistemas de refrigeración [32], bombas de calor asistidas por energía solar, aire solar, calentadores de agua, entre otros [33].

Uno de los trabajos reportados que demostró la efectividad de ANN en sistemas de colectores solares fue desarrollado por Kalogirou y colaboradores [34]. Presentaron una arquitectura ANN compuesta por 8 neuronas en la capa de entrada, 8 neuronas en la capa oculta y 4 neuronas en la capa de salida (8-8-4) para el análisis del rendimiento del generador de vapor solar con un colector parabólico. Sus resultados mostraron una desviación máxima de 3.9% y un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.999. Con estos resultados, los autores concluyeron que el uso de ANN podría optimizar el rendimiento de dicho sistema sin estudiar la respuesta al variar sistemáticamente los parámetros controlados de forma experimental.

Kalogirou y colaboradores [35] desarrollaron un modelo ANN con arquitectura 7-24-2 para predecir el rendimiento térmico del sistema de calentamiento de agua solar con termosifón. Las variables consideradas como entrada fueron el coeficiente de pérdida de calor del tanque de almacenamiento, el tipo de operación (abierta o cerrada), el volumen de almacenamiento, la radiación solar diaria, la radiación difusa diaria, la temperatura del aire ambiente y la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento al comienzo del día. La salida de la red fue la energía útil extraída del sistema y el aumento de la temperatura del agua. El valor de R^2 obtenido para el conjunto de datos de entrenamiento fue igual a 0.9914 y 0.9808 para los dos parámetros de salida, respectivamente, mostrando la aceptabilidad y precisión del modelo.

En el mismo año, Kalogirou y colaboradores [36] desarrollaron una ANN para predecir la energía útil extraída y calcular el aumento de temperatura en el agua almacenada por los sistemas solares de calentamiento de agua domésticos. La arquitectura ANN fue 8-18-2, alcanzando un coeficiente de determinación de 0.9722 y 0.9751 para los dos parámetros de salida, respectivamente. Cetiner y colaboradores [37] presentaron un modelo ANN con arquitectura 4-7-3 para predecir el rendimiento de un colector cilindro-parabólico solar. Se utilizó el algoritmo de aprendizaje Levenberg-Marquardt (LM) para el entrenamiento del modelo ANN, y los resultados obtenidos tuvieron menos errores y un valor R^2 elevado. Benli [38] desarrolló una red de retroalimentación ANN basada en el algoritmo de retropropagación para predecir el rendimiento térmico de los colectores solares de aire. Utilizó el algoritmo LM en el diseño de su red y concluyó que ANN podría predecir el

rendimiento térmico de los colectores solares de aire como un método preciso para este sistema.

Por otro lado, otros estudios se enfocaron en mejorar el desempeño del CCP basados en mejorar su eficiencia óptica utilizando el Método Monte Carlo (MCRT) y el Método de Volumen Finito (FVM). Liang y colaboradores [39] estudió un método de simulación óptica acoplado MCRT y FVM para CCP. Concluyeron que, al calcular el proceso de reflexión, transmisión y absorción, el método de intercambio de energía de fotones (CPEM) era más eficiente que el MCRT. Además, encontraron que la eficiencia óptica cambia lentamente con el aumento de la profundidad de la cavidad. Cheng y colaboradores [40] estudiaron el efecto de los parámetros geométricos usando FVM combinado con el MCRT. Demostraron que la magnitud relativa de la energía solar absorbida aumenta al aumentar el ancho de apertura o la relación de concentración geométrica. Debido a la distribución del flujo de calor, la reducción de las pérdidas de calor y la debilidad del efecto de sombra del receptor, la temperatura del fluido de transferencia de calor (HTF por sus siglas en inglés) aumenta [41].

Además de predecir el rendimiento, es necesario realizar una estrategia de optimización para conocer las condiciones óptimas de funcionamiento a partir de la respuesta deseada en los sistemas de energía renovable. Entre los beneficios de encontrar valores óptimos está el control de las variables, la economía de energía, la minimización del costo de operación y la mejora de la eficiencia [42]. El enfoque de modelos de optimización comienza con el análisis de las variables utilizadas en las ecuaciones teóricas. Posteriormente, se aplican funciones multi-objetivo y frentes de Pareto para encontrar variables óptimas [43]. Un enfoque de optimización diferente es a través de la red neuronal artificial inversa (ANNi), que se destaca como una estrategia de optimización basada en la aplicación de inteligencia artificial. Entre sus principales características se encuentran: simular utilizando datos experimentales y optimizar de forma inmediata a través de una única función objetiva.

El modelo ANNi se aplicó para mejorar la eficiencia térmica de los colectores, como lo demostraron May y colaboradores [44]. Desarrollaron un modelo ANNi para estimar y optimizar la eficiencia térmica a partir de una variable de entrada óptima encontrada (en este caso, el flujo de agua). La arquitectura ANN presentada fue 7-3-1 y el coeficiente de determinación fue 0.99965. Los resultados indicaron que ANNi era una herramienta

adecuada para optimizar el CCP obteniendo datos de flujo de agua de acuerdo con datos registrados experimentalmente, que exhibían tasas de error más bajas del 2.0%. Además, el tiempo medio de cálculo para calcular el caudal de agua fue de 1.5 s, tiempo adecuado para implementar el proceso de optimización online. Con los resultados, se demuestra que el modelo ANNi se puede utilizar como una estrategia de optimización para incrementar el desempeño de los sistemas de energía renovable desde una condición óptima de operación. Sin embargo, es fundamental remarcar que su modelo puede mejorarse proponiendo una función multivariable y acoplando algoritmos de optimización avanzados para optimizar más de una sola variable de entrada. Por lo tanto, en este sistema de CCP, se deben optimizar más variables simultáneamente, como la temperatura de entrada del agua, el flujo de agua y el ángulo del borde. Los algoritmos metaheurísticos como los algoritmos genéticos (GA) y la optimización del enjambre de partículas (PSO) son opciones excelentes para resolver funciones multivariables. Un ejemplo de su precisión y rapidez para resolver problemas de optimización aplicados en colectores solares presentado por Jamali y colaboradores [45]. Los autores realizaron un modelo ANN basado en el algoritmo de optimización PSO-GA para predecir el rendimiento del sistema de calefacción solar del espacio. El algoritmo PSO-GA propuesto se utilizó para identificar una relación no lineal complicada entre los parámetros de entrada y salida del sistema de calefacción solar de espacios equipado con un CCP y para obtener el modelo de estimación ANN optimizado. Sus resultados han demostrado la confiabilidad de PSO-GA-ANN con mayores R^2 y $RMSE$.

De acuerdo a la literatura, muchos de los investigadores se han centrado en el uso de ANN para obtener la eficiencia térmica de CCP. Sin embargo, muy pocos autores han estudiado la optimización multivariable de las condiciones operativas para incrementar la efectividad del CCP. En consecuencia, el objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo de una red neuronal artificial inversa multivariable (ANNim) y la aplicación de algoritmos metaheurísticos (GA y PSO) para optimizar múltiples variables (parámetros de funcionamiento y diseño) en el colector cilindro-parabólico solar.

El presente trabajo se estructura de la siguiente forma: El estado del arte de las diferentes formas para el mejoramiento del rendimiento térmico del CCP a lo largo de las cuatro décadas fueron presentados en el **Capítulo 2** así como sus aplicaciones. Los modelos de simulación y optimización adoptados fueron presentados en el **Capítulo 3**. Los resultados del desarrollo

y validación experimental del modelo computacional de simulación y optimización para el CCP fueron descritos en el **Capítulo 4**. Finalmente, las conclusiones generales de los trabajos desarrollados, así como las lagunas de investigación para futuros trabajos en el mejoramiento de rendimiento térmico del CCP fueron presentadas en el **Capítulo 5**.

1.1. Preguntas de Investigación

- ¿El uso del tubo helicoidal en el sistema de CCP puede mejorar la eficiencia térmica de este tipo de sistema?
- ¿Un CCP puede generar la cantidad de necesaria para sustituir las fuentes de energía convencionales en el sector industrial que requieren energía de temperatura media?
- ¿Cómo afectan los factores ambientales, de operación y de diseño del sistema en la eficiencia térmica del CCP implementando diferentes modelos como : Redes neuronales artificiales (ANN), red neuronal artificial inversa (ANNi), algoritmos genéticos (GA), optimización por enjambre de partículas (PSO), método de volumen finito (FVM) y SolidWorks, entre otros?
- ¿Cuál modelo matemático el más representativo de los resultados experimentales?

1.2. Justificación

El desarrollo de fuentes de energía alternativas es una de las técnicas que han ido creciendo día a día debido a la necesidad de energía que ha crecido con el aumento de la población mundial y el crecimiento de la demanda energética en las sociedades modernas. Por lo tanto, para cumplir con el límite de calentamiento global por debajo de 2°C según el acuerdo de París [46] y continuar los esfuerzos para limitarlo a 1.5°C , la sociedad debe reemplazar los métodos convencionales de generación de energía con recursos de energía renovable (eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareas, solar, biomasa y biocombustible) [47] con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el aprovechamiento de la energía solar térmica y en específico la que proviene de los CCPs es una de las fuentes de energía limpia y sostenible caracterizada por menores emisiones de CO_2 [48], que puede enfrentar una serie de problemas como el calentamiento global, la quema de combustibles fósiles, el aumento de la tasa de electricidad, entre otros.

Particularmente, en el laboratorio de ingeniería de Procesos Térmicos y Mecánicos del Centro de investigación en ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) en colaboración con el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos se están desarrollando planes académicos enfocados a la sustentabilidad energética. Uno de los resultados es el presente trabajo de investigación, específicamente sobre los colectores solares de canal parabólico (CCP).

Con el objetivo de desarrollar y mejorar la eficiencia térmica de las nuevas alternativas de producción de energía renovables, este proyecto va orientado en el mejoramiento del rendimiento térmico del CCP en base de los diferentes enfoques para posteriormente ampliar su gama de aplicación.

1.3. Objetivo General

Aplicar el modelo de simulación de redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) y su inversa (ANNi) combinado con los algoritmos de optimización para modelar y optimizar el sistema de CCP, así como proponer una nueva configuración del tubo absorbedor con el fin de mejorar su rendimiento térmico.

1.4. Objetivos específicos

Para llevar a buen término el objetivo general mencionado anteriormente, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar un modelo ANN y ANNim para el sistema de los colectores solares de canal parabólico para el mejoramiento de su eficiencia térmica.
- Validar el modelo de simulación propuesto contra los resultados experimentales obtenidos del CCP.
- Analizar la transferencia de calor en el CCP para calentar agua, utilizando un tubo de cobre liso y helicoidal como receptor para diferentes condiciones de funcionamiento.

- Evaluar el rendimiento del CCP con diferentes configuraciones del tubo receptor y comparar los resultados experimentales con el modelo antes desarrollado.
- Simular y optimizar las multivariantes de entrada para predecir y encontrar las condiciones óptimas de diseño y funcionamiento de CCP para mejorar su rendimiento térmico.

CAPÍTULO 2. Estado del arte de las diferentes formas para mejorar el rendimiento térmico del CCP y sus aplicaciones

Este capítulo presenta los diferentes estudios experimentales y numéricos estudiados durante las últimas cuatro décadas para el mejoramiento del rendimiento térmico del CCP, incluyendo las tendencias recientes como el uso de los nanofluidos, las nuevas configuraciones del tubo absorbedor y los modelos numéricos de simulación y optimización, entre otros aspectos. Así como, se presenta las diferentes aplicaciones para ayudar a los investigadores, ingenieros y fabricantes a estudiar y desarrollar la tecnología del CCP para hacerla más eficiente, aplicable y rentable.

2.1. Estudios experimentales para mejorar el rendimiento de CCP

El mejor rendimiento de CCP se refiere al mejor manejo y / u operación para obtener el mayor calentamiento del fluido de trabajo (HTF por sus siglas en inglés). El rendimiento térmico global del CCP depende principalmente de la calidad termodinámica del absorbente, los efectos geométricos [49–53], la alineación del tubo receptor, el reflector [54], las propiedades del material del receptor, el recubrimiento selectivo del absorbente [55], el factor de intercepción, el tipo de receptor, condiciones de funcionamiento y pruebas experimentales (ISO 9806-1 [56,57], y norma ANSI / ASHRAE 93-2010 [58,59]). Asimismo, depende del ángulo de incidencia modificado [60] y del factor de limpieza. Por lo tanto, para una evaluación correcta del rendimiento del CCP, se debe asegurarse que los tubos receptores estén bien ubicados en su línea focal durante la prueba experimental [61]. Es crucial mencionar que a medida que se minimizan las pérdidas de calor generadas por la convección y la radiación del receptor [62], el sellado vidrio-metal [63], el error óptico [64–66], la geometría, la pendiente y los errores de seguimiento [67], el polvo [68], entre otros, conducen a la mejor mejora en el rendimiento del CCP y, en consecuencia, al mejor aumento de la eficiencia térmica.

Dado que el rendimiento del colector está estrechamente relacionado con su eficiencia, el CCP debe ubicarse muy cerca del sistema de almacenamiento. Igualmente, todos los circuitos de tuberías deberían estar aislados para minimizar la pérdida de calor y mejorar el rendimiento del sistema [69]. Además, la diferencia de temperatura de HTF puede alcanzar su valor máximo de 12 ° C al mediodía y luego decrementa. Por lo tanto, no se recomienda

usar el CCP después de las 2:00 pm debido a la mayor influencia del DNI que afecta la ganancia de energía, la tasa de exergía, el factor de exergía y la eficiencia energética [70], lo que da una gran pérdida de calor.

Además, el rendimiento del CCP se puede mejorar significativamente utilizando el sistema de seguimiento, donde la energía solar recogida en la superficie móvil es un 46.46% mayor que la superficie fija [6]. Igualmente, se utiliza material de recubrimiento de receptor apropiado y recubrimiento reflector avanzado para proteger la hoja reflectora de la corrosión, suciedad y pérdidas por reflexión como recubrimientos reflectores de plata y aluminio que tienen alta reflectividad y recubrimiento de cromo negro que tienen alta absorbancia [71]. Adicionalmente, el uso de pintura negra del colector solar recubierto de níquel aumenta la reflectancia de 0.4 a 0.6 [72].

Del mismo modo, el uso del receptor evacuado (ER) y el receptor no evacuado (NER) pueden influir significativamente en el rendimiento del CCP. En condiciones mínimas de pérdida de calor, la eficiencia óptica máxima de ER y NER es cercana al 72% y 68%, respectivamente. Simultáneamente, la eficiencia térmica máxima de los sistemas CCP-ER y CCP-NER es del 66% y el 64% [73]. La **Figura 2.1.** muestra una representación esquemática de los parámetros esenciales que afectan el rendimiento del CCP.

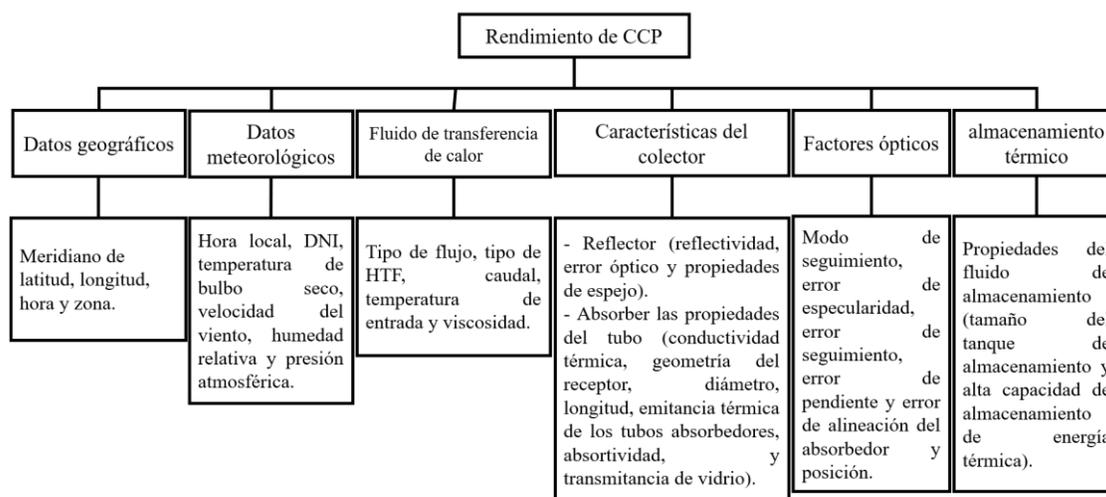


Figura 2.1. Representación esquemática de los parámetros que afectan el rendimiento del CCP

La **Figura 2.2.** muestra las diferentes formas para mejorar la transferencia de calor en el tubo absorbedor y con ello mejorar el rendimiento del CCP. Entre ellos, encontramos la minimización de las pérdidas de calor, colocando turbuladores, utilizando nanofluidos y utilizando recubrimientos selectivos del tubo receptor.

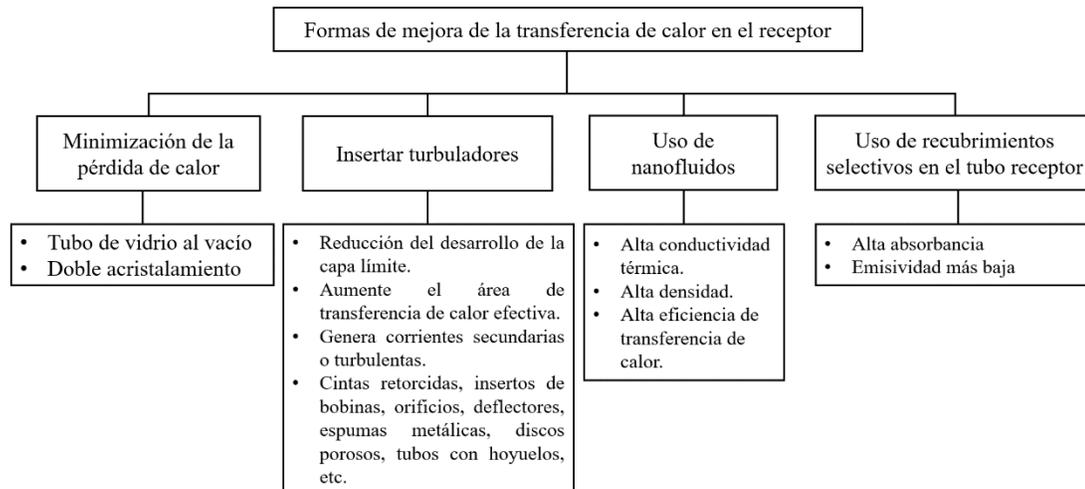


Figura 2.2. Diferentes formas para el mejoramiento de la transferencia de calor en el tubo absorbedor del CCP.

2.1.1. Estudios experimentales de rendimiento del tubo absorbedor

El inserto de flujo más habitual es el receptor de discos porosos, y ha sido examinado [74]. Se ha observado una eficiencia significativa del CCP en comparación con el receptor tubular no blindado (USTR) y el receptor tubular blindado (STR) debido a su mayor transferencia de calor desde la superficie de la pared del receptor al fluido y su pequeño coeficiente de pérdida de calor. Además, se ha investigado el uso de un receptor de cuchilla con bisagras internas [75], y se ha encontrado una mejora importante en la eficiencia media en comparación con los tubos tradicionales. Otros estudiaron el uso del receptor de espuma de cobre metálico [76,77], y encontraron que el uso de espuma de metal proporciona sólidos de alta conductividad térmica y una fuerte capacidad de mezcla de flujo. También proporciona menos disipación de calor al medio ambiente, lo que conduce a una mejora en la absorción solar, el número de Nusselt, el factor de fricción y la eficiencia térmica del CCP. Al mismo tiempo, se necesita energía adicional para bombear HTF a través de CCP. Se ha examinado un nuevo receptor de cavidad [78] y se ha encontrado una mejora significativa en la eficiencia

del colector con la disminución de la emitancia de absorbanca en 0.15 y la emitancia de la cubierta de vidrio en 0.1.

Isravel y colaboradores [79] demostraron que las cintas retorcidas adheridas a los anillos presentan una mayor tasa de transferencia de calor que los tubos vacíos y las cintas retorcidas convencionales, debido al mayor flujo de fluido y factor de fricción, la generación de remolinos y la reducción del diámetro hidráulico. Por lo tanto, es un promotor de turbulencias, lo que aumenta la transferencia de calor por convección. Mientras que tienen mayores pérdidas de presión, la eficiencia general del CCP disminuye. Recientemente, se ha estudiado la combinación de un receptor de espuma metálica y un nanofluido de CuO/agua al 0.1% [80], y se ha encontrado una mejora de 3.82 veces en la eficiencia térmica que el agua pura. La **Tabla 2.1** resume los estudios antes mencionados.

Tabla 2. 1. Revisión de diferentes configuraciones de PTSR estudiadas experimentalmente.

Localización	Ref	Autor /Año	HTF	Configuración del receptor / Material	Hallazgos importantes
USA	[81]	Ramsey et al. / 1976	Agua	Tubo pintado de negro, tubo revestido con una capa selectiva y tubo revestido con una pintura negra no selectiva / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - Las pérdidas por conducción fueron del 29% y el 8% de las pérdidas de calor totales para los absorbentes con recubrimiento selectivo y no con recubrimiento selectivo. - Si la pérdida de conducción no estuviera presente, la eficiencia máxima aumentaría del 22 al 25% para el absorbente con recubrimiento no selectivo y del 50 al 53% para el absorbente con recubrimiento selectivo.
Egipto	[82]	Said et al. / 1996	Agua	Seis tubos verticales /Acero	<ul style="list-style-type: none"> - η_t alcanzó su máximo del 62% para un \dot{m} de 0.033 kg / s. - El η_t de la PTSC aumenta a medida que la η_t de agua aumenta.
China	[63]	Lei et al. / 2012	Agua	Sellos de vidrio a metal /Sellos de vidrio de acero inoxidable-Pyrex	<ul style="list-style-type: none"> - La tasa de fuga de vacío fue de alrededor de 10-11 Pa m³/s para los cuatro grupos de muestras. - Las ganancias de peso por oxidación estuvieron todas en el rango de 0.33-0.82 mg/cm² - Oxidante, el Kovar a una ganancia de peso de 0.3-0.8 mg/cm² aumenta la fuerza de la unión química y mecánica entre el metal y el vidrio.

China	[62]	Zhang et al. / 2013	Agua	Doble acristalamiento de vacío tipo-U/Acero	<ul style="list-style-type: none"> - Las eficiencias térmicas varían de 0.792 y 0.663 para condiciones de calma y viento, respectivamente. - Las pérdidas de calor se incrementaron de 0.183 a 0.255 kW en días tranquilos y ventosos, respectivamente.
India	[74]	Reddy et al. / 2015	Agua	Disco poroso encerrado por un tubo de vidrio de borosilicato /Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia del colector varía del 63.9% al 66.66%. - La constante de tiempo del PTSC varía de 70 s a 260 s. - Las pérdidas de calor varían de 455 W/m² a 1732 W/m².
India	[75]	Kalidasan et al. / 2016	Agua	Cuchillas con bisagras internas / Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> - El η_t promedio utilizando el receptor de palas articuladas internas y el receptor convencional es de 69.33% y 60.82%, respectivamente. - La pendiente y la intersección fueron 70.887 y -0.419, respectivamente, para los tubos absorbedores con palas articuladas.
Iran	[76]	Jamal-Abad et al. / 2017	Agua	Tubo lleno de medio poroso / espuma de cobre	<ul style="list-style-type: none"> - El coeficiente total de pérdida de calor (U_L) se reduce en un 45%.
China	[78]	Liang et al. / 2018	Therminol [®] 55 oil	Receptor de cavidad	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia del colector varía del 34,18% al 48,57%.

India	[79]	Isravel et al. / 2019	Agua	Anillos unidos cintas retorcidas / Aluminio	<p>- Nu aumenta entre un 5% y un 40%, entre un 11% y un 101% y entre un 7% y un 77% en cintas trenzadas convencionales, cintas trenzadas con anillos unidos y cintas trenzadas con anillos modificados.</p> <p>- f_f aumenta entre un 48% y un 58%, entre un 59% y un 72% y entre un 23% y un 31% en cinta trenzada convencional, cinta trenzada con anillos unidos y cinta trenzada con anillos modificados.</p> <p>- El rendimiento térmico aumenta en un 19% y un 24% en anillos unidos a cintas retorcidas y anillos modificados unidos a cintas retorcidas.</p>
Iran	[77]	Valizad et al. / 2020	Agua	Espuma de metal/Cobre	<p>-El uso de poros completos y semiporosos se incrementa el f_f a 126 y 60 veces, respectivamente.</p> <p>- η_t es igual a 60.23, 49.42 y 28.84% para las cajas de espuma de metal completo, semi-metálicas y de espuma de metal libre, respectivamente.</p> <p>- Las diferencias máximas de temperatura para poros completos, semiporosos y porosos libres son 12.2 ° C, 8.8 ° C y 3.3 ° C, respectivamente.</p>
Iran	[80]	Heyhat et al. / 2020	CuO/ Agua	Espuma de metal/Cobre	<p>- f_f se incrementa entre 50 y 80 veces el agua pura mediante el uso de espuma metálica.</p> <p>- η_t de espuma de agua y cobre metal, nanofluido CuO/Agua, y combinación de 0.1 vol% del nanofluido y espuma metálica son 49.42%, 64.56% y 79.29%, respectivamente.</p>

India	[83]	Subraman i et al. / 2020	Al ₂ O ₃ / Agua	Recubrimiento de CNT en el tubo receptor/Cobre	- η_t se mejora en un 8.6% utilizando un 0.05% de Al ₂ O ₃ /Agua y un receptor recubierto de CNT en comparación con el agua pura.
Iran	[84]	Akbarzad eh et al. / 2020	Agua	Tubo absorbente ondulado helicoidalmente / Cobre	- η_t se mejora en un 65.8% para una longitud de paso de P = 3 mm y la altura de rugosidad de e = 1.5 mm del ondulado helicoidal. Mientras que el factor de fricción aumenta 1.84 veces más que el tubo liso.
China	[85]	Zhao et al. / 2020	Aire	Tubo de aleta con pasador interno/[-]	- El tubo con aletas internas tenía una eficiencia energética entre un 10.4 y un 14.5% más alta y una eficiencia exergética entre un 2.55 y un 4.29% más alta que el tubo liso.

De acuerdo con los resultados reportados en la **Tabla 2.1**, se observa que el uso de la combinación de receptor de espuma metálica y nanofluido CuO/Agua es el mejor candidato que logra una mayor eficiencia térmica (79.29%) que el receptor de palas con bisagras internas (69.33%) y disco poroso (66.66%). Además, el uso de un receptor de medios porosos representa una reducción significativa del coeficiente general de pérdida de calor (45%). Pero se recomienda utilizarlo con caudales menores para evitar la caída de presión.

2.1.2. Estudios experimentales de nanofluidos en CCP

En 1995, Choi propuso por primera vez nuevos HTF innovadores mediante la suspensión de nanopartículas metálicas en un fluido base [86]. Estos nuevos fluidos denominados "Nanofluidos" (**Figura 2.3**) pueden considerarse nanocompuestos líquidos que representan altas conductividades térmicas, lo que produce una mejor transferencia de calor que los fluidos convencionales. La conductividad térmica de los nanofluidos juega un papel más importante en el comportamiento de la transferencia de calor [87,88]. Por tanto, su aumento es un parámetro clave para mejorar el rendimiento del CCP [89].

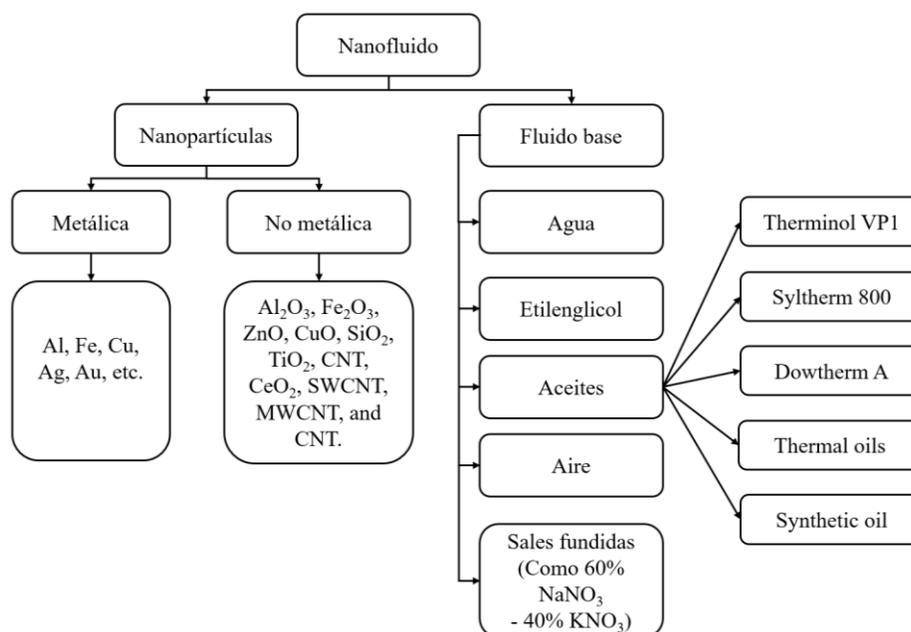


Figura 2.3. Detalle de nanofluido.

En la literatura, hay pocos estudios experimentales en CCP. Chaudhari y colaboradores [90] estudiaron el uso de 0.1% de nanofluidos de Al_2O_3 /Agua y encontraron una mejora del 7% y 32% en la eficiencia térmica y el coeficiente de transferencia de calor, respectivamente. Kasaeian y colaboradores [91] examinó el uso el nanofluido de 0.3 wt % MWCNT/Aceite mineral y encontró una mejora del 7% en la eficiencia térmica que el aceite puro. Potenza y colaboradores [92] propuso nanopulvos de CuO dispersos en el aire junto con un receptor de cuarzo transparente. Ilustraron la deposición de nanopulvos dentro del tubo receptor debido a la humedad. Rios y colaboradores [93] investigó el uso de 1% de Al_2O_3 /Agua y descubrió que con un ángulo de incidencia de 10° , la eficiencia térmica del PTSC mejora hasta un 11% en comparación con el agua; el efecto de ángulo de incidencia más pequeño explica parcialmente la mayor mejora. Subramani y colaboradores [94] estudiaron el uso de 0.2% de TiO_2 /Agua y encontraron una mejora de la eficiencia térmica del 8.66%. Rehan y colaboradores [95] estudiaron el uso de Al_2O_3 /Agua y Fe_2O_3 / Agua. Descubrieron que las eficiencias térmicas máximas logradas con los nanofluidos de Al_2O_3 y Fe_2O_3 eran un 13% y un 11% más altas, respectivamente, en comparación con el agua pura. Subramani y colaboradores [96] estudiaron el uso de Al_2O_3 /DI- H_2O a diversas concentraciones. Descubrieron que el nanofluido puede aumentar la eficiencia térmica desde un 3.48% hasta un 8.54%. Además, afirmaron que la concentración óptima de nanopartículas debe ser inferior al 0.2%. Sekhar y colaboradores [97] examinó la dispersión de CeO_2 , Al_2O_3 y TiO_2 en agua. Encontraron una mejora de la eficiencia térmica del 27%, 25% y 23% cuando se utilizaron 3% en volumen de CeO_2 , Al_2O_3 y TiO_2 , respectivamente, en comparación con agua.

Natividade y colaboradores [98] estudiaron el grafeno multicapa (MLG) disperso en agua. Descubrieron que la eficiencia térmica del colector solar aumentó en un 76% cuando se utilizó 0.00068% en volumen de nanofluido MLG. Gowda y colaboradores [99] investigó el uso de óxido de grafeno reducido (rGO) en agua. Encontraron una ligera mejora en el rendimiento térmico de CCP en comparación con el agua pura. Sreekumar y colaboradores [100] estudiaron la influencia del nanofluido de antimonio estaño/plata (ATO/Ag) en el colector solar cilindro-parabólico de absorción directa (DAPTSC). Descubrieron que la máxima eficiencia térmica alcanzada fue del 63.5%.

Fathabadi [101] estudió el uso de 1.5% de CuO/Agua y se encontró que la eficiencia térmica aumentó en un 11% con respecto al agua. Además, se disminuyó incluso por debajo del agua pura en más de un 1.5%. La **Tabla 2.2** incluye los estudios mencionados anteriormente. Finalmente, Farhana y colaboradores [102]. Concluyeron que las nanopartículas como TiO₂, ZnO, SiO₂, Fe₂O₃, Cu, Al₂O₃ y MWCNT en el fluido base proporcionan una mejora interesante en el rendimiento de CCP debido al aumento de la conductividad térmica de los nanofluidos [103]. Mientras tanto, la caída de presión aumentó [104].

Tabla 2.2. Revisión de diferentes nanofluidos de PTSC estudiados experimentalmente.

Localización	Ref	Autor / Año	NPs / fluido base	Configuración del receptor / Material	Hallazgos importantes
India	[90]	Chaudhari et al. / 2015	Al ₂ O ₃ /Agua	Tubo doble /[-]	<ul style="list-style-type: none"> - η_t aumenta aproximadamente un 7% para $\varphi = 0,1\%$. - El coeficiente de transferencia de calor se mejora en un 32%.
Iran	[91]	Kasaeian et al. / 2015	MWCNT/ Mineral oil	Tubo de vacío / Cobre y acero	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia global se mejora en aproximadamente un 4–5% y un 6–7%, respectivamente, cuando se usa 0.2% y 0.3% de MWCNT/Nanofluido de aceite mineral en lugar de aceite puro. - El tubo de cobre recubierto de cromo negro tiene la mayor conductividad térmica y capacidad de absorción (0.98), lo que proporciona una eficiencia general entre un 20% y un 23% mayor. - La eficiencia media de un tubo absorbente de vacío es un 11% superior a la del tubo absorbente desnudo.
Iran	[105]	Kasaeian et al. /2017	MWCNT/EG Nanosilica/EG	Tubo absorbente de vidrio / vidrio de borosilicato	<ul style="list-style-type: none"> - η_t se mejora en 72.8% y 63.6% utilizando 0.3% MWCNT/EG, y 0.3% de nanosílice/EG, respectivamente.
Italia	[92]	Potenza et al. /2017	CuO /Air	Receptor de cuarzo transparente /Acero	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia media es de alrededor del 65%.
Italia	[106]	Bortolato et al. / 2017	SWCHN/ DI-H ₂ O	Absorbedor de geometría plana /Acero y vidrio	<ul style="list-style-type: none"> - Después de 3 h de exposición, la concentración de SWCNHs en agua se redujo a la mitad y, a las 8 h, fue de 0,004 g/L.

México	[93]	Rios et al. /2018	Al ₂ O ₃ /Agua	Tubo de vacío / acero	<ul style="list-style-type: none"> - η_t alcanzó el 57.7% (para $\varphi = 1\%$ y $\theta = 1^\circ$), mientras que el agua pura fue del 46.5%. - η_t alcanzó 52.4% (para $\varphi = 3\%$ y θ entre 20° y 30°), mientras que el agua pura fue 40.8%.
India	[94]	Subramani et al. /2018	TiO ₂ /Agua	Tubo de vacío / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia total máxima es del 57%, que es un 9% más que el colector a base de agua. - El coeficiente de transferencia de calor por convección se mejora hasta en un 22.76%.
Pakistán	[95]	Rehan et al. /2018	Al ₂ O ₃ & Fe ₂ O ₃ /Agua	Tubo de vacío / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - η_t se mejora en un 13% y un 11% para Al₂O₃/Agua y Fe₂O₃/Agua en comparación con el agua pura, respectivamente, y para una fracción de volumen igual a 0.06% y 0.08%.
India	[96]	Subramani et al. / 2018	Al ₂ O ₃ /DI-H ₂ O	Tubo de vacío / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - η_t se mejora hasta un 56% al 0.5% de concentración volumétrica y un caudal de 0.05 kg/s, que es aproximadamente un 8.54% más que el proporcionado por el agua destilada.
India	[97]	Sekhar et al. / 2018	CeO ₂ , Al ₂ O ₃ , &TiO ₂ /Agua	Tubo liso / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - η_t se mejora en un 27%, 25% y 23% usando CeO₂/Agua, Al₂O₃/Agua y TiO₂/Agua, respectivamente.
Brasil	[98]	Natividade et al. /2019	Multilayer graphene/Agua	Dos tubos de vidrio concéntricos con un tubo en forma de U en el interior / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - El nanofluido MLG en $\varphi = 0.00045\%$ y $\varphi = 0.00068\%$ aumentó el η_t del colector solar en un 31% y 76%, respectivamente, en comparación con el fluido base. - La η_t media del colector solar con y sin concentrador parabólico fue de 19.1% y 4.8%, respectivamente.
India	[99]	Gowda et al. /2019	rGO/DI-H ₂ O	Receptor evacuado y no evacuado/[-]	<ul style="list-style-type: none"> - Los efectos de rGO/Agua de f_f disminuyeron razonablemente en comparación con SiO₂/Agua y TiO₂/Agua.

India	[100]	Sreekumar et al. /2020	ATO/Ag-DI-H ₂ O	Tubo de vacío / [-]	<p>- rGO/Agua tiene un aumento significativo en el Nu promedio en comparación con TiO₂/Agua y SiO₂/Agua.</p> <p>- Las eficiencias térmicas y exergéticas más altas obtenidas para el nanofluido híbrido ATO/Ag en DAPTSC fueron 63.5% y 5.6%, respectivamente.</p> <p>- DAPTSC produjo una eficiencia óptica del 75% al utilizar nanofluidos ATO/Ag.</p>
Grecia	[101]	Fathabadi /2020	CuO/DI-H ₂ O	Tubo de vacío / acero inoxidable	<p>- η_t se mejora hasta en un 77.2% a un $\phi = 1.5\%$, que es aproximadamente un 11% más que el que aporta el agua destilada.</p>
India	[107]	Bernard et al. /2020	CNT fluid & Agua	Tubo liso/Cobre	<p>- La energía térmica ganada por el fluido CNT se incrementa en un 7.2% y un 7.3% en comparación con el agua para el \dot{m} de 0.0207 kg/s y 0.0138 kg/s, respectivamente.</p>

Los resultados anteriores indican que todos los nanofluidos mejoraron significativamente el coeficiente de transferencia de calor y el rendimiento del CCP. Los fluidos bases examinados fueron agua, aire o aceite térmico. Los estudios fueron todos experimentales, lo que da gran importancia a los resultados obtenidos. Además, la mejora de la eficiencia térmica fue de aproximadamente un 13% como máximo para $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Agua}$, seguida de un 11% para $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Agua}$ y $\text{CuO}/\text{DI-H}_2\text{O}$, y un 9% para TiO_2/Agua . Esta mejora en la eficiencia térmica se explica parcialmente por muchos factores como la concentración, la forma de las nanopartículas, el tipo de nanopartículas, la conductividad térmica de los nanofluidos, la configuración del tubo receptor y el tipo de material del receptor.

2.2. Estudios numéricos para mejorar el rendimiento CCP

Recientemente, muchos investigadores prefieren utilizar herramientas informáticas para realizar estudios con un esfuerzo mínimo y menor costo porque los estudios experimentales son más costosos y requieren mucho tiempo de trabajo en el laboratorio. Gracias a estudios numéricos [108], se ha encontrado que la eficiencia óptica del CCP disminuye a medida que aumentan el ancho del espejo, el ángulo de incidencia, el error óptico y el error de seguimiento [8,109]. En otro estudio, se ha ilustrado que el error de seguimiento debe ser inferior a 4 mrad [7]. Además, se ha demostrado que la ganancia neta anual de calor en áreas ricas en sol es casi cuatro veces mayor que en áreas sin sol para el mismo sistema de seguimiento solar [5]. Además, encontró que la eficiencia óptica y la eficiencia térmica se pueden mejorar en un 5.2% y un 4.9%, respectivamente, utilizando un reflector secundario (SR) porque la uniformidad del flujo de radiación solar en el tubo absorbente se ha mejorado en 2 [110]. Mientras que el rendimiento óptico se puede reducir en un 19.83% cuando la velocidad del viento aumenta a 14 m/s debido al mayor desplazamiento [111].

2.2.1. Estudios numéricos de rendimiento del tubo absorbedor.

Esta sección presenta una revisión exhaustiva de diferentes configuraciones del tubo absorbedor estudiadas numéricamente para mejorar el rendimiento de CCP. En primer lugar, Ravi Kumar y colaboradores [112] mostró que el receptor de discos porosos conduce a un aumento en el área interna y la tasa de transferencia de calor, lo que mejora su rendimiento. Además, la orientación del disco poroso en la mitad superior del receptor

proporciona los mejores resultados de tasa de transferencia de calor en comparación con otras orientaciones. Además, a medida que aumenta la altura del disco poroso (H) y disminuye la distancia longitudinal (w) entre los dos discos porosos sucesivos, aumentan el número de Nusselt y el coeficiente de arrastre.

Chang y colaboradores [113] estudiaron el tubo absorbedor con cintas retorcidas y descubrió que el número de Nusselt aumenta 2.9 veces más que el tubo liso, pero al mismo tiempo, el factor de fricción y el requisito de consumo de bombeo también aumentaron. Huang y colaboradores [114] obtuvieron que el receptor con hoyuelos logra la mejor mejora del coeficiente de transferencia de calor en comparación con el receptor con protuberancias y aletas helicoidales. Además, Huang y colaboradores [115] mostró que el tubo con hoyuelos profundos logra un rendimiento más alto que el poco profundo. Simultáneamente, un aumento adicional en la profundidad de los hoyuelos conduce a una disminución en el rendimiento general.

Zhu y colaboradores [116] examinó el tubo absorbedor con cinta ondulada y descubrió que el número de Nusselt aumenta entre 2.74 y 3.54 veces; esta mejora se explica por pares de vórtices tangenciales generados en los flancos de la cinta ondulada. Estos vórtices rompen la capa límite térmica e intensifican la advección del fluido, lo que mejora el rendimiento de transferencia de calor del receptor. Además, es más eficaz y aplicable para un CCP que funciona con un flujo de fluido de transferencia de calor relativamente más bajo [117].

Amina y colaboradores [118] concluyeron que el receptor con aletas longitudinalmente tiene una influencia significativa en la transferencia de calor que los nanofluidos. Particularmente, las aletas triangulares tienen un rendimiento térmico ligeramente mayor que las aletas rectangulares. Además, el uso de nanopartículas metálicas mejora la transferencia de calor mucho más que otros tipos. Benabderrahmane y colaboradores [119] encontró que el uso de insertos de deflectores y nanofluidos aumenta el número de Nusselt en 3.5 veces; esta mejora se explica por el aumento del grosor del deflector y la disminución de la distancia entre los deflectores.

Bellos y colaboradores [120] obtuvieron que la combinación óptima de tres aletas en la parte inferior del receptor mostró que la eficiencia térmica alcanza su valor máximo de 68.59%. Igualmente, un mayor número de aletas conduce a una mayor eficiencia térmica.

Además, las aletas ubicadas en las direcciones vertical y horizontal conducen a mayores pérdidas de presión. Liu y colaboradores [121] estudió el uso de un tubo absorbente acanalado. Descubrieron que la disposición simétrica en sentido antihorario de las costillas inclinadas dobles (SADIR) y la disposición simétrica en el sentido de las agujas del reloj de las costillas inclinadas simples (SCSIR) logran la mejor mejora en número de Nusselt 1.58–3.21 y 1.41–2.98 veces que la del CCP con un tubo recto, respectivamente. Zou y colaboradores [122] investigó el receptor cilindro-parabólico acanalado en espiral unilateral (USR-PTR). Descubrieron que el tubo estudiado puede alterar el fluido generando un flujo rotacional secundario y los vórtices longitudinales locales. Por lo tanto, la diferencia de temperatura circunferencial de USR-PTR se puede reducir hasta en un 25% que el tubo liso.

Kursun [123] estudió aletas longitudinales internas con superficies laterales sinusoidales. Descubrieron que las superficies laterales sinusoidales proporcionan la mayor mejora en el número de Nusselt, alcanzando el 78%, mientras que la aleta plana era del 25%. Li y colaboradores [124] encontraron que el receptor de cavidad lineal tiene un buen rendimiento térmico en rangos de alta temperatura que el tubo colector de vacío. Además, el ancho de apertura del receptor tiene un impacto significativo en el rendimiento térmico.

Recientemente, Norouzi y colaboradores [125] estudiaron la rotación absorbedor de tubo y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Therminol}$. Descubrieron que la eficiencia térmica del CCP mejoró en un 15%. También encontraron que el tubo de aluminio proporciona una temperatura de salida un 5% más alta que ese acero. Además, Bellos y colaboradores [126] descubrió que la combinación de aletas longitudinales internas y protector reflector conduce a la mejora del rendimiento térmico del CCP. La mejora térmica con aletas internas, escuadras y escudos con aletas es de 0.90%, 1.66% y 2.41%, respectivamente. Además, las mejoras en la eficiencia térmica y exergética son más intensas a velocidades de flujo de volumen más bajas y una temperatura de entrada más alta. Chakraborty y colaboradores [127] estudió el tubo absorbente helicoidal y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Agua}$. Informaron una mejora de aproximadamente 1-10% y de 4,54% a 36% en la eficiencia térmica y el número de Nusselt, respectivamente, cuando se utilizó una fracción de volumen de 0,09 de nanofluido en comparación con el agua. La **Tabla 2.3** incluye los estudios mencionados anteriormente.

Tabla 2.3. Revisión de diferentes configuraciones de tubo absorbedor estudiadas numéricamente.

Software computacional	Localización	Ref	Autor / Año	HTF	Configuración del receptor / Material	Hallazgos importantes
Modelo numérico	USA	[128]	Chang et al. / 1986	Fluido negro	Tubería de vidrio simple, tuberías de vidrio de anillo concéntrico y tubería de cobre pintada de negro	- El colector solar de fluido negro fue consistentemente mejor que el tubo de cobre pintado de negro en un valor promedio del 5% de rendimiento absoluto, o 14% en base a la energía total absorbida cuando se usa una concentración de agente ennegrecedor de 15 ml/ gal.
Modelo matemático (FORTRAN [®] 77)	USA	[129]	Eric et al. / 1989	Agua	Absorbedor poroso /Acero inoxidable	- El receptor de absorbedor poroso propuesto mostró una eficiencia térmica de PTSC notablemente mejor que los diseños de receptor de foco de línea convencional.
CFD	India	[112]	Ravi Kumar et al. / 2009	Therminol [®] VP-1	Disco poroso / Acero inoxidable	- La transferencia de calor se mejora aproximadamente en un 64,3% - $31\,845 \leq Re \leq 254,765$ y $Pr = 8.11, Nu = 192.62$ - El receptor de disco poroso de la mitad superior con $H = 0.5d_i$, $w = d_i$ en $\theta = 30^\circ$ proporciona el mejor rendimiento.
ANSYS Fluent [®]	China	[113]	Chang et al. / 2015	Sal fundida	Cintas retorcidas/ Alloy 625	- Nu aumenta aproximadamente 2.9 veces más que el tubo liso.

CFD	China	[114]	Huang et al. / 2015	Therminol® VP-1	Tubo con hoyuelos, protuberancias y aletas helicoidales /Acero inoxidable.	<ul style="list-style-type: none"> - El coeficiente de transferencia de calor se mejora en un 60%, 120% y 30% para el tubo con hoyuelos, protuberancias y aletas helicoidales, respectivamente. - La caída de presión aumenta en aproximadamente un 70%, 500% y 50% para el tubo con hoyuelos, protuberancias y aletas helicoidales, respectivamente.
CFD	China	[116]	Zhu et al. / 2016	Agua	Cinta ondulada / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - Nu aumenta de 2.74 a 3.54 veces. - f_f aumenta entre 4.22 y 7.32 veces.
ANSYS Fluent®	Algeria	[118]	Benabde rrahman e et al. / 2016	Al ₂ O ₃ , Cu, Sic & C/Dowtherm A	Inserto de aletas longitudinales / Acero	<ul style="list-style-type: none"> - Nu para absorbedor con inserciones de aletas varió de 1.3 a 1.8 veces en comparación con la del tubo liso. - f_f para el absorbedor con aletas varió de 1.6 a 1.85 en comparación con el tubo recto.
CFD	Algeria	[119]	Benabde rrahman e et al. / 2016	Fullerene C60/ Therminol® VP-1	Inserciones de deflectores / Acero	<ul style="list-style-type: none"> - Nu se incrementa aproximadamente 3.5 veces usando nanofluidos y deflectores y hasta 3 veces usando solo deflectores.
CFD	China	[117]	Zhu et al. / 2017	Syltherm 800	Cinta ondulada	<ul style="list-style-type: none"> - Nu se mejora en un 261-310%. - La pérdida de calor se reduce entre un 17.5 y un 33.1%. - f_f aumenta en un 382-405%. - La tasa de generación de entropía se reduce en aproximadamente un 30.2-81.8%.

CFD	China	[115]	Huang et al. / 2017	Therminol® VP-1	Tubo con hoyuelos/Acero inoxidable	- El rendimiento integral del tubo con hoyuelos poco profundos ($d = 1$ mm) varía de 1.05 a 1.06, mientras que con hoyuelos profundos ($d = 7$ mm), está entre 1.31 y 1.34 en comparación con el tubo liso.
SolidWorks® Simulación de flujo	Grecia	[120]	Bellos et al. / 2018	Syltherm 800	Aletas internas / Acero inoxidable	- El absorbedor con tres aletas en la parte inferior fue el caso óptimo. - η_t se mejora en aproximadamente un 0.51%.
ANSYS Fluent®	China	[121]	Liu et al. / 2019	Syltherm-800	Arreglos de nervios /Acero inoxidable	- La temperatura máxima y la pérdida de calor de SADIR y SCSIR se reducen en aproximadamente 177°C y 80,1%. - SCSIR and SADIR se mejoran η_t en aproximadamente un 1.9%.
ANSYS Fluent®	Turquía	[123]	Kursun / 2019	Syltherm 800	Aletas longitudinales internas con superficies laterales sinusoidales / acero 316L	- Nu se incrementa en un 25% para la aleta plana y en un 78% para la aleta sinusoidal.
ANSYS Fluent®	China	[124]	Li et al. / 2019	Silicone oil	Canal lunar/ Cobre	- En $T = 423$ K, la pérdida de calor por conducción representa aproximadamente el 40.3% de la pérdida total de calor. - La proporción de pérdida de calor por radiación de la ventana de vidrio aumenta del 30.8% al 48.1% cuando la temperatura de recogida aumenta a 723 K.

CFD & MCRT	China	[122]	Zou et al. / 2019	Syltherm 800	Espiral unilateral acanalada / Hoja de metal	<ul style="list-style-type: none"> - El rendimiento general del USR-PTR se mejora hasta en un 30.1% para un ángulo de espiral igual a 30 °. - El rendimiento general del USR-PTR, al establecer el intervalo de inclinación individualmente, la altura de la nervadura y el radio de la esquina es del 12.5%, 9.8% y 10.8%, respectivamente.
ANSYS Fluent®	Iran	[125]	Norouzi et al. / 2020	Al ₂ O ₃ / Therminol	Absorbedor giratorio / Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia del tubo absorbente de aluminio es casi un 25% mayor que la del tubo de acero. - La temperatura máxima de la superficie se reduce en una cantidad media de 60 K, lo que supone una reducción de casi un 14%.
ANSYS Fluent®	India	[127]	Chakraborty et al. / 2020	Al ₂ O ₃ / Agua	Tubo absorbente helicoidal / Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - η_t se mejora en aproximadamente un 0-10%. - La exergía y la eficiencia general aumentan en aproximadamente un 0.2%-3.2% y un 1%-9%, respectivamente, en comparación con el agua. - η_t se mejora en 78.4% y 67.7% para Al₂O₃/Agua y agua, respectivamente. - Nu se mejora dentro del rango de 4.54% a 36% cuando se usa nanofluido en comparación con agua.
ANSYS Fluent®	Iran	[130]	Hossein alipour et al. / 2020	Vapor supercalentado	Cinta retorcida / Acero A335-P22	<ul style="list-style-type: none"> - Nu y f_f se incrementan en 1.0-1.7 y 1.8-4.1 veces, respectivamente. - El rendimiento térmico está en el rango de 0.85-1.1. - La cinta retorcida con espacio libre cero y relación de torsión mínima proporciona un Nu y f_f más altos.

Los resultados de la tabla indican que todos los estudios numéricos utilizan Fluent CFD para desarrollar las nuevas configuraciones del receptor debido a su poder para proporcionar resultados claros sobre la mejora de la eficiencia térmica, el comportamiento del fluido en el interior y la distribución de la temperatura alrededor de las nuevas geometrías del tubo absorbedor. Por lo tanto, se adopta en los estudios de geometrías complejas de receptores, transferencia de calor de nanofluidos [131] y la combinación de ambos para mejorar la eficiencia térmica del CCP. También se observa que todas las configuraciones de tubo receptor propuestas pueden mejorar el coeficiente de transferencia de calor, reducir las pérdidas de calor y requerir energía de bombeo adicional. La combinación del tubo absorbente giratorio y el nanofluido $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Therminol}$ conduce a la mejora más significativa de la eficiencia térmica del CCP del 15%. Esta mejora se explica por el mayor rendimiento termohidráulico que el tubo liso con fluido base y la mayor eficiencia del tubo absorbente de aluminio que el tubo de acero. Además, se encuentra que los insertos de aleta tienen una influencia mucho más significativa en la transferencia de calor que la de los nanofluidos.

2.2.2. Estudios numéricos de nanofluidos en CCP

El uso de nanofluidos para mejorar el rendimiento del CCP es uno de los parámetros de gran importancia para el desarrollo de este tipo de sistemas [132]. Se observa que el desarrollo de los nanofluidos se reduce más a estudios numéricos que a estudios experimentales a escala de laboratorio.

Mwesigye y colaboradores [133,134] estudiaron el uso de nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Syltherm}$ 800 y encontraron que la eficiencia térmica y el rendimiento de transferencia de calor aumentaron hasta en un 8% y 76%, respectivamente. Por el contrario, el uso de nanofluidos es termodinámicamente indeseable para una fracción de volumen superior al 4% y más allá del número de Reynolds óptimo. Mwesigye y Huan [135] investigaron el uso de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Agua}$. Descubrieron un área de sección transversal óptima en cada número de Reynolds para la cual la generación de entropía en el tubo es mínima. Además, Mwesigye y colaboradores [136] usó nanofluido $\text{Cu}/\text{Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ y descubrieron que a medida que la fracción de volumen de nanopartículas aumenta de 0% a 6%, las tasas de generación de entropía disminuyen entre 20% y 30% y la eficiencia térmica aumenta en aproximadamente 12.5%. Wang y

colaboradores [137] encontraron que los gradientes de temperatura y la temperatura máxima en el absorbedor se reducen en gran medida al usar Al_2O_3 /aceite sintético.

Ghasemi y colaboradores [138] estudiaron la dispersión de Al_2O_3 y CuO al 3% en agua y encontraron una mejora en la transferencia de calor en un 28% y 35%, respectivamente. Ferraro y colaboradores [139] estudiaron el uso de 5% de Al_2O_3 /Aceite sintético y encontraron una mejora del 0.1% de la eficiencia térmica y una reducción de la potencia de bombeo. Mwesigye y colaboradores [140] estudiaron el uso de nanofluidos $\text{Cu/Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$, $\text{Ag/Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$. Concluyeron que el nanofluido $\text{Ag/Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ da el rendimiento térmico más alto (13.9%) debido a sus propiedades de transporte térmico comparativamente mejores, mientras que $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ mostró el rendimiento térmico más bajo (7.2%).

Kasaeian y colaboradores [141] estudiaron la dispersión de nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) y nanosilica en etilenglicol (EG). Descubrieron que el 0.3% de MWCNT/EG en el absorbedor de vidrio-vidrio al vacío alcanza la mayor eficiencia térmica de aproximadamente 74.9%, que es un 20% más que el tubo de vidrio desnudo. Además, la fracción de volumen óptima es 0.4% y 0.5% para nanosilica y MWCNT, respectivamente.

Bellos y colaboradores [142] examinaron el uso de Al_2O_3 /Syltherm 800 y CuO/Syltherm 800 . Encontraron que el uso de nanofluidos aumenta el rendimiento del colector en aproximadamente un 0.5% y mejora el coeficiente de transferencia de calor y el número de Nusselt en aproximadamente un 50%. Además, los mismos autores [143] concluyeron que CuO/Syltherm 800 y CuO/Sal fundida mejoraron la eficiencia térmica en un 0.65% y un 0.13%. Además, CuO/Syltherm 800 alcanza la mayor mejora en el coeficiente de transferencia de calor (31.5%) que la sal fundida (13.9%).

Ghasemi y colaboradores [144] estudiaron el 4% de Al_2O_3 /Therminol 66 y encontraron una mejora de la eficiencia térmica del 0.5%. Khakrah y colaboradores [145] investigaron el uso de 5% de Al_2O_3 /Aceite sintético y encontraron una mejora de la eficiencia térmica del 14.3 y 12.4% para los reflectores horizontales y rotados, respectivamente. Simultáneamente, disminuye a 6% y 8% al aumentar la velocidad del viento de 5 a 20 m/s y duplicar la entrada del fluido de transferencia de calor y la diferencia de temperatura ambiente, respectivamente. Además, a una velocidad del viento de 10 m/s, la eficiencia térmica se reduce entre un 7%

(para fluido puro) y un 22% (para 5% de Al_2O_3 /Aceite sintético) en comparación con la caja de aire en reposo. Además, el 5% de la adición de nanopartículas aumentó la eficiencia energética relativa en aproximadamente un 19% [146].

Minea y colaboradores [147] encontraron que el uso de un nanofluido de Cu-MgO/Agua al 2% mejora el coeficiente de transferencia de calor y la eficiencia térmica en aproximadamente un 20% y un 6%, respectivamente. También logra el mayor aumento en el número de Nusselt (14%) entre otros nanofluidos híbridos. Hatami y colaboradores [148] estudiaron el efecto de diferentes nanopartículas y la porosidad del tubo absorbente. Demostraron que la nanopartícula de Cu logra el mayor aumento en el número de Nusselt que las nanopartículas de Fe_3O_4 , Al_2O_3 y TiO_2 . Marefati y colaboradores [149] estudiaron la dispersión de SiC, CuO y Al_2O_3 en agua. Descubrieron que el nanofluido CuO/Agua mostró el mayor aumento en la transferencia de calor, seguido por Al_2O_3 y SiC, respectivamente. Además, Mallah y colaboradores [150] encontraron que los nanofluidos plasmónicos mezclados tienen el potencial de elevar la eficiencia del colector solar directo a más del 85% a una concentración superficial por debajo del 0.001 wt%.

Recientemente, Malekan y colaboradores [151] estudiaron el receptor de las aletas internas y la dispersión de Fe_3O_4 y CuO en Therminol 66. Demostraron que, bajo un campo magnético, el Fe_3O_4 funciona mejor que el CuO para mejorar la eficiencia del colector. La **Tabla 2.4** resume los estudios antes mencionados.

Tabla 2.4. Revisión de diferentes nanofluidos de CCP estudiados numéricamente.

Software computacional y métodos numéricos	Localización	Ref	Autor / Año	NP / Fluido base	Configuración del receptor / Material	Hallazgos importantes
ANSYS Fluent®	Sud Africa	[133]	Mwesigye et al. / 2015	Al ₂ O ₃ / Sytherm 800	Tubo de acero encerrado por una cubierta de vidrio.	- η_t del receptor se mejora hasta en un 8% a medida que la fracción de volumen aumenta de 0 a 8% y para caudales inferiores a 24.6 m ³ /h. - La potencia de transferencia de calor aumenta hasta en un 76%.
ANSYS Fluent®	Sud Africa	[134]	Mwesigye et al. / 2015	Al ₂ O ₃ / Sytherm 800	Tubo de acero encerrado por una cubierta de vidrio.	- η_t del receptor se mejora hasta en un 7.6%. - El coeficiente de transferencia de calor aumenta en un 76%, 54% y 35% a medida que la fracción de volumen aumenta de 0% a 8%, 0% a 6% y 0% a 4%, respectivamente.
ANSYS Fluent®	Sud Africa	[135]	Mwesigye y Huan / 2015	Al ₂ O ₃ / Agua	Tubo liso / [-]	- El uso de nanofluidos no tiene sentido termodinámico si el número de Reynolds está más allá del número de Reynolds óptimo.
MCRT & CFD	Sud Africa	[136]	Mwesigye et al. / 2016	Cu / Therminol® VP-1	Schott PTR®70	- El rendimiento de transferencia de calor aumenta en un 8%, 18% y 32% a medida que la fracción de volumen de nanopartículas en el fluido base aumenta al 2%, 4% y 6%, respectivamente. - η_t aumenta aproximadamente un 12.5% a una fracción de volumen del 6% y una temperatura de 650 K.

CFD	China	[137]	Wang et al. / 2016	Al ₂ O ₃ / Syltherm 800	Tubo de vacío / acero TP304H	- La eficiencia del colector se mejora en un 1.2%.
CFD	Iran	[138]	Ghasemi et al. / 2016	Al ₂ O ₃ & CuO / Agua	Tubo desnudo / [-]	- La transferencia de calor se mejora en un 28% y un 35% con la adición de nanopartículas de Al ₂ O ₃ y CuO ($\varphi = 3\%$), respectivamente.
Modelo matemático (Matlab®)	Italia	[139]	Ferraro et al. / 2016	Al ₂ O ₃ / Synthetic oil	Tubo de vacío / [-]	- η_t del PTSC se mejora en un 0.1% con una concentración de partículas del 5%.
ANSYS Fluent®	Sud Africa	[140]	Mwesigye et al. / 2017	Ag, Cu & Al ₂ O ₃ / Therminol® VP-1	Schott PTR®70	- η_t del PTSC aumenta en un 13.9%, 12.5% y 7.2% para los nanofluidos Ag-Therminol®VP-1, Cu-Therminol®VP-1 y Al ₂ O ₃ -Therminol®VP-1 como fracción de volumen aumentado de 0 a 6%.
CFD	Iran	[141]	Kasaeian et al. / 2017	MWCNT & nanosilica / EG	Tubo absorbente vidrio-vidrio al vacío	- La fracción de volumen óptima y la eficiencia térmica para MWCNT son 0.5 y 80.7%, respectivamente, y para nanosilice son 0.4 y 70.9%, respectivamente.
EES®	Grecia	[142]	Bellos et al. / 2017	Al ₂ O ₃ & CuO / Syltherm 800	Tubo de vacío / [-]	- El uso de nanopartículas de Al ₂ O ₃ y CuO mejora el coeficiente de transferencia de calor de 34.7% y 40.9%, respectivamente. - Nu se mejora del 26% al 55% para las nanopartículas de CuO y del 20% al 49% para Al ₂ O ₃ .

CFD	Iran	[144]	Ghasemi et al. / 2017	Al ₂ O ₃ /Therminol [®] 66	Tubo desnudo/[-]	<ul style="list-style-type: none"> - El uso de nanopartículas de CuO y Al₂O₃ aumenta la η_t hasta 1.26% y 1.13%, respectivamente. - η_t aumenta aproximadamente un 0.5% a concentraciones de nanopartículas del 4%.
FVM (FORTRAN [®])	Iran	[145]	Khakrah et al. / 2017	Al ₂ O ₃ / Synthetic oil	Tubo de vacío/[-]	<ul style="list-style-type: none"> - Se observa una mejora de la eficiencia máxima de aproximadamente un 12% para todas las velocidades del viento simuladas mediante la adición de concentraciones de nanopartículas del 4%. - η_t se reduce en aproximadamente un 6% al aumentar la velocidad del viento de 5 a 20 m/s. - η_t se reduce en aproximadamente un 8% al duplicar la entrada de HTF y la diferencia de temperatura ambiente. - Las eficiencias se reducen entre un 1 y un 3% girando el reflector 30° con respecto a la dirección del viento.
CFD	Rumania	[147]	Minea et al. / 2017	Ag-MgO & Cu-MgO / Agua	Tubo liso/[-]	<ul style="list-style-type: none"> - η_t mejora en aproximadamente un 6%, - El coeficiente de transferencia de calor se mejora en un 20% cuando se utiliza un 2% de Cu-MgO/nanofluido de agua.
FEM	Iran	[148]	Hatami et al. / 2018	Cu, Al ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ & TiO ₂ / Agua	Tubo absorbente poroso/[-]	<ul style="list-style-type: none"> - Las nanopartículas de Cu tienen el mayor aumento en el número de Nusselt en comparación con Fe₃O₄, Al₂O₃ y TiO₂. - El aumento del número de Darcy es una fuerza impulsora importante para aumentar el Nu local y promedio.

Modelo matemático (FORTRAN®)	Iran	[146]	Khakrah et al. / 2018	Al ₂ O ₃ / Synthetic oil	Tubo de evacuación	- <i>Nu</i> alcanza su valor máximo cuando la fracción de volumen de nanopartículas y los números de Rayleigh son los valores más altos posibles. - La eficiencia relativa de la exergía aumenta en aproximadamente un 19% cuando se agrega el 5% de NPs.
SolidWorks® Flow Simulation	Grecia	[143]	Bellos et al. / 2018	CuO/Syltherm 800 & CuO / Sal fundida de nitrato	Tubo de vacío / Acero inoxidable	- <i>Nu</i> se mejora hasta un 40% para CuO/Syltherm 800 y hasta un 13% para CuO/Sal fundida. - η_t de CuO/Syltherm 800 y CuO/Sal fundida se mejora en 0.65% y 0.13%, respectivamente. - La caída de presión aumenta con el uso de nanofluido de aceite alrededor del 50%, mientras que en el caso del nanofluido de sal fundida, alrededor del 16%.
Modelo matemático (Matlab®)	Iran	[149]	Marefati et al. / 2018	SiC, CuO & Al ₂ O ₃ / Agua	Tubo de vacío / [-]	- La producción de calor útil aumenta hasta un 8% mensual. - η_t mejora un 13.91% anual y un 19.01% en la máxima eficiencia mensual (Junio).
ANSYS Fluent®	Dinamarca y Finlandia	[151]	Malekan et al. / 2019	CuO / Therminol® 66 Fe ₃ O ₄ / Therminol® 66	Tubo de aletas internas/[-]	- Se obtuvo la máxima eficiencia del colector para el fluido de trabajo Fe ₃ O ₄ /Therminol 66 al 4% con un tamaño de partícula de 10 nm y con la ayuda del MF. - Aumentar el campo magnético, aumentar la fracción de volumen y disminuir el tamaño de las partículas mejora la eficiencia del colector.

De acuerdo con la **Tabla 2.4**, se observa que todos los nanofluidos pueden mejorar el coeficiente de transferencia de calor y la eficiencia térmica del CCP. Particularmente, el 8% de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Syltherm 800}$ conduce al incremento más significativo en el coeficiente de transferencia de calor (76%), seguido por $\text{CuO}/\text{Syltherm 800}$ (40.9%) y 3% CuO/Agua (35%). Además, el $\text{Ag-Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ conduce a la mejora más significativa de la eficiencia térmica de CCP (13.9%), seguido por $\text{Cu-Therminol}^{\text{®}}\text{VP-1}$ (12.5%) y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sytherm 800}$ (7.6%). Esta mejora se explica por las propiedades termofísicas de las nanopartículas y su concentración, en las que un aumento en la fracción de volumen de nanofluidos hace que el fluido sea más denso y espeso. En consecuencia, conduce a una reducción de la entropía, un aumento de la resistencia al flujo, un aumento de la potencia de bombeo, una disminución de la pérdida de calor y la acumulación de nanofluidos; por lo tanto, se necesita una fracción de volumen óptima. Es crucial mencionar que el rendimiento del CCP no depende solo de elegir el mejor nanofluido con las propiedades termofísicas más altas, sino que también depende de la selección de la región geográfica con el haz de radiación solar más alto.

2.2.3. Modelos numéricos, simulación y optimización de CCP

Actualmente, el desarrollo de software computacional, igualmente los métodos numéricos para el cálculo científico, ha experimentado un enorme crecimiento en el modelado, simulación y optimización de sistemas de ingeniería más complejos debido a su gran ayuda para visualizar la influencia de diversas variables de entrada de manera clara y precisa en las variables de salida. Por lo tanto, existen muchos estudios de modelado, simulación y optimización de CCP que se utilizan para mejorar su rendimiento.

Kalogirou y colaboradores[152] desarrollaron un PTCDES, programa de simulación de versión simplificada. Concluyeron que el 51.1% de la radiación solar disponible se pierde como pérdidas térmicas y solo se utiliza el 48.9% para la generación de vapor. Odeh y colaboradores [153] simuló que el uso de aceite sintético produce pérdidas térmicas en el colector más importantes que el agua. Además, la eficiencia del colector disminuye al aumentar la temperatura de saturación del agua de alimentación. García y colaboradores [154] simularon que el 4% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{aceite térmico}$ logra un 4% más de eficiencia térmica que el aceite

térmico. Asimismo, demostraron que los nanofluidos permiten trabajar a niveles de baja presión en el CCP que el agua a presión. Marif y colaboradores [155] desarrollaron un FDM implícito y simularon que el agua es el mejor fluido de transferencia de calor de CCP con bajo costo y buena eficiencia térmica.

Risi y colaboradores [156] utilizaron un algoritmo genético (GA) para mejorar y optimizar el rendimiento del CCP basado en nanofluidos en fase gaseosa y receptores transparentes. Sus resultados mostraron que el CCP transparente máximo a la eficiencia térmica fue del 62.5%, para una temperatura de salida de nanofluidos de 650 °C y una concentración de volumen de nanopartículas de 0.3%. Ghazouani y colaboradores [157] utilizaron GA para optimizar las especificaciones geométricas de pequeños CCP; considerando la minimización del costo energético anual total y maximizando la eficiencia exergética del CCP. Sus resultados mostraron que el rendimiento termo-económico y exergético de CCP podría mejorarse reduciendo la longitud y el diámetro del receptor y aumentando el ancho del colector. Además, el agua comprimida demostró el rendimiento más alto entre los fluidos de transferencia de calor estudiados debido a su alta capacidad calorífica. Dung y colaboradores [158] usaron GA y descubrieron que la ranura triangular es el mejor diseño para mejorar la transferencia de energía solar en la tubería interior. Guo y colaboradores [159] usaron GA y descubrieron que la temperatura promedio del fluido de trabajo tiene la mayor influencia en la eficiencia de la exergía. Luo y colaboradores [160] ilustraron que cuando la temperatura del aceite de entrada aumenta o disminuye en 15 °C, la temperatura de salida aumenta en 11.8 °C o desciende en 12.2 °C. Ehyaei y colaboradores [161] utilizaron el método de optimización de enjambre de objetivos múltiples (MOPSO) para maximizar la eficiencia de la exergía y minimizar el costo de producción de calor del CCP. Sus resultados óptimos mostraron que la eficiencia energética, la eficiencia exergética y el costo del calor fueron 35.55%, 29.22% y 0.0142 \$/kWh. La **Tabla 2.5** incluye los estudios mencionados anteriormente, entre otros estudios.

Tabla 2.5. Modelos numéricos, simulación y optimización de CCP.

Software computacional y métodos numéricos	Localización	Ref	Autor / Año	HTF	Configuración del receptor / material	Hallazgos importantes
Calculadora de mano	USA	[27]	Rabl et al. / 1982	[-]	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - El cálculo de la fuente de alimentación anual optimizada muestra que en latitudes medias (35 °), un seguimiento de apertura en el eje horizontal N-S recibe aproximadamente un 10% más de energía que una pista en el eje E-O. - Si el concentrador está optimizado para operar a $U_L = 1000 \text{ W / m}^2$, la eficiencia será $\eta_t = 0.6156$, una ganancia de solo 0.5%.
EDEP & ANN	Chipre	[162]	Kalogirou et al. / 1987	Agua	[-]	<ul style="list-style-type: none"> - El programa ANN se puede utilizar con seguridad para evaluar el factor de intercepción de un PTSC.
Método analítico	Egipto	[163]	El-Kassaby et al. / 1994	[-]	Absorbedor tubular / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - A medida que aumentan el error de contorno del colector, la inexactitud del seguimiento del sol, el ángulo de incidencia y el diámetro del absorbedor, disminuyen tanto el ángulo de arco de la superficie de absorción irradiada como las intensidades de radiación concentrada.
Modelo de computadora	Egipto	[164]	EL-kassaby/ 1994	[-]	[-]	<ul style="list-style-type: none"> - El ángulo de inclinación óptimo varía linealmente con el ángulo de latitud.

TRNSYS®	Australia	[165]	Odeh et al. / 1994	Aceite sintético y agua	Tubo evacuado / Acero	- El ángulo de inclinación anual óptimo no es el ángulo de latitud, sino mayor que la latitud en 3,5 °. - El programa TRNSYS se puede utilizar con seguridad para simular el rendimiento anual de una configuración típica de canal.
PTCDES	UK	[152]	Kalogirou et al. / 1997	Agua	Tubo evacuado / [-]	- El 51.1% de la radiación solar disponible se pierde en forma de pérdidas térmicas y solo el 48.9% se destina a la generación de vapor.
Modelo térmico	Australia	[153]	Odeh et al. / 1998	Therminol® VP-1	Tubo evacuado / Acero	- El aceite sintético produce pérdidas térmicas en el colector más importantes que el uso de agua. - La eficiencia del colector no se ve afectada significativamente por el modo de funcionamiento del colector (caudal de agua de alimentación variable o fijo) - La eficiencia del colector disminuye al aumentar la temperatura de saturación del agua de alimentación.
PARASCAN & CAMERA- TARGET	España	[166]	Riffelmann et al. / 2005	[-]	Tubo evacuado / [-]	- El potencial para mejorar el rendimiento óptico depende del ensamblaje más preciso de los componentes del colector (estructura con soportes de espejo y alineación del tubo absorbente) y la mejor calidad de imagen de espejo.
Fluent® & MCRT	China	[167]	Cheng et al. / 2010	Syltherm 800	Tubo evacuado / [-]	- Un ϵ_w más grande aumentará la transferencia de calor por radiación térmica entre la pared exterior del tubo absorbente y la superficie interior del tubo de la cubierta de vidrio.

MCRT & FVM (Fluent®)	China	[41]	He et al. / 2011	Syltherm 800	Tubo evacuado / Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> - La distribución del flujo de calor en la superficie externa del tubo absorbente fue heterogénea en la dirección circular pero uniforme en la dirección axial. - El aumento de GC conduce a una distribución más uniforme del flujo de calor, una reducción de la pérdida de calor y una mejora en el aumento de temperatura de HTF.
FVM & MCRT	China	[168]	Cheng et al. / / 2012	Syltherm 800, Therminol® VP-1 , Nitrate Salt & Hitec XL	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - Los dos aceites sintéticos tienen un mejor rendimiento de transferencia de calor y una menor caída de presión que las dos sales. - El argón es la mejor opción que aporta una ligera mejora respecto al aire. Al mismo tiempo, el hidrógeno conduce a una disminución muy significativa en el rendimiento del receptor.
MCRT & FVM	Suiza	[169]	Wirz et al. / 2012	Syltherm 800	Schott PTR70	<ul style="list-style-type: none"> - Se predicen temperaturas de vidrio significativamente más bajas cuando se utilizan propiedades espectrales tanto para el tubo absorbente como para la envoltura de vidrio. - La distribución de la radiación depende en gran medida de las características ópticas del espejo concentrador y de las propiedades ópticas del vidrio y del recubrimiento absorbente.
GA	Italia	[156]	Risi et al. / 2013	0.25% CuO & 0.05% Ni	Dos tubos de cuarzo concéntricos	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia térmica máxima del TPTC alcanzó el 62.5% cuando se utilizó el 0.3% de concentración de volumen de nanopartículas.

FVM & MCRT	China	[40]	Cheng et al. / 2014	Syltherm-800	SCHOTT PTR [®] 70	<ul style="list-style-type: none"> - El costo del nanopolvo de Ni es aproximadamente 20 veces más caro que las nanopartículas de óxido de metal. - Los aumentos de la relación de concentración geométrica provocan un aumento de la magnitud relativa de la energía solar absorbida por el receptor. Además, η_o cae significativamente cuando W es mayor que 12.9 m para el ancho de la forma focal estrictamente mayor que D_{ext}.
FDM	Argelia	[155]	Marif et al. / 2014	Agua & Therminol [®] VP-1	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia térmica del PTSC con agua se incrementó en un 2% en todas las estaciones, con un máximo del 72.24% en verano. - La alta eficiencia óptica fue del 73.92%. - Los sistemas de seguimiento de un solo eje polar E-O y horizontal E-O eran los más deseables para el funcionamiento del PTSC.
Modelo matemático	Argelia	[170]	Behar et al. / 2015	Syltherm 800	Tubo evacuado / Acero	<ul style="list-style-type: none"> - El modelo propuesto es más preciso para predecir la eficiencia térmica que el EES, con una incertidumbre promedio de 0.64% en comparación con el 1.11% de ESS.
GA (Matlab [®])	Taiwán	[158]	Dung et al. / 2015	Benceno, agua y etanol	Tubo con ranura semicircular y triangular / Acero al carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Las condiciones óptimas son temperatura saturada de 200 °C, agua como mejor tipo de fluido, radio de tubería de 25 mm y ranura triangular con un ancho de 0,5 mm. - El agua mejora la posición del frente del líquido en comparación con el etanol y el benceno, ya que tiene la tensión superficial más alta.

PSO & MCRT (Fortran®)	China	[171]	Cheng et al. / 2015	[-]	Tubo evacuado / [-]	- El ancho de apertura óptimo, la distancia focal óptima y la eficiencia óptica máxima son 7.9148 m, 0.5389 m y 87.2670 %.
CFD/ ANSYS Fluent®	Sudáfrica	[172]	Mwesigye et al. / 2015	Syltherm 800	Tubo evacuado con insertos de placa perforada / Acero inoxidable (321H)	- La optimización multiobjetivo demostró que el número de <i>Re</i> óptima disminuye al aumentar el tamaño de la placa y al disminuir el espaciado de la placa. - Por debajo del óptimo, las tasas de generación de <i>Re</i> entropía se reducen en aproximadamente un 53% con la mejora de la transferencia de calor.
MCRT (SolTrace) & CFD	Sudáfrica	[173]	Mwesigye et al. / 2016	Syltherm- 800	SCHOTT PTR®70	- La eficiencia térmica general disminuye en aproximadamente un 16-17% a medida que los errores de pendiente aumentan de 0 a 5. - El aumento de los errores de pendiente conduce a un empeoramiento del rendimiento termodinámico del receptor.
GA (Matlab®) & CFD	China	[174]	Zhang Jing et al. / 2016	Agua	Tubo evacuado con inserto poroso / Fe, SiC, Al & Cu	- El GA logra optimizar el tubo receptor de inserción poroso con una mayor tasa de transferencia de calor, mejores propiedades mecánicas y una mayor eficiencia de conversión de energía solar en térmica que el tubo de referencia.

ANN (Matlab®)	Argelia	[175]	Boukelia et al. / 2016	Aceite termico	Tubo evacuado / [-]	- El modelo de entrenamiento LM con 38 neuronas en una sola capa oculta es el mejor modelo ANN para predecir PG_{net} y LCOE a partir del PTSTPP presentado.
GA	China	[159]	Guo et al. / 2016	[-]	Tubo evacuado / [-]	- La exergía del fluido de trabajo, la eficiencia exergética en el esquema de diseño final y la pérdida de calor se incrementan en aproximadamente un 6%, 3.3% y 25.6%, respectivamente. Además, la eficiencia térmica se reduce en aproximadamente un 2.9%.
MCRT	China	[176]	Zou et al. / 2017	[-]	Tubo evacuado /	- La eficiencia óptica se reduce de 84.85% a 77.42% cuando la relación circunsolar aumenta de 0 a 0.5.
FEM (ANSYS Workbench®)	Alemania	[177]	Meiser et al. / 2017	[-]	[-]	- Las características de deflexión y la magnitud del desplazamiento dependen significativamente del diseño constructivo y la rigidez de la estructura de soporte.
CFD	India	[178]	Chandra et al. / 2017	Therminol® VP-1	Tubo evacuado / Acero inoxidable	- El receptor con el aislamiento en un lado mostró una distribución de temperatura angular más uniforme y homogénea, lo que da un mejor proceso de intercambio de calor entre el absorbedor y el HTF en comparación con el receptor convencional.
ANN & QA	Iran	[179]	Ebrahimi-Moghadam et al. / 2018	Al ₂ O ₃ -EG/Agua	Tubo liso / Cobre	- La fracción de volumen óptima no depende de la Re - Los valores óptimos del tamaño de las nanopartículas, la temperatura de flujo promedio del nanofluido y el número de Reynolds son 90 nm, 360 K y 4000, respectivamente.

MCRT (TracePro), FVM & FEM	China	[180]	Wang et al. / 2019	Syltherm 800	Tubo evacuado / Acero	- El diámetro de las nanopartículas debe seleccionarse lo más alto posible. - A medida que la velocidad de entrada aumentó de 0.1 m/s a 0.5 m/s, la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida disminuyó de 54.8 ° C a 9.8 ° C y la caída de presión aumentó de 61.9 Pa a 786.3 Pa.
ANN y principio de superposición	Malasia	[181]	Heng et al. / 2019	Therminol® VP-1	Tubo evacuado / Acero inoxidable	- El método ANN puede predecir la temperatura de salida del fluido de un día en menos de 1 minuto.
Modelo matemático (Python®)	México	[154]	García et al. / 2019	Agua, thermal oil & Al ₂ O ₃ / Thermal oil	Tubo evacuado / Acero inoxidable	- La eficiencia térmica usando Al ₂ O ₃ / aceite térmico en una fracción de volumen de 0.04 y 0.02 es 80% y 79%. - El aceite térmico tiene la eficiencia más baja, con una eficiencia máxima del 76%. - Los nanofluidos permiten operar a baja presión en comparación con el agua a presión.
Modelo matemático	Marruecos	[182]	Mouaky et al. / 2019	Mineral oil	Tubo de metal cubierto por el tubo de vidrio (no evacuado) / Acero inoxidable	- La suciedad tiene un impacto significativo en la producción vegetal. Para un período comprendido entre el 15 y el 29 de Junio, esta pérdida de producción de calor del sistema es de 2250 kWh durante 14 días, lo que equivale a una caída de energía del 11.84% en la producción.

MOPSO	Iran	[161]	Ehyaiei et al. / 2019	Agua	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - El aumento de la longitud del PTSC demostró un mayor efecto en la promoción de la eficiencia energética del PTSC que el aumento de su ancho. - El aumento de la distancia focal de 0,4 m a 1,2 m conduce a una disminución de la eficiencia energética del 35.9% al 29.7%. - El aumento del caudal másico de HTF conduce a una mayor eficiencia energética de PTSC.
Modelo de gráfico de pseudo enlace (Matlab®)	Argelia	[183]	Yahi et al. / 2020	Syltherm 800	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - Se recomienda el modelo PBG propuesto para el control del campo solar PTSC.
GA	Marruecos	[157]	Ghazouani et al. / 2020	Syltherm 800, Dowtherm Q, Thermia B y agua a presión	Tubo evacuado / [-]	<ul style="list-style-type: none"> - El PTSC pequeño optimizado ($A_a = 10 \text{ m}^2$; Ancho * Largo = 2 m x 5 m) proporciona más de 12.84 MWh/año con un coste unitario medio inferior a 0.022 USD/kWh. - Para valores bajos de radiación solar, al duplicar el ancho de la parábola, la eficiencia del colector aumenta en más de un 20% y el costo unitario de la energía disminuye aproximadamente siete veces. - Reducir el diámetro del receptor a la mitad ayuda a aumentar la eficiencia del colector en más de un 10% mientras reduce el costo unitario promedio en aproximadamente un 19%.

ANSYS CFX [®] , ANN, GA, & NSGA-II	Egipto	[184]	Abubakr et al. / 2020	Al ₂ O ₃ , CuO & SiO ₂ / Therminol VP-1, Syltherm 800, & Dowtherm Q	SCHOTT PTR [®] 70	- Las eficiencias de energía y exergía se mejoran en un 69.913 y un 32.088%, respectivamente, para las condiciones óptimas de diseño (0.243% CuO/Dowtherm Q, DNI = 1000 W/m ² , $T_{in} = 240,793$ °C y $Re = 2.915E + 05$)
---	--------	-------	--------------------------	--	-------------------------------	---

Como se indica en la **Tabla 2.5**, MCRT, FEM, ANN, PSO, GA, Fortran[®], Matlab[®], EES[®], Python[®] y CFD[®] son los métodos numéricos y software computacional que se presentaron para modelado, simulación y optimización para mejorar del rendimiento de CCP debido de que estos modelos tienen el potencial de encontrar soluciones óptimas en poco tiempo [185] y con alta confiabilidad [186].

2.3. Aplicaciones

La energía producida por el CCP se puede utilizar en diversas aplicaciones como procesos de desalinización, cocción solar, calefacción, sistemas de refrigeración, centrales eléctricas o procesos industriales [187–189].

2.3.1. CCP en proceso de desalinización y destilación

La desalinización solar puede ser directa, utilizando energía solar para producir destilado directamente en el colector solar o indirecta mediante la combinación de técnicas de desalinización convencionales con colectores solares para la generación de calor [190–192]. Kalogirou [193] descubrió que no es rentable operar la desalinización solar únicamente con energía solar debido al alto porcentaje de tiempo de inactividad y al costo relativamente alto del equipo. García-Rodríguez y colaboradores [194,195] concluyeron que el costo de exergía y la ubicación de la planta de desalinización solar influyen fuertemente en los costos de agua dulce. Narayanan y colaboradores [196] descubrió que la desalinización solar es un poco más rentable, pero no tan eficiente como un sistema de ósmosis inversa.

2.3.2. Cocina solar

Particularmente, en los países en desarrollo, se utilizan métodos de cocción tradicionales cuando la madera es la principal fuente de energía en los hogares africanos [197]. Estos métodos convencionales son ineficientes [198] y causan deforestación, contaminación y problemas ambientales y climáticos [199,200]. Por lo tanto, la cocina solar es una de las energías renovables alternativas limpias que se utilizan para frenar estos problemas. Al-Soud y colaboradores [201] demostró que las cocinas solares parabólicas podían calentar alimentos, bebidas y pasteurizar agua o leche. Mussard y colaboradores [202] investigó un sistema de almacenamiento de calor combinado con CCP para cocinar. Descubrieron que un absorbedor sin aislamiento a bajas temperaturas es mucho más efectivo, pero para la recolección y

almacenamiento de temperaturas más altas, el tubo de vidrio es necesario. Noman y colaboradores [20] mostró que la cocina solar propuesta ayudó a hacer una cocina doméstica utilizable. Asimismo, puede alcanzar una temperatura de cocción de 300 °C en condiciones invernales tan salvajes y aumentar el área de apertura del CCP a 7 m². Además, El Moussaoui y colaboradores [203] desarrolló una cocina termosolar de cilindro parabólico a altas temperaturas para satisfacer las necesidades de los residentes rurales y urbanos; igualmente, cuenta con un sistema de almacenamiento de calor que podría alcanzar los 60 minutos de autonomía.

2.3.3. CCP para procesos industriales

Diferentes procesos industriales como la industria cárnica, ladrillos y bloques, lácteos, alimentos enlatados, textiles, papel, químicos, bebidas, harinas y subproductos, subproductos de la madera y la industria del plástico requieren una temperatura de proceso de 60 ° C a 260 ° C. [204,205]. Por lo tanto, la implementación de energía CCP en procesos industriales puede reducir una cantidad muy significativa de emisiones de CO₂ por año, aproximadamente 250-400 kg por cada metro cuadrado de superficie del colector [48]. El Ghazzani y colaboradores [206] utilizó una planta CCP para generar aire caliente de una fábrica industrial y descubrió que la implementación de la planta solar puede evitar aproximadamente el 57% de las emisiones anuales de CO₂. Kalogirou [207] descubrió que el uso de CCP para el proceso industrial puede evitar 208 toneladas de emisiones de CO₂ a la atmósfera y generar un total de 896 GJ por año. Bigoni y colaboradores [19] ilustró que la técnica de pasteurización CCP es una opción atractiva entre otros enfoques existentes para tratar el agua potable, especialmente para las áreas rurales en los países en desarrollo con abundante luz solar. Además, es una técnica útil para la industria de la conservación de verduras [208]. Asimismo, puede proporcionar una eficiencia térmica de hasta el 60% con una inversión económica viable e incluyendo su modularidad para el calor de procesos en pequeñas y medianas empresas [209,210].

2.3.4. CCP en proceso de calentamiento y enfriamiento

La demanda de calefacción y refrigeración en los edificios ha aumentado durante la última década debido a la mejora del confort y las temperaturas más altas. Por tanto, la refrigeración solar es una tecnología eminentemente inteligente porque la demanda y la oferta de energía

coinciden; La radiación solar está disponible en abundancia, especialmente en el verano, donde la necesidad de aire acondicionado es mayor [211]. Para mantener unas condiciones interiores confortables durante el verano, el CCP1800 se ha desarrollado para futuras instalaciones de refrigeración solar en Marruecos, Jordania [212] y se ha introducido en un hotel en la costa mediterránea de Turquía [213]. Por su alta eficiencia y el acoplamiento de la misma con la climatización y la refrigeración solar logran el mayor rendimiento en comparación con el colector de placa plana (FPC), tubo de vacío (ETC) y colector parabólico compuesto (CPC). Además, CCP presenta costos de energía nivelados similares para enfriamiento que FPC y más bajos que ETC y CPC [214,215]. Además, puede cubrir aproximadamente el 76% de la demanda de calefacción en los días más fríos del invierno y el 25% de la demanda de refrigeración en los días más calurosos del verano [216]. Además, puede proporcionar agua caliente a una temperatura adecuada para hoteles y uso doméstico [217]. Por lo tanto, ofrece una contribución significativa a la satisfacción de la demanda de calefacción urbana y presenta un índice económico impresionantemente mejor en comparación con la configuración convencional [218]. Además, el sistema de aire acondicionado solar con un acumulador trifásico puede suministrar refrigeración de forma continua y constante a los edificios durante el día y la noche, garantizando una alta eficiencia de almacenamiento de energía [219].

2.3.5. CCPs en planta de energía

Las plantas de energía cilindro parabólica consisten en un campo solar lleno de cientos o miles de equipos de los CCPs. Los canales concentran el sol hasta 100 veces en un absorbedor lleno de líquido colocado en la línea focal del canal. El calor producido es luego acoplado por el intercambiador de calor en el ciclo de vapor de la central eléctrica [220] o almacenado en el almacenamiento de energía térmica [221]. El beneficio de la central eléctrica PTSC, entre los colectores concentradores, es el más maduro [9] y puede integrarse con fuentes de energía de respaldo para proporcionar calor adicional o la combinación con plantas de combustibles fósiles para disminuir la producción de carbono [222–224].

Actualmente, CCP se utiliza en el 90% de la energía solar de concentración (CSP) en todo el mundo [225,226] debido a su alto rendimiento y bajo impacto ambiental; en el que 1 MW de CSP instalada podría evitar la emisión de 688 t de CO₂ en comparación con un sistema de

ciclo combinado y 1360 t de CO₂ en comparación con una central eléctrica de ciclo de carbón / vapor [223]. Además, la instalación de CSP juega un parámetro clave para lograr el objetivo de la UE Reafirmado por el Consejo Europeo en febrero de 2011 de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-95%, además participar 100% de energía renovable a lo largo de 2050 [227–229]. Por lo tanto, muchos países con un alto potencial de energía solar están operando sistemas de CSP, como Estados Unidos [230,231], España [232–235], Europa, la región MENA [236], Marruecos [237], Sudáfrica [238], China [239,240], Israel, Egipto, Argelia, Italia, México [241], Chile [242,243], Jordania [244], Irán [245], India [246,247], y otros países del mundo [248–254].

CAPÍTULO 3. Modelos de simulación y optimización

3.1. Desarrollo de la red neuronal artificial

En los últimos años, las redes neuronales artificiales (ANN) han tenido un desarrollo sorprendente en torno a la investigación básica y aplicada. La razón de esto es que ANN representa un enfoque novedoso y moderno que puede proporcionar soluciones a problemas complejos lineales y no lineales para los cuales las matemáticas, los algoritmos y las metodologías convencionales no pueden encontrar una solución satisfactoria y aceptable [255].

Las ANN son algoritmos de aprendizaje automático inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, que consta de muchas neuronas artificiales conectadas en paralelo. Estas redes operan a través de técnicas de mapeo no lineal entre las entradas y salidas indicativas de un sistema completo [256].

La estructura básica de ANN consta de tres capas: una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Cada neurona de la capa de salida recibe los datos de la capa anterior como entrada. Cada neurona de salida recibe los datos de la capa oculta. Cada neurona de la capa oculta recibe los datos de la capa de entrada y la capa de entrada recibe los datos del experimento. La conexión entre neuronas y capas está asociada con un valor de ponderación y un valor de compensación llamado bias, que permite que la red ANN aprenda [255]. En términos matemáticos, es posible describir el funcionamiento de la red mediante la siguiente ecuación:

$$n_j = \sum_{k=1}^K (IW_{s,k} P_{i,N} + b_{1(s)}) \quad (1)$$

donde K es el número de datos de entrada ($k = 1, 2, 3 \dots K$) y $IW_{s,k}$ son los coeficientes de los pesos de conexión entre la capa de entrada y la capa oculta, $P_{i,N}$ es la matriz 6×2340 de las variables de entrada normalizados y $b_{1(s)}$ es la bia correspondiente a la neurona en la capa oculta. El conocimiento se almacena en forma de un conjunto de pesos y bias de conexión. Después de la suma de las entradas ponderadas de varias conexiones más el valor de

compensación, se aplica una función de transferencia a la neurona J de la capa oculta dada por:

$$a_J = F\left(\sum_{k=1}^K (IW_{s,k} P_{i,N} + b_{1(s)})\right) \quad (2)$$

donde F es la función de activación. Las salidas a_J de la capa oculta alimentan a la neurona Y_k de la capa de salida donde sufre el mismo proceso dado por:

$$Y_k = F\left(\sum_{s=1}^S (LW_{l,s} a_J + b_{2(l)})\right) \quad (3)$$

donde Y_k es la señal de la neurona de salida, $LW_{l,s}$ son los coeficientes de los pesos de conexión entre la capa oculta y la capa de salida y $b_{2(l)}$ es la bia por correspondiente a la neurona en la capa de salida.

Las funciones de transferencia se aplican en la capa oculta para devolver la salida para un rango dado de valores de entrada. Las funciones de transferencia más comúnmente utilizadas son la función tangencial-sigmoidal (*Tansig*) y logarítmica-sigmoidal (*Logsig*), que están determinadas por:

Función de transferencia sigmoidal logarítmica:

$$F(n_j) = \text{Logsig}(n_j) = \frac{1}{1 + e^{-n_j}}, \quad 0 < F(n_j) < 1 \quad (4)$$

Función de transferencia sigmoidal tangente hiperbólica.

$$F(n_j) = \text{Tansig}(n_j) = \frac{1 - e^{-2n_j}}{1 + e^{-2n_j}} = \frac{2}{1 + e^{-2n_j}} - 1, \quad -1 < F(n_j) < 1 \quad (5)$$

La función de transferencia lineal (*Purelin*) se usa ampliamente en la capa de salida para tener una mejor predicción sobre los datos experimentales, que está determinada por:

Función de transferencia lineal:

$$F\left(\sum_{s=1}^S (LW_{l,s} a_J + b_{2(l)})\right) = \text{Purelin}\left(\sum_{s=1}^S (LW_{l,s} a_J + b_{2(l)})\right) = \sum_{s=1}^S (LW_{l,s} a_J + b_{2(l)}) \quad (6)$$

3.1.1. Normalización de datos

Es muy importante señalar que es conveniente normalizar cada variable de entrada antes de entrenar la red neuronal artificial para acelerar el rendimiento del ajuste del modelo así como el entrenamiento de los parámetros de entrada comienza dentro del intervalo de funcionamiento de las funciones de transferencia no lineal de la capa oculta para una mayor eficiencia. Por lo general, el procedimiento de normalización de entrada se escala con un mapeo lineal llamado escala mínima-máxima.

Las variables de entrada se normalizan mediante la siguiente ecuación [257]:

$$P_{i,N} = \frac{(P_{in} - P_{min})}{P_{max} - P_{min}} (Y_{max} - Y_{min}) + Y_{min} \quad (7)$$

donde $P_{i,N}$ es la variable normalizada, P_{in} es el valor real de la variable antes de la normalización, P_{max} y P_{min} son el máximo y mínimo de las variables antes de la normalización, y Y_{max} , Y_{min} son el máximo y el mínimo de las variables después de la normalización.

3.1.2. Análisis estadístico para la evaluación del desempeño del modelo ANN

Para evaluar el desempeño del modelo ANN, se realizó un análisis estadístico comparando datos experimentales versus datos simulados. Los parámetros de prueba comúnmente utilizados son la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$), el error de porcentaje absoluto medio ($MAPE$) y el coeficiente de determinación R^2 [258]. El modelo considerado óptimo es el que tiene el R^2 más cercano a 1, y el $MAPE$ y $RMSE$ más cercano a 0. Además, se debe estar dentro del intervalo de la prueba pendiente-intercepto (pendiente = 1 e intercepto = 0) para validar el modelo de linealidad y exactitud.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{out,exp(i)} - x_{out,sim(i)})^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{out,exp(i)} - x_{out,sim(i)}}{x_{out,exp(i)}} \right|}{n} \times 100 (\%) \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{out,exp(i)} - x_{out,sim(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{out,exp(i)} - \bar{x}_{out,exp})^2} \quad (10)$$

donde $\bar{x}_{out,exp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{out,exp(i)}$, $x_{out,sim(i)}$ es el valor de salida obtenido por ANN, y $x_{out,exp(i)}$ es el valor de salida experimental.

3.1.3. Análisis de sensibilidad

Después de obtener el modelo ANN, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar la importancia relativa de cada variable de entrada con respecto a la variable de salida utilizando la matriz de pesos encontrados en la capa oculta y la capa de salida. Garson [259] propuso una ecuación basada en la partición de los pesos de conexión:

$$I_j = \frac{\sum_{m=1}^{N_h} \left(\left(\frac{|W_{jm}^{ih}|}{\sum_{k=1}^{N_i} |W_{km}^{ih}|} \right) |W_{mn}^{ho}| \right)}{\sum_{k=1}^{N_i} \left[\left(\sum_{m=1}^{N_h} \left(\left(\frac{|W_{km}^{ih}|}{\sum_{k=1}^{N_i} |W_{km}^{ih}|} \right) \right) \right) (|W_{mn}^{ho}|) \right]} \quad (11)$$

donde I_j es la importancia relativa de la j^{th} ésima variable de entrada en la variable de salida, y N_i y N_h son el número de neuronas en las capas de entrada y ocultas, respectivamente. Los superíndices i, h y o se refieren a capas de entrada, ocultas y de salida. Los subíndices k, m y n se refieren a neuronas de entrada, ocultas y de salida, respectivamente.

3.2. Descripción del modelo ANNim enfocado en optimizar variables múltiples

En resumen, el enfoque del modelo ANNi mejora la variable de salida deseada con respecto a las variables de entrada utilizando los coeficientes obtenidos por un modelo ANN. Para llevar a cabo el desarrollo del modelo ANNi, es fundamental invertir el modelo ANN para obtener una función objetivo multivariable [260,261]. La **Figura 3.1** muestra esquemáticamente que una vez que el modelo ANN simula la eficiencia térmica del CCP, se aplican los coeficientes (pesos y bias) en el enfoque de función objetivo multivariable, y se acoplan los algoritmos metaheurísticos (GA y PSO) para obtener las variables óptimas.

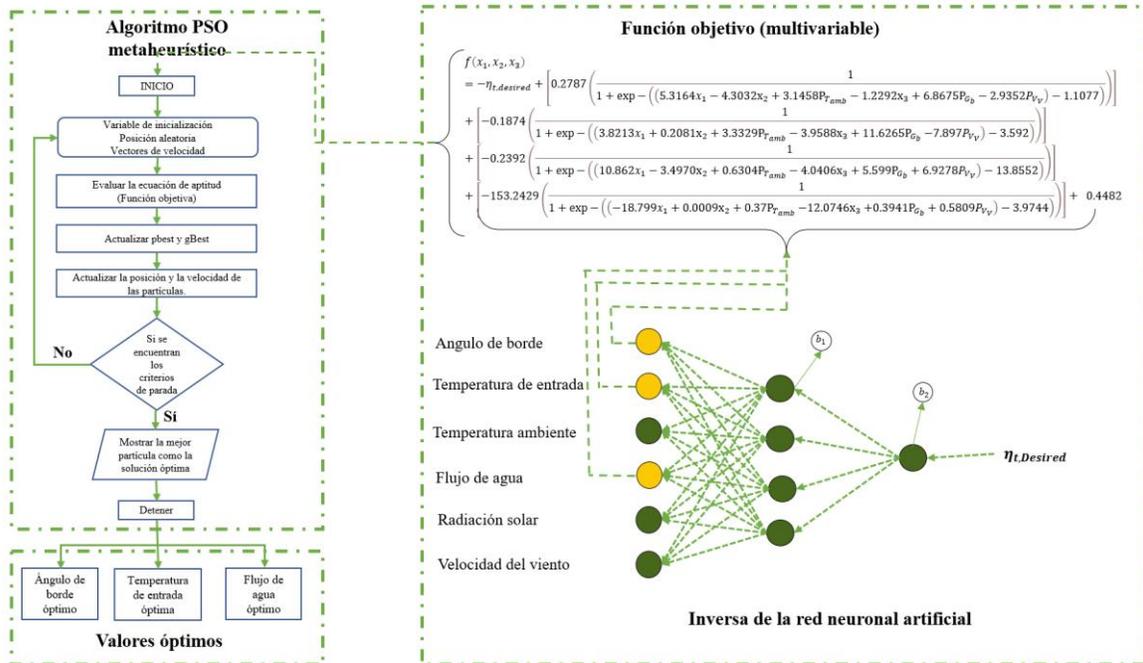


Figura 3.1. Diagrama esquemático del modelo ANNim para optimizar las múltiples variables de entrada del colector solar de canal parabólico.

La función multivariable resultante tiene como finalidad intercambiar el valor simulado (η_t) de la ecuación general del modelo ANN con las variables de entrada para determinar los valores óptimos que permitan alcanzar la cantidad deseada. La función multivariable para optimizar el CCP se plantea de dos formas diferentes. El primero aplica la función de transferencia *Tansig*, mientras que el segundo la función *Logsig*, como se muestra en las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
& \min (f_{(x_1, x_2, x_3)}) \\
& = -\eta_{t,desired} \\
& + \left[180.9133 \left(\frac{2}{1 + \exp \left(-2 \left((-16.5515x_1 - 0.0917x_2 - 0.1512P_{T_{amb}} - 6.5693x_3 + 0.5147P_{G_b} + 0.5166P_{V_V}) + 19.872 \right) \right)} - 1 \right) \right] \\
& + \left[-181.3316 \left(\frac{2}{1 + \exp \left(-2 \left((-18.3439x_1 - 0.0673x_2 - 0.1135P_{T_{amb}} + 0.0692x_3 - 0.7372P_{G_b} - 0.0924P_{V_V}) + 5.7643 \right) \right)} - 1 \right) \right] \\
& + \left[0.1543 \left(\frac{2}{1 + \exp \left(-2 \left((-2.1297x_1 - 1.601x_2 - 0.8397P_{T_{amb}} + 1.1002x_3 - 4.685P_{G_b} - 0.4838P_{V_V}) + 4.0869 \right) \right)} - 1 \right) \right] \\
& + \left[-181.1343 \left(\frac{2}{1 + \exp \left(-2 \left((10.7837x_1 + 0.092x_2 + 0.1498P_{T_{amb}} - 6.5612x_3 + 0.513P_{G_b} + 0.5177P_{V_V}) - 4.7349 \right) \right)} - 1 \right) \right] \\
& - 180.6629 \tag{12}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \min (f_{(x_1, x_2, x_3)}) = -\eta_{t,desired} + \\
& \left[0.2787 \left(\frac{1}{1 + \exp \left(- \left((5.3164x_1 - 4.3032x_2 + 3.1458P_{T_{amb}} - 1.2292x_3 + 6.8675P_{G_b} - 2.9352P_{V_V}) - 1.1077 \right) \right)} \right) \right] + \\
& \left[-0.1874 \left(\frac{1}{1 + \exp \left(- \left((3.8213x_1 + 0.2081x_2 + 3.3329P_{T_{amb}} - 3.9588x_3 + 11.6265P_{G_b} - 7.897P_{V_V}) - 3.592 \right) \right)} \right) \right] + \\
& \left[-0.2392 \left(\frac{1}{1 + \exp \left(- \left((10.862x_1 - 3.4970x_2 + 0.6304P_{T_{amb}} - 4.0406x_3 + 5.599P_{G_b} + 6.9278P_{V_V}) - 13.8552 \right) \right)} \right) \right] + \\
& \left[-153.2429 \left(\frac{1}{1 + \exp \left(- \left((-18.799x_1 + 0.0009x_2 + 0.37P_{T_{amb}} - 12.0746x_3 + 0.3941P_{G_b} + 0.5809P_{V_V}) - 3.9744 \right) \right)} \right) \right] + \\
& 0.4482 \tag{13}
\end{aligned}$$

donde x representa el valor de la variable de entrada a optimizar, los valores de la Ecuación 12 y la Ecuación 13 fueron reemplazados por pesos y bias que se dan en la **Tabla 4.6** y la **Tabla 4.7**, respectivamente, en la parte de los resultados en el **Capítulo 4**.

Las ecuaciones de restricción de desigualdad se expresan mediante ecuaciones (14-16).

$$44 \leq x_1 \text{ (Ángulo de borde)} \leq 91 \tag{14}$$

$$27.75 \leq x_2 \text{ (Temperatura de entrada)} \leq 86.29 \tag{15}$$

$$0.6 \leq x_3 \text{ (Flujo volumetrico)} \leq 6.20 \tag{16}$$

3.3. Métodos metaheurísticos para resolver la función multivariable

El modelo ANNi propuesto inicialmente a una variable optimizar a la vez en el menor tiempo posible, lo que era factible el uso de algoritmos de optimización simples [262]. Sin

embargo, para resolver una función multivariable rápidamente, es necesario utilizar algoritmos de optimización más avanzados. Algoritmos metaheurísticos desarrollados para resolver problemas complejos de optimización, destacando los resultados obtenidos con un tiempo de cálculo razonable y una precisión aceptable [263]. Por este motivo, en este trabajo se aplicaron dos algoritmos metaheurísticos diferentes: algoritmos genéticos (GA) y optimización de enjambres de partículas (PSO). A continuación, se describen los algoritmos metaheurísticos utilizados para resolver la función, así como sus respectivos pseudocódigos.

3.4. Algoritmo Genético (GA)

El algoritmo genético se presenta como un método estocástico basado en la genética natural [264]. Por sus características de adaptabilidad y paralelismo, el GA se considera una herramienta de optimización capaz de encontrar soluciones con un nivel aceptable. Se inicia con una población de individuos al azar (cromosomas) y está sujeta a la creación de esta población al azar. En cada generación, los individuos son evaluados asignándoles un grado de aptitud. Para finalizar el algoritmo genético, los criterios vienen dados por el número de edades evaluadas o el grado de aptitud encontrado. La AG se aplicó en el campo de la informática, pero actualmente puede diseñar y optimizar sistemas de energía renovable [265,266]. La **Tabla 3.1.** muestra el pseudocódigo y los parámetros GA para resolver la función propuesta por el modelo ANNi.

Tabla 3.1. Pseudocódigo y parámetros utilizados para desarrollar el algoritmo genético

Algorithm Genetic Algorithm	
1:	Initial population $Pob^n = 100$
2:	for $g = 1$ to $Gen^n = 250$ do
3:	for $i = 1$ to Pob^n do
4:	Individual fitness $i = \{T_{out-sim} - T_{out-exp}\}$
5:	end for
6:	move the best fitness to population $g + 1$
7:	for $i = 2$ to Pob^n do
8:	two individuals' selection
9:	Apply crossover to create two new individuals
10:	Apply mutate at the remaining population
11:	end for
12:	move new individual, mutate and crossed to population $(g + 1)$
13:	end for
Simulation Parameter	
Parameters	Value

Generations (Gen ⁿ)	250
Population (Pob ⁿ)	100
Mutation	Uniform
Crossover	Uniform
Selection	Random

3.5. Optimización de enjambre de partículas (PSO)

La optimización del enjambre de partículas es un algoritmo de optimización inspirado en el comportamiento de las aves, principalmente en su entorno social [267]. La optimización del enjambre de partículas se realiza de forma iterativa. Cada partícula (una posible solución) tiene información de posición y velocidad, que comparte con las otras partículas en busca del valor óptimo. Sus aplicaciones tienen repercusiones importantes en los sistemas de energías renovables, demostrando su capacidad para resolver problemas de optimización [268,269]. La **Tabla 3.2.** muestra el pseudocódigo y los parámetros de PSO para abordar la función propuesta por el modelo ANNi.

Tabla 3.2. Pseudocódigo y parámetros utilizados para desarrollar la optimización del enjambre de partículas.

Algorithm Particle Swarm Optimization	
1: Initialization for particle 1 to N	
Initialize the position $\mathbf{x}_i(0) \forall i \in 1:N$	
Initialize particle best position to initial position $\mathbf{p}_i(0) = \mathbf{x}_i(0)$	
Calculate the fitness of each particle and if $f(\mathbf{x}_j(0)) \geq f(\mathbf{x}_i(0)) \forall i \neq j$ initialize the global best as $\mathbf{g} = \mathbf{x}_j(0)$	
2: while stopping criteria is not reached	
3: Update velocity by particle use equation (1):	
$\mathbf{v}_i(t+1) = \mathbf{v}_i(t) + c_1(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i(t)) \mathbf{R}_1 + c_2(\mathbf{g} - \mathbf{x}_i(t)) \mathbf{R}_2$	(1)
4: Update the particle position use equation (2):	
$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t+1)$	(2)
5: Evaluate fitness of the particle $f(\mathbf{x}_i(t+1))$	
6: if $f(\mathbf{x}_i(t+1)) \geq f(\mathbf{p}_i)$, update particular best: $\mathbf{p}_i = \mathbf{x}_i(t+1)$	
7: if $f(\mathbf{x}_i(t+1)) \geq f(\mathbf{g})$, update global best: $\mathbf{g} = \mathbf{x}_i(t+1)$	
8: end. The best solution is presented at the end of the iterative process by \mathbf{g}	
Simulation Parameter	
Parameters	Value
Steps (n ^s)	100
Particles (N)	250
Cognitive parameter (c1)	1
Social parameter (c2)	2
Minima Inertia weight (w1)	0.9
Maxima Inertia weight (w2)	0.2

CAPÍTULO 4. Resultados del desarrollo y validación experimental del modelo computacional de simulación y optimización

En el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) se instaló y operó un conjunto de cinco colectores solares de canal parabólico, ubicados con las coordenadas 18.84 ° Latitud Norte y 99.2356 ° Longitud Oeste; tres de los cuales tenían un ángulo de borde de 90 ° y dos tenían un ángulo de 45 °. El diagrama esquemático del CCP experimental se muestra en la **Figura 4.1**, y los detalles geométricos de cada uno están en la **Tabla 4.1**.

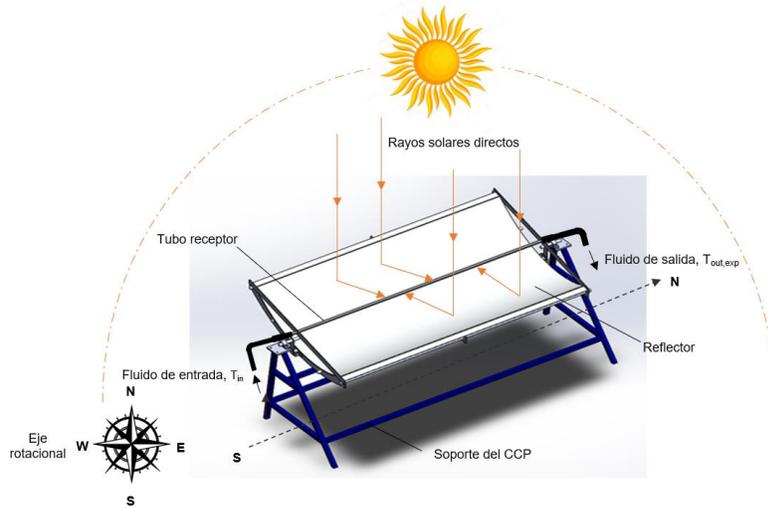


Figura 4.1. Diagrama de un CCP experimental

Tabla 4.1. Diseño de parámetros CCP con un ángulo de llanta de 45 ° y 90 °.

Parámetros del colector	Simbología	Valor de CCP-90 °	Valor de CCP-45 °	Unidad
Área de apertura	A_a	2.594	2.896	[m ²]
Ancho de apertura	W_a	1.063	1.187	[m]
Concentración ratio	C	13.33	14.87	[-]
Longitud focal	f	0.266	0.716	[m]
Largo	L	2.44	2.44	[m]
Receptor de diámetro externo	D_{ext}	2.54	2.54	[cm]
Receptor de diámetro interno	D_i	2.32	2.32	[cm]
Ángulo de borde	φ_r	90	45	[°]

El tubo absorbente era de cobre comercial de 1 pulgada (2,54 cm), con una pintura selectiva negra Zynolyte. Venegas-Reyes [270] informó los detalles del diseño, construcción, eficiencia óptica y factor de interceptación del PTC 45 °, y Jaramillo [271] publicó los que corresponden al CCP 90 °. Para obtener la máxima incidencia de energía proporcionada por el sol, el CCP se rotó sobre un eje horizontal Este-Oeste con un ajuste en el plano Norte-Sur para minimizar el ángulo de incidencia.

La **Figura 4.2** muestra el sistema experimental que estaba compuesto por un conjunto de 5 CCPs para proporcionar agua precalentada para la caracterización del CCP y actuar como almacenamiento de calor al mismo tiempo. Un tanque de almacenamiento térmico de 120 L, un sistema eléctrico de calentamiento de agua (con control automático de temperatura) y un circuito hidráulico. Puede proporcionar agua caliente en un rango de temperatura desde ambiente hasta 90 ± 1.0 ° C.

Al comienzo del ciclo de funcionamiento, el agua del tanque de almacenamiento se calentó mediante resistencias eléctricas de 3 y 6 kW. La temperatura está regulada por el sistema de control de temperatura, cuya retroalimentación es un termopar ubicado en el tanque. Posteriormente, el fluido de trabajo precalentado se alimenta al tubo receptor del CCP mediante una bomba centrífuga de 1/2 hp, manteniendo un flujo constante proporcionado por la regulación de las válvulas de cierre. El caudal se controla mediante una válvula de aguja y se monitoriza mediante el caudalímetro Headland serie HB2800 (con una precisión de $\pm 0,1\%$). También se observan temperatura y presión a la salida del tanque de almacenamiento. El agua se puede recircular al tanque de almacenamiento para aumentar la velocidad de calentamiento y obtener una temperatura más uniforme (abriendo la válvula V7 y cerrando V9 y V10). Una vez que se alcanza la temperatura deseada en el tanque térmico, se abren V9 y V10 (este último para permitir que entre agua fresca a temperatura ambiente en el tanque), y se cierra V7. El sistema está equipado con termopares tipo T (una precisión de $\pm 0,5$ ° C para un rango de funcionamiento de 0 a 120 ° C) debidamente calibrados para medir las temperaturas en la entrada y salida del CCP, así como la temperatura ambiente. También se instala un anemómetro para medir la velocidad del viento (sensor de velocidad y dirección del viento RM Young Wind Sentry. CS3001 con una precisión de ± 0.5 m / s). Para medir la radiación del haz solar se utilizó un pirheliómetro Eppley, NIP (con una precisión de $\pm 2\%$).

Las mediciones de temperatura, flujo y otros parámetros mencionados anteriormente, incluida la fecha y la hora, se registraron utilizando una tarjeta de adquisición de datos Agilent Technologies 34970A (6½ dígitos) con tarjeta multiplexora HP34901A y una computadora personal.

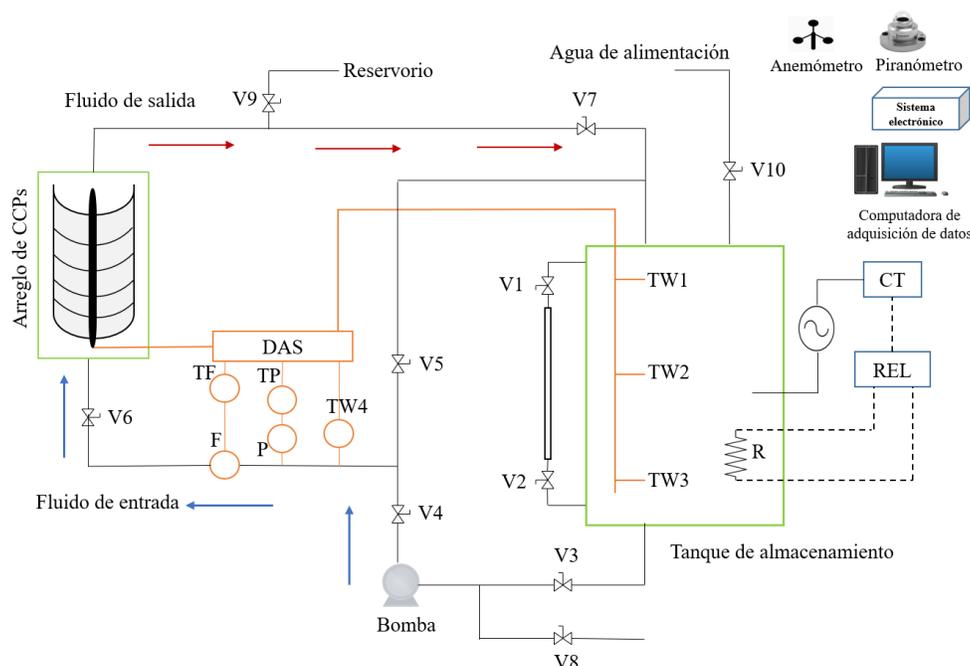


Figura 4.2. Esquema del ciclo hidráulico diseñado del sistema experimental

Se llevaron a cabo varias pruebas experimentales para seis caudales de 1 LPM (litros por minuto) a 6 LPM y a diferentes temperaturas de entrada (27, 30, 50, 68, 70, 80 y 86 °C) en mayo, diciembre y enero. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo una hora al mediodía durante ocho días y con una frecuencia de adquisición de datos de 5 segundos. La **Tabla 4.2** muestra el rango de variables operativas experimentales de entrada y salida.

Tabla 4.2. Intervalo de condiciones de operación de entrada y salida experimentales

Variables experimentales	Intervalo de Trabajo	Unidad
Entradas		
Ángulo de borde (φ_r)	45-90	[°]
Temperatura de entrada (T_{in})	27.75-86.29	[°C]
Temperatura ambiental (T_{amb})	24.62-36.60	[°C]
Flujo volumétrico (F_w)	0.69-6.19	[l/min]

Radiación solar (G_b)	653.80-1014.00	[W/m ²]
Velocidad del viento (V_v)	0.93-3.98	[m/s]
Salida		
Eficiencia térmica ($\eta_{t,exp}$)	0.1728-0.7392	[-]

4.1. Aplicación directa del modelo de red neural

Se desarrolla una red neuronal de retropropagación de retroalimentación (BPNN por sus siglas en inglés) con tres capas (capa de entrada, capa oculta y capa de salida) para predecir la eficiencia térmica del CCP para mejorar su rendimiento. La capa de entrada incluía seis variables como argumentos de entrada: φ_r , T_{in} , T_{amb} , F_w , G_b , y V_v . El intervalo de variables de entrada presentado en la **Tabla 4.2**. La **Figura 4.3** muestra con más detalle el diagrama de bloques de la metodología de simulación y optimización aplicada para obtener la eficiencia térmica del CCP; que comprende un conjunto de CCP con su respectiva instrumentación y registrador de datos (1), un proceso de entrenamiento y aprendizaje de la red neuronal artificial (2), un modelo final de la red neuronal artificial capaz de simular la eficiencia térmica del CCP (3), un proceso de inversión del modelo ANN (4), y finalmente un proceso de optimización (5).

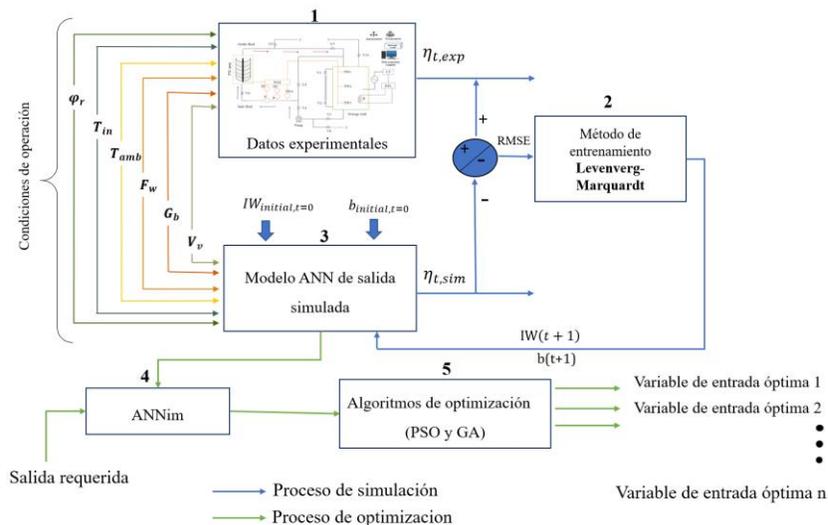


Figura 4.3. Diagrama de bloques para la metodología de simulación y optimización de la CCP térmica

Para el entrenamiento, las variables de entrada se normalizaron en un intervalo de 0.1 a 0.9 (según la ecuación 7). El conjunto de 2340 pruebas experimentales se dividió en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, donde cada uno contenía 60%, 20% y 20% de muestras seleccionadas al azar, respectivamente. Estos conjuntos de datos fueron suficientes para entrenar y probar el modelo ANN. El algoritmo de aprendizaje utilizado en la formulación del modelo fue Levenberg-Marquardt (LM), considerando las funciones de transferencia *Tansig* y *Logsig* para la capa oculta y una capa de salida de función lineal *Purelin*.

La selección de neuronas en la capa oculta y la función de transferencia utilizada pueden afectar significativamente el rendimiento de la red. Para desarrollar un modelo ANN óptimo es recomendable encontrar un número mínimo de neuronas en la capa oculta que permita obtener un valor de error mínimo entre el valor de salida deseado y el valor simulado, además de obtener un número menor de coeficientes. Por lo tanto, se realizó un análisis estadístico de la arquitectura de la red en un rango de 1 a 4 neuronas en la capa oculta utilizando las funciones de transferencia *Tansig* y *Logsig* para determinar el número óptimo de neuronas ocultas y la función de transferencia adecuada. Los resultados están en las **Tablas 4.3 y Tabla 4.4**.

Tabla 4.3. Resultados de la red ANN utilizando la función *Tansig* en la capa oculta

Arquitectura ANN	RMSE	R ²	R	MAPE %	Ecuación línea de regresión
6-1-1	0.0419	0.7706	0.8778	7.6678	$\eta_{t,sim} = 0.7706 \eta_{t,exp} + 0.1125$
6-2-1	0.0283	0.8951	0.9461	4.4295	$\eta_{t,sim} = 0.8938 \eta_{t,exp} + 0.0522$
6-3-1	0.0220	0.9366	0.9678	3.2050	$\eta_{t,sim} = 0.9350 \eta_{t,exp} + 0.0320$
6-4-1	0.0193	0.9511	0.9753	2.7602	$\eta_{t,sim} = 0.9514 \eta_{t,exp} + 0.0239$

Tabla 4.4. Resultados de la red ANN usando la función *Logsig* en la capa oculta

Arquitectura ANN	RMSE	R ²	R	MAPE %	Ecuación línea de regresión
6-1-1	0.0419	0.7706	0.8778	7.6682	$\eta_{t,sim} = 0.7706 \eta_{t,exp} + 0.1125$
6-2-1	0.0283	0.8950	0.9461	4.4308	$\eta_{t,sim} = 0.8938 \eta_{t,exp} + 0.0521$
6-3-1	0.0219	0.9372	0.9681	3.1726	$\eta_{t,sim} = 0.9378 \eta_{t,exp} + 0.0306$
6-4-1	0.0193	0.9511	0.9753	2.6733	$\eta_{t,sim} = 0.9507 \eta_{t,exp} + 0.0242$

Como puede verse, el modelo ANN de cuatro nodos en la capa oculta para ambas funciones de transferencia es el mejor modelo entre otros debido al valor más alto de R^2 (0.9511) y al valor más bajo de RMSE (0.0193). Por lo tanto, los modelos óptimos obtenidos fueron *Tansig* y *Logsig* con la arquitectura (6-4-1). En el que la arquitectura ANN del presente estudio logra un R^2 cercano a 1 para varias neuronas en la capa oculta muy inferior al logrado por los estudios presentados por [34,37,175]. Se realizó la precisión de ambos modelos ANN, la prueba de linealidad (prueba pendiente de intercepción) con 99% de confianza. Los resultados se encuentran en la **Tabla 4.5**, que indica que los modelos son adecuados para describir el comportamiento de CCP, considerando que la pendiente = 1 y la intersección = 0.

Tabla 4.5. Resultados del análisis estadístico con la prueba de pendiente de intersección

Arquitectura ANN	RMSE	R^2	Función de transferencia en la capa oculta	Prueba de pendiente intercepción (99% de confianza)			
				Intercepto bajo	Intercepto superior	Pendiente bajo	Pendiente superior
6-4-1	0.0193	0.9511	TANSIG	0.0182	0.0296	0.9399	0.9629
6-4-1	0.0193	0.9511	LOGSIG	0.0185	0.0299	0.9392	0.9622

De acuerdo con la función de transferencia, el modelo propuesto se puede representar analíticamente por el siguiente par de ecuaciones:

El modelo con función *Tansig* viene dado por:

$$T_{out,sim} = \sum_{s=1}^S \left[LW_{(l,s)} \left(\frac{2}{1 + \exp \left(-2 \left(\sum_{k=1}^K (IW_{s,k} P_{i,N}) + b_{1(s)} \right) \right)} - 1 \right) \right] + b_{2(l)} \quad (17)$$

El modelo con la función *Logsig* viene dado por:

$$T_{out,sim} = \sum_{s=1}^S \left[LW_{(l,s)} \left(\frac{1}{1 + \exp \left(- \left(\sum_{k=1}^K (IW_{(s,k)} P_{i,N}) + b_{1(s)} \right) \right)} \right) \right] + b_{2(l)} \quad (18)$$

donde s es el número de neuronas en la capa oculta ($S = 2$), k es el número de neuronas en la capa de entrada ($K = 6$), $IW_{(s,k)}$ son pesos y $b_{1(s)}$ son las bias. Las **Tablas 4.6** y **4.7** muestran valores de pesos y sesgos obtenidos durante el entrenamiento para la función *Tansig* y *Logsig*, respectivamente.

Tabla 4.6. Los pesos y bias del modelo ANN para la función *Tansig* en la capa oculta

Número de Neuronas (s)	Pesos						Bias		
	Capa oculta ($S = 2, K = 6$), $IW_{s,k}$						Capa de salida, ($l = 1$)	$b_{1(s)}$	$b_{2(l)}$
	φ_r ($k = 1$)	T_{in} ($k = 2$)	T_{amb} ($k = 3$)	F_w ($k = 4$)	G_b ($k = 5$)	V_v ($k = 6$)	$LW_{1,s}$		
1	-16.5515	0.0917	0.1512	-6.5693	0.5147	0.5166	180.9133	19.8720	
2	-18.3439	-0.0673	-0.1135	0.0692	-0.7372	-0.0924	-181.3316	5.7643	
3	-2.1297	-1.6010	-0.8397	1.1002	-4.6850	-0.4838	0.1543	4.0869	-180.6629
4	10.7837	0.0920	0.1498	-6.5612	0.5130	0.5177	-181.1343	-4.7349	

Tabla 4.7. Los pesos y bias del modelo ANN para la función *Logsig* en la capa oculta

Número de Neuronas (s)	Pesos						Bias		
	Capa oculta ($S = 2, K = 6$), $IW_{s,k}$						Capa de salida, ($l = 1$)	$b_{1(s)}$	$b_{2(l)}$
	φ_r ($k = 1$)	T_{in} ($k = 2$)	T_{amb} ($k = 3$)	F_w ($k = 4$)	G_b ($k = 5$)	V_v ($k = 6$)	$LW_{1,s}$		
1	5.3164	-4.3032	3.1458	-1.2292	6.8675	-2.9352	0.2787	-1.1077	
2	3.8213	0.2081	3.3329	-3.9588	11.6265	-7.8970	-0.1874	-3.5920	
3	10.8620	3.4970	0.6304	-4.0406	5.5990	6.9278	-0.2392	-13.8552	0.4482
4	-18.7990	0.0009	0.3700	-12.0746	0.3941	0.5809	-153.2429	-3.9744	

4.2. Los resultados del análisis de sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad se utilizó la ecuación de Garson [259], que determina la importancia de las variables de entrada sobre los modelos *Tansig* y *Logsig* obtenidos. Como es bien sabido, los pesos son los coeficientes de conexión entre neuronas artificiales, que son análogos a la sinapsis entre axones y dendritas en neuronas biológicas. Por lo tanto, cada peso decide la proporción de la señal entrante transmitida al cuerpo de la neurona [272]. La **Figura 4.4.** muestra la importancia relativa de las variables de entrada de ambas modelos calculadas por la Ecuación. 11 y usando los pesos de la **Tabla 4.6** y **4.7.**

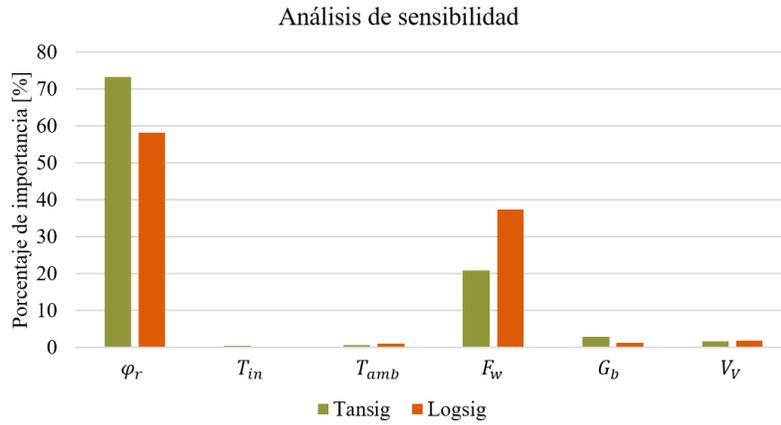


Figura 4.4. La importancia relativa de las variables de entrada en el valor de eficiencia térmica del CCP

Puede parecer que las contribuciones son casi iguales para ambos modelos siendo el φ_r más alto con un 58%, seguido por F_w con un 37%. Tanto G_b como V_v tienen la misma influencia en el sistema con un 1,5%. T_{amb} y T_{in} representan menos influencia en el modelo. En ambos casos, se puede confirmar que la mayor contribución se obtuvo con un ángulo de borde. Además, la importancia relativa de las variables de entrada depende principalmente de las ponderaciones del modelo ANN. Por lo tanto, el entrenamiento aleatorio de los dos modelos con las dos funciones de activación diferentes afecta significativamente los resultados del análisis de sensibilidad, lo que dificulta la diferenciación. Aunque el método de Garson podría cuantificar la influencia de los parámetros y si una variable es más significativa que otra, no pudo distinguir con precisión el efecto de la correlación entre los parámetros de entrada. Como los pesos y las bias son parte de la red neuronal, el método de Garson ignora las bias y las funciones de activación.

En condiciones de estado estacionario, el calor útil suministrado por un colector solar es igual a la energía absorbida por el fluido caloportador menos las pérdidas de calor directas e indirectas de la superficie circundante. También se obtiene mediante la primera ley de la termodinámica dada por la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo y el caudal másico que circula por el colector [12].

$$\dot{Q}u = \dot{m}.Cp.(T_{out} - T_{in}) \quad (19)$$

donde \dot{m} (kg/s) es el caudal másico del fluido. C_p ($J/kg.K$) es el calor específico a una presión constante del líquido. T_{in} y T_{out} son las temperaturas de entrada y salida del tubo receptor, respectivamente.

La eficiencia térmica del CCP según la Primera Ley de la Termodinámica viene dada por:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_s} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A_a \cdot G_b} \quad (20)$$

donde \dot{Q}_s (W) es la radiación del haz solar recogida por el área de apertura del CCP y A_a (m^2) es el área de apertura. Además, es fundamental mencionar que la eficiencia térmica del CCP depende del calor útil (\dot{Q}_u), expresado con la temperatura de entrada y salida del fluido de transferencia de calor que pasa por dentro del tubo absorbedor. Por lo tanto, al mejorar la ganancia de calor útil, se mejora la eficiencia térmica del CCP, lo que conduce a una mejora en el rendimiento del CCP. Además, al optimizar los otros parámetros de entrada incluidos implícitamente en la ecuación. 15 para la eficiencia térmica del CCP deseada, se logrará el mejor rendimiento térmico. Este último se puede lograr mediante el acoplamiento de la inversa del modelo ANN con los dos algoritmos de optimización propuestos en este trabajo, y están escritos en **Capítulo 2**. Posteriormente, los resultados de la optimización se utilizarán para monitorear y controlar el sistema CCP en tiempo real.

Por otro lado, de acuerdo con Kalogirou [273], Duffie y W. Beckman [11], Güven y Bannerot [109], el rendimiento térmico de colectores solares también se puede determinar por el análisis detallado de las características ópticas y térmicas de la materiales y el diseño de colector o por pruebas de rendimiento experimental en condiciones de control del colector. La eficiencia térmica de los concentradores viene dada por:

$$\eta_t = F_R \left[\eta_o - \frac{U_L}{C} \left(\frac{\Delta T}{G_b} \right) \right] = A - B \frac{\Delta T}{G_b} \quad (\%) \quad (21)$$

donde $A = F_R \eta_o$ y $B = F_R \frac{U_L}{C}$. Es importante indicar que para un colector que opera bajo irradiación constante y caudal de fluido, $F_R \eta_o$ y $F_R \frac{U_L}{C}$ son casi constantes [273]. C es la relación de concentración ($C = \frac{A_a}{A_r}$), G_b es la radiación solar directa, A_r es el área del

receptor, F_R es el factor de remoción, U_L es el coeficiente de pérdida global, η_o es la eficiencia óptica y $\Delta T = T_{in} - T_a$ es el aumento de temperatura en el receptor. El análisis del modelo térmico (Ec. 21) de este sistema se informa con más detalle en el estudio [270]. En consecuencia, la ecuación 20 se utiliza en este estudio para calcular la eficiencia térmica.

Las **Figuras 4.5a y 4.5b** muestran una comparación entre la eficiencia térmica experimental ($\eta_{t_{exp}}$) y el valor de eficiencia térmica simulada ($\eta_{t_{sim}}$) obtenido por el modelo ANN desarrollado, donde una correlación satisfactoria con un coeficiente de determinación igual a 0.9511 para se pueden observar ambos modelos.

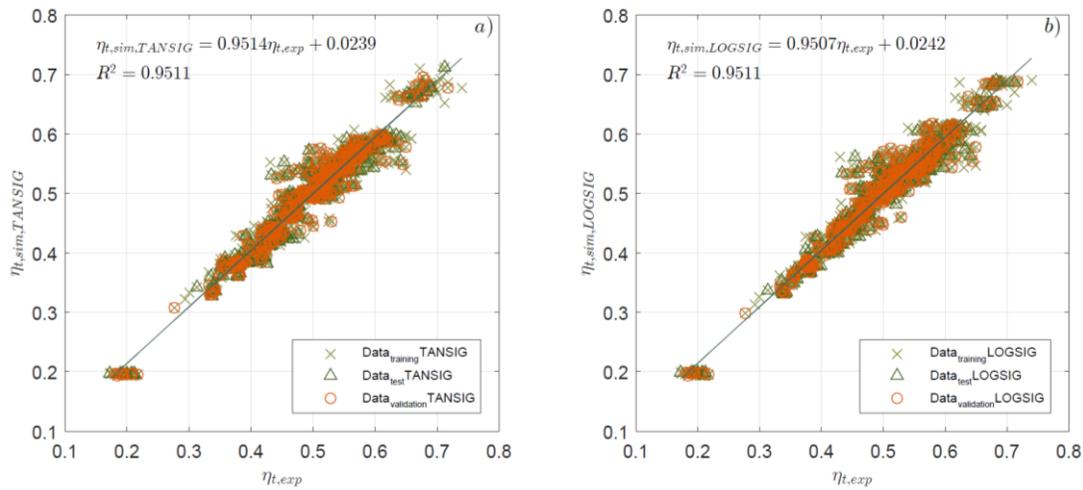


Figura 4.5. Comparación estadística entre eficiencia térmica simulada y experimental

4.3. Los resultados de ANNim-GA y ANNim-PSO

Las funciones *Tansig* y *Logsig* se evaluaron y compararon en el enfoque del modelo ANNi (6 neuronas de entrada, 4 neuronas en la capa oculta y 1 neurona de salida), ambas programadas para resolver con los dos algoritmos metaheurísticos. Las **Tablas 4.8 y 4.9** muestran los errores y el tiempo de cálculo al optimizar una prueba aleatoria aplicando la función *Tansig* y *Logsig*, respectivamente. Adicionalmente, se muestra la forma gradual de realizar la optimización, encontrando desde una variable hasta encontrar el total de variables de entrada.

Tabla 4.8. Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos del modelo ANNim aplicando la función *Tansig*

Datos experimentales	$\varphi_r [^\circ]$	$T_{in} [^\circ C]$	$T_{amb} [^\circ C]$	$F_w [l/min]$	$G_b [W/m^2]$	$V_V [m/s]$	$\eta_{t,exp}$	MAPE (% error)	Tiempo de computación (s)
	90	29.372	33.0659	6.1388	712.5	2.078	0.7088		
ANNim-GA									
1	90.00						0.7088	0.000	0.0360
2	90.00	27.7858					0.7122	2.7001	0.8690
3	90.00	33.3713	28.00				0.6674	9.6455	0.8634
4	90.00	20.9741	27.1591	5.2620			0.6236	15.1845	0.8366
5	86.830	22.7164	30.8748	1.1104	713.9143		0.7478	22.2792	1.8029
6	89.77	31.9733	33.6811	2.1095	603.0615	1.2280	0.7387	22.1030	1.6024
ANNim-PSO									
1	90						0.7088	0	3.0449
2	90	26.8900					0.7122	4.2251	5.2622
3	90	34.7459	35.0000				0.7085	6.3325	7.5660
4	90	27.76	35.000	6.00			0.7255	3.2798	9.8604
5	90	29.3477	35.00	5.9677	621.2399		0.7087	0.1069	13.0801
6	90	27.2884	33.3732	4.8597	702.3047	1.5322	0.7147	3.9605	14.3998

Tabla 4.9. Comparación entre los datos experimentales y los obtenidos del modelo ANNim aplicando la función *Logsig*

Experimental data	$\varphi_r [^\circ]$	$T_{in} [^\circ C]$	$T_{amb} [^\circ C]$	$F_w [l/min]$	$G_b [W/m^2]$	$V_V [m/s]$	$\eta_{t,exp}$	MAPE (% error)	Computing Time (s)
	90	29.372	33.0659	6.1388	712.5	2.078	0.7088		
ANNim-GA									
1	90.00						0.6870	0.000	1.5999
2	90.00	29.000					0.6873	0.6332	1.0600
3	90.00	33.7383	22.00				0.6792	16.1105	0.7275
4	89.00	21.00	34.66	5.778			0.6769	10.0781	0.7395
5	90.00	35.1328	32.1103	4.0507	554.000		0.6825	15.7527	0.7548
6	90.00	44.6777	31.0196	6.7969	610.000	1.6152	0.6856	17.6129	0.7906
ANNim-PSO									
1	90						0.6870	0	2.9031
2	90	29.3100					0.6870	0.1055	5.1870
3	90	34.7459	35.0000				0.6715	8.0484	7.5660
4	90	24.000	24.000	4.3588			0.6870	18.675	9.8912
5	90	33.9027	30.7653	6.00	714.9210		0.6870	4.9967	12.3263
6	90	24.000	25.600	6.000	646.34	2.4200	0.6842	11.4785	14.5639

De acuerdo con los valores de respuesta obtenidos, se observó que la función *Tansig* es mejor para el modelo ANNi. El menor error al comparar el valor experimental y el obtenido por ANNim-PSO fue de 3.96%, con un tiempo de cálculo de 14.39 s. Por otro lado, aplicando ANNim-GA, el error mínimo fue de 22.10% con un tiempo de cálculo de 1.60 s, logrando en ambos algoritmos de optimización la búsqueda de todas las variables de entrada del CCP. Por este motivo, se aplica la función *Tansig* con PSO para mejorar la eficiencia térmica a través de tres pruebas experimentales. La **Tabla 4.10** menciona las condiciones de tres pruebas experimentales seleccionadas aleatoriamente para utilizar la metodología ANNim-PSO. Las variables de entrada para optimizar en los experimentos son φ_r , T_{in} , and F_w . La elección de estas variables se debe a que el operador puede controlarlas. El resto de las variables permanecen fijas ya que dependen de las condiciones climáticas de la región. La optimización se realizó de forma paulatina: encontrando una variable a la vez, dos variables al mismo tiempo y tres variables al mismo tiempo, para analizar qué combinación de variables permite incrementar la eficiencia térmica.

Tabla 4.10. Pruebas de datos experimentales para optimizar con ANNim-PSO

<i>Entradas</i>	<i>1^{era} Prueba</i>	<i>2nd Prueba</i>	<i>3rd Prueba</i>
φ_r [°]	90.00	90.000	45.000
T_{in} [°C]	29.3720	51.8621	67.9173
T_{amb} [°C]	33.0659	33.3571	27.4595
F_w [l/min]	6.1389	6.000	1.000
G_b [W/m ²]	712.500	743.7000	869.000
V_v [m/s]	2.0780	2.1410	1.5520
<i>Salida</i>			
$\eta_{t,exp}$	0.7086	0.5884	0.3291

La **Tabla 4.11.** demuestra la aplicación del modelo ANNim-PSO para las tres pruebas de datos experimentales optimizando solo una variable a la vez. En el ensayo 1, realizar el cambio de ángulo de la llanta de 90° a 44.86° produce un aumento negativo de la eficiencia térmica (-42.33%), lo que demuestra que el ángulo experimental de borde es óptimo. Se obtuvo un aumento de la eficiencia térmica (0.73%) para la temperatura de entrada al disminuir de 29.37 °C a 27 °C. Para el caudal volumétrico de agua, el aumento de la eficiencia térmica (0.90%) fue posible aumentando de 6.13 L/min a 6.17 L/min. En el ensayo 2, al igual que el ensayo anterior, al realizar el cambio de ángulo de borde de 90° a 45,16° se produjo

un incremento negativo de la eficiencia térmica (-16.99%). Se obtuvo un aumento de la eficiencia térmica (15.05%) para la temperatura de entrada al disminuir de 51.86 °C a 27 °C. Para el caudal volumétrico de agua, el aumento de la eficiencia térmica (1.97) fue posible aumentando de 6.0 L/min a 6.09 L/min. En la prueba 3, se confirma que operar con un ángulo de borde de 90° aumenta la eficiencia térmica (54.78%) porque ahora el ángulo de borde experimental comenzó con 45° y cambió a 85.72°. Se obtuvo un aumento de la eficiencia térmica (27.62%) para la temperatura de entrada al disminuir de 67.91 °C a 31.59 °C. El aumento de la eficiencia térmica (51.92%) fue posible para el caudal volumétrico de agua aumentando de 1 L/min a 5.57 L/min. Esta prueba específica obtuvo incrementos más significativos en la eficiencia térmica debido a que los parámetros experimentales fueron inadecuados.

Tabla 4.11. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del CCP optimizando una variable a la vez en las tres pruebas experimentales

Variable	Datos experimentales	Optimización ANNim-PSO		
		φ_r	T_{in}	F_w
	Test 1			
φ_r (°)	90	44.8648	90	90
T_{in} (°C)	29.3720	29.3720	27	29.3720
F_w (l/min)	6.1389	6.1389	6.1389	6.1763
η_t	0.7086	0.4086	0.7138	0.7150
Δ Eficiencia (%)		-42.33	0.73	0.90
Tiempo de computación (s)		34.4287	33.4570	30.7727
	Test 2			
φ_r (°)	90	45.1657	90	90
T_{in} (°C)	51.8621	51.8621	27	51.8621
F_w (l/min)	6	6	6	6.09
η_t	0.5884	0.4884	0.6770	0.6000
Δ Eficiencia (%)		-16.99	15.05	1.97
Tiempo de computación (s)		26.517	27.4618	25.9803
	Test 3			
φ_r (°)	45	85.7277	45	45
T_{in} (°C)	67.9173	67.9173	31.5915	67.9173
F_w (l/min)	1	1	1	5.5772
η_t	0.3291	0.5094	0.4200	0.5
Δ Eficiencia (%)		54.78	27.62	51.92
Tiempo de computación (s)		44.2920	47.3911	47.2700

La **Tabla 4.12.** demuestra la aplicación del modelo ANNim-PSO para las tres pruebas de datos experimentales optimizando dos variables a la vez. Las variables elegidas son la temperatura de entrada y el caudal volumétrico de agua porque el ángulo de la llanta opera solo en dos posiciones. A partir de la optimización de más de una variable a la vez, fue posible obtener hasta dos escenarios donde se incrementa la eficiencia térmica de cada prueba experimental. En la prueba 1, el aumento más significativo en la eficiencia térmica (1.60%) se obtiene en el segundo escenario al disminuir la temperatura de entrada de 29.37 °C a 28.99 °C y al mismo tiempo aumentar el caudal volumétrico de agua de 6.13 L/min a 6.20 L/min. En la prueba 2, al igual que en la prueba anterior, el aumento más significativo de la eficiencia térmica (10.46%) se produce en el segundo escenario cuando la temperatura de entrada disminuye de 51.86 °C a 43.17 °C y simultáneamente aumenta el caudal volumétrico de agua de 6.0 L/min a 6.19 L/min. En la prueba 3, al igual que las pruebas anteriores, el aumento más significativo de la eficiencia térmica (36.73%) se produce en el 2° escenario al disminuir la temperatura de entrada de 67.91 °C a 67.00 °C y simultáneamente aumentar el caudal volumétrico del agua. de 1.0 L/min a 2.32 l/min.

Tabla 4.12. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del CCP optimizando dos variables a la vez en las tres pruebas experimentales.

Variable	Datos experimentales	Optimización ANNim-PSO	
		T_{in} F_w	T_{in} F_w
	Test 1	1st	2nd
T_{in} (°C)	29.37	31.00	28.99
F_w (l/min)	6.14	6.190	6.20
η_t	0.71	0.71	0.72
Δ Eficiencia (%)		0.74	1.60
Tiempo de computación (s)		53.26	51.38
	Test 2		
T_{in} (°C)	51.86	50.91	43.17
F_w (l/min)	6	6.19	6.19
η_t	0.59	0.62	0.65
Δ Eficiencia (%)		5.37	10.46
Tiempo de computación (s)		49.28	51.50
	Test 3		
T_{in} (°C)	67.92	66.87	67.00
F_w (l/min)	1	1.45	2.32
η_t	0.33	0.40	0.45

Δ Eficiencia (%)	21.54	36.73
Tiempo de computación (s)	89.66	89.26

La **Tabla 4.13** demuestra la aplicación del modelo ANNim-PSO para las tres pruebas de datos experimentales optimizando tres variables a la vez. En la prueba 1, el aumento más significativo de la eficiencia térmica (4.43%) se produce en el segundo escenario al cambiar el ángulo de la llanta de 90° a 46.29°, aumentar la temperatura de entrada de 29.37 °C a 31.00 °C y disminuir el caudal volumétrico de agua de 6.13 L/min a 4.32 L/min, simultáneamente. En la prueba 2, al igual que en la prueba anterior, el aumento más significativo de la eficiencia térmica (18.96%) se produce en el 2° escenario al cambiar el ángulo de la llanta de 90° a 45.97°, aumentando la temperatura de entrada de 51.86 °C a 86.00 °C y disminuyendo el caudal volumétrico de agua de 6.00 L/min a 5.89 L/min, simultáneamente. En la prueba 3, el aumento más significativo de la eficiencia térmica (67.12%) se produce en el 2° escenario utilizando un ángulo de borde similar al experimental de 45° a 45.13°. A diferencia de las pruebas anteriores, la temperatura de entrada debe disminuirse de 67.91 °C a 46.41 °C y aumentar el caudal volumétrico de agua de 1.00 L/min a 4.06 L/min, simultáneamente. Adicionalmente, se observa que optimizando las tres variables simultáneamente se obtienen mejores resultados que optimizando una y dos variables simultáneamente.

Tabla 4.13. Aplicación del modelo ANNim-PSO para mejorar la eficiencia térmica del PTC optimizando tres variables a la vez en las tres pruebas experimentales

Variable	Datos experimentales	Optimización ANNim-PSO	
		φ_r T_{in} F_w	φ_r T_{in} F_w
	Test 1	1st	2nd
φ_r (°)	90.00	46.25	46.29
T_{in} (°C)	29.37	30.65	31.00
F_w (l/min)	6.14	1.85	4.33
η_t	0.71	0.72	0.74
Δ Eficiencia (%)		1.60	4.43
Tiempo de computación (s)		76.15	74.39
	Test 2		
φ_r (°)	90.00	45.6359	45.98
T_{in} (°C)	51.86	67.8306	86.00
F_w (l/min)	6	5.1489	5.89
η_t	0.6	0.6000	0.70
Δ Eficiencia (%)		1.97	18.96

Tiempo de computación (s)		68.29	71.4410
	Test 3		
φ_r (°)	45.00	44.91	45.14
T_{in} (°C)	67.92	47.54	46.42
F_w (l/min)	1	1.72	4.06
η_t	0.33	0.45	0.55
Δ Eficiencia (%)		36.73	67.12
Tiempo de computación (s)		129.82	129.77

Vale la pena señalar que los resultados de este trabajo son beneficiosos para los ingenieros de diseño, optimización y control de las plantas colectoras de colectores cilindro-parabólicos solares de pequeña escala para aplicaciones de calor de procesos industriales [205,207,209] y generación de vapor, que requieren una temperatura media.

Finalmente, la **Tabla 14** presenta una comparación entre otros modelos computacionales aplicados para optimizar el funcionamiento de los sistemas PTC en cuanto a su precisión computacional al validar con datos experimentales, demostrando que los modelos ANNim-PSO y ANNim-GA obtienen una buena precisión.

Tabla 4.14. Comparación de la potencia computacional de otros modelos y el presente trabajo

Referencias	Tipo de colector	Modelo de optimización	Exactitud computacional
Ghazouani y colaboradores [71]	Colector solar de canal parabólico pequeño (SPTC)	Método de optimización combinado de algoritmo genético de punto fijo	Obtienen una validación experimental con un error mínimo del 0,1%.
Ehyaey y colaboradores [161]	Colector solar de canal parabólico (PTC)	Optimización de enjambres multiobjetivo (MOPSO)	Obtienen una validación experimental con un error mínimo del 2,5%.
Cheng y colaboradores [73]	Colector solar de canal parabólico	Algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) y método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT).	Obtienen una validación experimental con un error mínimo de 0,0047% con PSO y 0,0029% con MCRT.
<i>Present work</i>	Colector solar de canal parabólico (PTC)	ANNim- PSO, ANNim -GA	Obtuvimos una validación experimental con un error mínimo de 0,000% utilizando PSO y GA.

CAPÍTULO 5. Conclusiones y perspectivas futuras

5.1 Conclusiones generales de los trabajos desarrollados

En el presente trabajo se desarrolló una nueva estrategia de optimización aplicada para incrementar la eficiencia térmica del CCP. Un modelo ANNim desarrollado puede ser utilizado para optimizar múltiples variables simultáneamente a partir de la resolución de la función objetivo mediante algoritmos metaheurísticos. El uso de coeficientes obtenidos de un modelo ANN es necesario para llevar a cabo la estrategia de optimización propuesta.

En este trabajo, un modelo ANN fue entrenado para simular la eficiencia térmica (η_t), considerando como variables de entrada: ángulo de borde (φ_r), temperatura de entrada (T_{in}), temperatura ambiente (T_{amb}), caudal de agua (F_w), radiación solar directa (G_b) y velocidad del viento (V_v). La mejor simulación obtenida por el modelo ANN fue al aplicar dos neuronas de capa oculta. Las funciones de transferencia *Logsig* y *Tansig* obtuvieron los mismos valores de coeficientes de determinación (0,9511). Por esta razón, ambas funciones se utilizan para llevar a cabo el enfoque del modelo ANNi.

Se utilizaron dos algoritmos de optimización para la resolución del proceso multivariable: algoritmos genéticos (GA) y optimización de enjambre de partículas (PSO). Se aplicó el acoplamiento de los modelos ANNim-GA y ANNim-PSO a una prueba aleatoria, demostrando mejores resultados con la función *Tansig* al optimizar simultáneamente todas las variables de entrada. Sin embargo, al comparar ambos algoritmos metaheurísticos, el PSO logra una mayor precisión entre los datos experimentales y optimizados (3.96%). Aun así, el GA realiza la búsqueda en un tiempo computacional más corto (1.60 s).

La elección de las variables a optimizar se basó en la capacidad a controlar por el operador. La optimización multivariable fue realizada de forma paulatina para encontrar valores óptimos que incrementaran la eficiencia térmica. Al optimizar una variable a la vez, el ángulo de la llanta tuvo un impacto significativo en la salida deseada. Tanto es así que el cambio de 45° a unos 90° generó un aumento de la eficiencia térmica del 54.78% en el CCP. Al optimizar dos variables simultáneamente, se obtiene la menor eficiencia térmica del 36.73% que al optimizar una variable simultáneamente, coincidiendo en las tendencias de temperatura de

entrada y caudal de agua para ambos escenarios de optimización. Al optimizar tres variables simultáneamente se obtiene una eficiencia térmica de 67.12%, superior a la que se consigue optimizando una y dos variables simultáneamente, manteniendo un ángulo de borde cercano a los 45° y diferentes condiciones de temperatura de entrada del caudal de agua.

Los resultados del análisis de sensibilidad en ambos modelos ANN (*Tansig-Logsig*) mostraron que el ángulo de borde y el caudal de agua tienen la influencia más significativa en el funcionamiento del CCP, con un valor de 58% y 37%, respectivamente. Este último se verifica al optimizar una variable a la vez, donde el ángulo de borde y el caudal volumétrico de agua obtienen el aumento más significativo de la eficiencia térmica (especialmente en la prueba 3).

Finalmente, se demostró que el método ANNim-PSO utilizado en este trabajo es factible y los resultados numéricos son confiables. También puede ser uno de los métodos de optimización modernos más desafiantes para la futura investigación de ingeniería térmica aplicada. Además, los dos modelos desarrollados en este estudio tienen potencial para ser implementados en sistemas inteligentes. También pueden ser utilizados para monitorear el control de las variables de entrada en tiempo real y lograr la salida deseada en los procesos de producción de vapor, así como aumentar la eficiencia energética térmica.

De acuerdo con el estudio de las diferentes formas para el mejoramiento del rendimiento térmico de CCP a lo largo de las cuatro décadas presentado en el **Capítulo 3** se puede concluir que el desempeño de los estudios experimentales es más confiable que otros. Sin embargo, los estudios numéricos, a pesar de ser teóricos, pueden ser una forma adecuada de orientarnos hacia futuros estudios experimentales. Para mejorar el desempeño del CCP, los estudios numérico-experimentales son los más aceptados ya que se puede realizar un análisis numérico y posteriormente validar experimentalmente. Esto puede ayudar a conocer el comportamiento fenomenológico del sistema y brindar un diseño experimental que alcanzará el máximo rendimiento.

Acerca de la mejora del rendimiento del CCP, los estudios experimentales, numéricos y numérico-experimentales indican que el receptor y el fluido de trabajo son el corazón del CCP y juegan un papel crucial en la eficiencia de este dispositivo. El rendimiento térmico de CCP se puede mejorar considerablemente insertando las cintas retorcidas, la bobina de

alambre, las aletas, entre otros, en el tubo receptor. La presencia de turbuladores antes mencionada provoca turbulencias en el interior, lo que favorece un aumento de la velocidad y fluctuaciones radiales en el interior del tubo, lo que provoca un aumento de los números de Reynolds y Nusselt. Además, crean una mezcla intensa entre el fluido y la pared del receptor y reducen la capa límite térmica. Asimismo, el rendimiento de CCP se puede mejorar utilizando nanofluidos con alta conductividad térmica. Esto último se puede lograr aumentando la concentración, disminuyendo el tamaño de las nanopartículas y utilizando nanopartículas de forma cúbica que esféricas y de varilla [274].

Además, el tubo receptor con aletas mostró un aumento de coste del 5% que el receptor tradicional [275]. Por otro lado, aunque la Ref [276] informó que no hay un efecto significativo en el costo del PTSC usando nanofluidos, en general, se puede concluir que los nanofluidos son más costosos que los fluidos convencionales como el agua y diferentes aceites. Por lo tanto, esta limitación es uno de los aspectos más críticos a considerar en el diseño y operación de CCP.

En el sentido general de los resultados de la literatura obtenida, es evidente que el uso de insertos, tubo absorbente modificado internamente y nanofluidos mejoran el rendimiento térmico del CCP, pero siempre los acompaña una caída de presión; cuyo aumento en la caída de presión varía del 4-300% con el uso de nanofluidos, varía del 150-10000% [113,174] con el uso de insertos, y varía del 5-500% con el uso del absorbente modificado internamente. Es importante señalar que estos estudios son estudios CFD y no son estudios experimentales. En consecuencia, una caída de presión creciente requiere un mayor consumo de energía de bombeo. Por lo tanto, los nanofluidos necesitan menos consumo de energía de bombeo que los turbuladores.

La combinación de nanofluidos y turbuladores mostró el mejor aumento de eficiencia térmica de aproximadamente 1.54%, seguido del uso de aletas internas y nanofluidos con una mejora del 1.10 y 0.76%, respectivamente [277]. Por lo tanto, se recomienda utilizar una combinación de nanofluidos y un absorbente modificado internamente para diversas aplicaciones. En el **Anexo A** del presente trabajo se describe a detalle la configuración del tubo helicoidal propuesto como parte del desarrollo de este proyecto y los resultados obtenidos.

5.2 Perspectivas futuras

La mejora del rendimiento de CCP representa un campo de investigación en curso. Así, con base en la revisión de la literatura sobre este tema, se destaca la brecha disponible para futuros trabajos de investigación en la mejora del rendimiento del CCP:

- Investigación del rendimiento de CCP utilizando un receptor con inserciones de alambre en espiral de sección transversal de triángulo equilátero [278].
- Investigación del rendimiento de CCP utilizando un receptor con una bobina de alambre no uniforme combinada e inserciones de cinta trenzada [279].
- Investigación del rendimiento de CCP utilizando un receptor con turbuladores de boquilla en V [280].
- Investigación del rendimiento de CCP utilizando la combinación de un receptor interno con bisagras y el nanofluido Al_2O_3 /Agua.
- Investigación del rendimiento de CCP utilizando la combinación de un receptor de disco poroso y el nanofluido a base de metal CNT/Ga.
- Investigación del desempeño de CCP usando tubo corrugado convexo hacia afuera asimétrico y nanofluidos de Cu/Agua o CuO/Agua.
- Trabajar en la prevención de la corrosión de los tubos receptores cuando se utilizan nanofluidos.
- Análisis de costos de nanofluidos sobre la producción de energía del CCP y sus ingresos.
- Mejora de la estabilidad de los nanofluidos y prolonga su vida útil.
- Investigación del desempeño de nanofluidos, tubos receptores con insertos y la combinación de ambos en plantas CSP y procesos industriales.
- Investigación de la combinación de los algoritmos ANN, PSO y GA [281] para optimizar la función multiobjetivo de los beneficios de 4E (Energía-Ejercicio-Económico-Entorno) para el mejor desempeño de CCP a pequeña y gran escala.

Los receptores propuestos del primer punto hasta el tercero mostraron una eficiencia significativa en el número de Nusselt y la transferencia de calor. Por tanto, se recomienda utilizarlos en el sistema de CCP para mejorar su rendimiento térmico. Por otro lado, las configuraciones de receptores y nanofluidos mencionados en los puntos cuatro a seis se

estudiaron por separado en el CCP y demostraron una mejora en su eficiencia térmica. En consecuencia, se esperaría que la combinación de ambos pudiera dar un mejor desempeño de CCP.

ANEXO A

Solicitud de Patente nombrado “Receptor helicoidal como absorbedor del colector solar de canal parabólico para el mejoramiento de la eficiencia térmica”; Número de solicitud: MX/a/2019/006720; Fecha de presentación: 23/05/2019; Solicitante(s): UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS. [MX].

Por más detalle checa el siguiente link:

<https://siga.impi.gob.mx/newSIGA/content/common/principal.jsf>

PUBLICACIONES

Artículos como parte del proyecto doctoral

- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, U. Cruz-Jacobo, R.A. Conde-Gutiérrez, A. Bassam, O. A. Jaramillo, J. A. Hernández. “*The multivariable inverse artificial neural network combined with GA and PSO to improve the performance of solar parabolic trough collector*”, (2021) Applied Thermal Engineering, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116651
- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, S. Silva-Martínez, A. Bassam, O. A. Jaramillo, J. A. Hernández. “*Identification of the relevant input variables for predicting the parabolic trough solar collector's outlet temperature using an artificial neural network and a multiple linear regression model*”, (2021) Journal of Renewable and Sustainable Energy, doi.org/10.1063/5.0055992.
- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, A. Huicochea, J. A. Hernández, “*Different ways to improve parabolic trough solar collectors' performance over the last four decades and their applications: A comprehensive review*”, (2022) Renewable and Sustainable Energy Reviews, doi.org/10.1016/j.rser.2021.111947.

Artículos sometidos en las revistas en espera de sus publicaciones:

- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, J. A. Hernández, *“Thermal efficiency's improvement of parabolic trough solar collector using different kinds of hybrid nanofluids”*.
- **Wassila Ajbar**, J.E. Solís-Pérez, E. Viera-Martin, A. Parrales, J.F. Gómez-Aguilar, and J.A. Hernández, *“Performance improvement of a parabolic trough solar collector by using different integer and non-integer transfer functions in artificial neural networks”*.

Capítulo del libro

- Parrales-Bahena, E. D. Reyes-Téllez, **W. Ajbar**, J. A. Hernández. El capítulo del libro titulado *“Artificial neural network applied to the renewable energy system performance”* se ha enviado a Elsevier en espera de su publicación.

Patente

- **Wassila Ajbar**, Arianna Parrales, J A Hernandez Pérez, A. Huicochea. En 23 de mayo de 2019 se presenta la solicitud de la patente de una nueva configuración del tubo absorbedor del colector solar de canal parabólico.

Participación en congresos nacionales

- **Wassila Ajbar**, A. Bassam, J A Hernandez Perez, Arianna Parrales. *“Sistema de concentradores solares de canal parabólico para la generación de calor de proceso: diseño, construcción y modelado matemático”* Ponente en el XL encuentro nacional de AMIDIQ, Huatulco, Oaxaca, México 2019.
- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, J.A. Hernandez Perez, O.A. Jaramillo, A. Bassam, D. Castañeda. *“Análisis sensitivo de los variables de entrada sobre la eficiencia térmica del colector solar de canal parabólico (CCP) usando ecuación de garson y*

modelado de factores clave por ANN". Ponente en el XLI Encuentro Nacional de AMIDIQ. Evento virtual en octubre de 2020.

- **Wassila Ajbar**, A. Parrales, U. Cruz-Jacobo, R.A. Conde-Gutiérrez, J.A. Hernandez Perez, O.A. Jaramillo, A. Bassam. "*Estudio numérico y experimental del colector solar de canal parabólico aplicando la inversa multivariable del modelo ANN para optimizar la temperatura de salida*". Ponente en el XLII Encuentro Nacional de AMIDIQ. Evento virtual en septiembre de 2021.

REFERENCIAS

- [1] IRENA, Renewable capacity highlights, (2019) 1–2. www.irena.org/publications.
- [2] A.J. Abdulhamed, N.M. Adam, M.Z.A. Ab-Kadir, A.A. Hairuddin, Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91 (2018) 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.085>.
- [3] B. Agagna, A. Smaili, Q. Falcoz, Optical and Thermal Analysis of a Parabolic Trough Solar Collector through Coupling MCRT and FVM Techniques, *Proc. 2017 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2017*. (2018). <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477343>.
- [4] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- [5] H. Liang, C. Zheng, W. Zheng, S. You, H. Zhang, Analysis of Annual Performance of a Parabolic Trough Solar Collector, *Energy Procedia*. 105 (2017) 888–894. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.407>.
- [6] G.C. Bakos, Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement, *Renew. Energy*. (2006). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>.
- [7] D. Zhao, E. Xu, Z. Wang, Q. Yu, L. Xu, L. Zhu, Influences of installation and tracking errors on the optical performance of a solar parabolic trough collector, *Renew. Energy*. 94 (2016) 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.036>.
- [8] W. Huang, P. Hu, Z. Chen, Performance simulation of a parabolic trough solar collector, *Sol. Energy*. 86 (2012) 746–755. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.018>.
- [9] C. Tzivanidis, E. Bellos, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector, *Case Stud. Therm. Eng.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.10.005>.
- [10] S.A. Kalogirou, S. Lloyd, Use of solar Parabolic Trough Collectors for hot water production in Cyprus. A feasibility study, *Renew. Energy*. (1992). [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0960-1481(92)90097-M).
- [11] J. Duffie, W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed. John Wiley and Sons. New York: USA, 1991.

- [12] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering*, 2009. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5>.
- [13] M. Larcher, M. Rommel, A. Bohren, E. Frank, S. Minder, Characterization of a parabolic trough collector for process heat applications, in: *Energy Procedia*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.313>.
- [14] I.E.P. Montesa, A.M. Benitez, O.M. Chaveza, A.E.L. Herrera, Design and construction of a parabolic trough solar collector for process heat production, *Energy Procedia*. 57 (2014) 2149–2158. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.181>.
- [15] A. Fernández-García, E. Rojas, M. Pérez, R. Silva, Q. Hernández-Escobedo, F. Manzano-Agugliaro, A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat, *J. Clean. Prod.* 89 (2015) 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.018>.
- [16] M. Oelgemöller, N. Healy, L. De Oliveira, C. Jung, J. Mattay, Green photochemistry: Solar-chemical synthesis of Juglone with medium concentrated sunlight, *Green Chem.* (2006). <https://doi.org/10.1039/b605906f>.
- [17] H. Jafari Mosleh, S.J. Mamouri, M.B. Shafii, A. Hakim Sima, A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic through collector, *Energy Convers. Manag.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.028>.
- [18] M. Balghouthi, A.B.H. Ali, S.E. Trabelsi, A. Guizani, Optical and thermal evaluations of a medium temperature parabolic trough solar collector used in a cooling installation, *Energy Convers. Manag.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.095>.
- [19] R. Bigoni, S. Kötzsch, S. Sorlini, T. Egli, Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): Flow-cytometric analysis of bacterial inactivation, *J. Clean. Prod.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.014>.
- [20] M. Noman, A. Wasim, M. Ali, M. Jahanzaib, S. Hussain, H.M.K. Ali, H.M. Ali, An investigation of a solar cooker with parabolic trough concentrator, *Case Stud. Therm. Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100436>.
- [21] F. Wang, H. Feng, J. Zhao, W. Li, F. Zhang, R. Liu, Performance Assessment of Solar Assisted Absorption Heat Pump System with Parabolic Trough Collectors, in: *Energy Procedia*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.157>.
- [22] T. Richert, K. Riffelmann, P. Nava, The Influence of Solar Field Inlet and Outlet Temperature on the Cost of Electricity in a Molten Salt Parabolic Trough Power Plant, in: *Energy Procedia*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.184>.
- [23] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez, Parabolic-trough solar collectors and their applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>.
- [24] A.M. De Oliveira Siqueira, P.E.N. Gomes, L. Torrezani, E.O. Lucas, G.M. Da Cruz Pereira, Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar collector: An analysis, in: *Energy Procedia*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.193>.
- [25] O. Kizilkan, A. Kabul, I. Dincer, Development and performance assessment of a parabolic trough solar collector-based integrated system for an ice-cream factory, *Energy*. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.098>.
- [26] L. Xu, F. Sun, L. Ma, X. Li, G. Yuan, D. Lei, H. Zhu, Q. Zhang, E. Xu, Z. Wang, Analysis of

the influence of heat loss factors on the overall performance of utility-scale parabolic trough solar collectors, *Energy*. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.065>.

- [27] A. Rabl, P. Bendt, H.W. Gaul, Optimization of parabolic trough solar collectors, *Sol. Energy*. 29 (1982) 407–417. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90077-9).
- [28] H.K. Ghritlahre, R.K. Prasad, Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 84 (2018) 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.001>.
- [29] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, New York: Macmillan, 1994.
- [30] T.E. Boukelia, O. Arslan, M.S. Mecibah, ANN-based optimization of a parabolic trough solar thermal power plant, *Appl. Therm. Eng.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.084>.
- [31] S. Delfani, M. Esmaeili, M. Karami, Application of artificial neural network for performance prediction of a nanofluid-based direct absorption solar collector, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 36 (2019) 100559. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100559>.
- [32] J.M. Belman-Flores, A. Mota-Babiloni, S. Ledesma, P. Makhnatch, Using ANNs to approach to the energy performance for a small refrigeration system working with R134a and two alternative lower GWP mixtures, *Appl. Therm. Eng.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.108>.
- [33] A.H. Elsheikh, S.W. Sharshir, M. Abd, A.E. Kabeel, Modeling of solar energy systems using artificial neural network: A comprehensive review, 180 (2019) 622–639. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.037>.
- [34] S.A. Kalogirou, C.C. Neocleous, C.N. Schizas, Artificial neural networks for modelling the starting-up of a solar steam-generator, *Appl. Energy*. (1998). [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00019-1).
- [35] S.A. Kalogirou, S. Panteliou, A. Dentsoras, Artificial neural networks used for the performance prediction of a thermosiphon solar water heater, *Renew. Energy*. (1999). [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00787-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00787-3).
- [36] S.A. Kalogirou, S. Panteliou, A. Dentsoras, MODELING OF SOLAR DOMESTIC WATER HEATING SYSTEMS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, 65 (1999) 335–342.
- [37] C. Cetiner, F. Halici, H. Cacur, I. Taymaz, Generating hot water by solar energy and application of neural network, 25 (2005) 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.09.004>.
- [38] H. Benli, Determination of thermal performance calculation of two different types solar air collectors with the use of artificial neural networks, *Int. J. Heat Mass Transf.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.12.042>.
- [39] H. Liang, M. Fan, S. You, W. Zheng, H. Zhang, T. Ye, X. Zheng, A Monte Carlo method and finite volume method coupled optical simulation method for parabolic trough solar collectors, *Appl. Energy*. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.047>.
- [40] Z.D. Cheng, Y.L. He, K. Wang, B.C. Du, F.Q. Cui, A detailed parameter study on the comprehensive characteristics and performance of a parabolic trough solar collector system, *Appl. Therm. Eng.* 63 (2014) 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.011>.

- [41] Y.L. He, J. Xiao, Z.D. Cheng, Y.B. Tao, A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector, *Renew. Energy*. 36 (2011) 976–985. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.017>.
- [42] M.J. Kim, T.S. Kim, R.J. Flores, J. Brouwer, Neural-network-based optimization for economic dispatch of combined heat and power systems, *Appl. Energy*. 265 (2020) 114785. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114785>.
- [43] H. He, C. Wang, H. Jia, X. Cui, An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle, *Appl. Energy*. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114172>.
- [44] O. May Tzuc, A. Bassam, M.A. Escalante Soberanis, E. Venegas-Reyes, O.A. Jaramillo, L.J. Ricalde, E.E. Ordoñez, Y. El Hamzaoui, Modeling and optimization of a solar parabolic trough concentrator system using inverse artificial neural network, *J. Renew. Sustain. Energy*. 9 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4974778>.
- [45] B. Jamali, M. Rasekh, F. Jamadi, R. Gandomkar, F. Makiabadi, Using PSO-GA algorithm for training artificial neural network to forecast solar space heating system parameters, *Appl. Therm. Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.070>.
- [46] J. Rogelj, M. Den Elzen, N. Höhne, T. Fransen, H. Fekete, H. Winkler, R. Schaeffer, F. Sha, K. Riahi, M. Meinshausen, Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °c, *Nature*. 534 (2016) 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>.
- [47] A. Demirbaş, Global renewable energy resources, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 28 (2006) 779–792. <https://doi.org/10.1080/00908310600718742>.
- [48] J.O. Jaber, O.O. Badran, N. Abu-Shikhah, Sustainable energy and environmental impact: Role of renewables as clean and secure source of energy for the 21st century in Jordan, *Clean Technol. Environ. Policy*. (2004). <https://doi.org/10.1007/s10098-003-0232-9>.
- [49] L. Zhang, M. Hua, H. Lu, L. Fan, R. Mei, Effect of receiver diameter ratio on thermal performance of natural circulation steam generation system as applied to parabolic trough collector using water as working fluid, *Int. J. Heat Mass Transf.* 92 (2016) 1191–1200. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.075>.
- [50] F. Abdul Wahab Hamad, The performance of a cylindrical parabolic solar concentrator, *Energy Convers. Manag.* 28 (1988) 251–256. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90031-3).
- [51] S.M. Jeter, D.I. Jarrar, S.A. Moustafa, Geometrical effects on the performance of trough collectors, *Sol. Energy*. 30 (1983) 109–113. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90201-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90201-3).
- [52] A. Thomas, H.M. Guven, Parabolic trough concentrators–design, construction and evaluation, *Energy Convers. Manag.* 34 (1993) 401–416. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90090-W](https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90090-W).
- [53] S.A. Kalogirou, S. Lloyd, J. Ward, P. Eleftheriou, Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system, *Appl. Energy*. 47 (1994) 341–354. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90041-8).
- [54] R. Siva Subramanian, G. Kumaresan, R. Palanivel, P. Nishanth kalathil, B. Nirmal, Comparative performance analysis of parabolic trough solar collector by varying absorber surface, *Mater. Today Proc.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.248>.
- [55] J. Barriga, U. Ruiz-De-Gopegui, J. Goikoetxea, B. Coto, H. Cachafeiro, Selective coatings for

- new concepts of parabolic trough collectors, *Energy Procedia*. 49 (2014) 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.004>.
- [56] G. Coccia, G. Di Nicola, A. Hidalgo, Standards and testing, in: *SpringerBriefs Appl. Sci. Technol.*, Springer Verlag, 2016: pp. 41–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27084-5_3.
- [57] S. Fischer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, B. Perers, P. Bergquist, B. Hellström, Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2, *Sol. Energy*. 76 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.021>.
- [58] S. Gharekhani, E. Sadeghinezhad, S.N. Kazi, H. Yarmand, A. Badarudin, M.R. Safaei, M.N.M. Zubir, ANSI/ASHRAE Standard 93-2010 Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, *Carbohydr. Polym.* 115 (2015).
- [59] L. Xu, Z. Wang, X. Li, G. Yuan, F. Sun, D. Lei, S. Li, A comparison of three test methods for determining the thermal performance of parabolic trough solar collectors, *Sol. Energy*. 99 (2014) 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.009>.
- [60] A. Vouros, E. Mathioulakis, E. Papanicolaou, V. Belessiotis, Modelling the overall efficiency of parabolic trough collectors, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 40 (2020) 100756. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100756>.
- [61] L. Valenzuela, R. López-Martín, E. Zarza, Optical and thermal performance of large-size parabolic-trough solar collectors from outdoor experiments: A test method and a case study, *Energy*. 70 (2014) 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.016>.
- [62] L. Zhang, Z. Yu, L. Fan, W. Wang, H. Chen, Y. Hu, J. Fan, M. Ni, K. Cen, An experimental investigation of the heat losses of a U-type solar heat pipe receiver of a parabolic trough collector-based natural circulation steam generation system, *Renew. Energy*. 57 (2013) 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.029>.
- [63] D. Lei, Z. Wang, J. Li, J. Li, Z. Wang, Experimental study of glass to metal seals for parabolic trough receivers, *Renew. Energy*. 48 (2012) 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.033>.
- [64] D.E. Prapas, B. Norton, S.D. Probert, Optics of parabolic-trough, solar-energy collectors, possessing small concentration ratios, *Sol. Energy*. 39 (1987) 541–550. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(87\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(87)90061-2).
- [65] W.S. Duff, Optical and Thermal Performance Analysis of Three Line Focus Collectors Optical and Thermal Performance Analysis of Three Line Focus Collectors, (1977) 1–7.
- [66] I. Tsuda, Optical error measurement of the parabolic trough collector, *Int. J. Sol. Energy*. 8 (1990) 49–62. <https://doi.org/10.1080/01425919008909709>.
- [67] S.Y. Wu, J.G. Luo, L. Xiao, Z.L. Chen, Effect of different errors on deformation and thermal stress of absorber tube in solar parabolic trough collector, *Int. J. Mech. Sci.* 188 (2020) 105969. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105969>.
- [68] D.M. Deffenbaugh, S.T. Green, S.J. Svedeman, The effect of dust accumulation on line-focus parabolic trough solar collector performance, *Sol. Energy*. 36 (1986) 139–146. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90118-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90118-0).
- [69] G. Kumaresan, R. Sridhar, R. Velraj, Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system, *Energy*. 47 (2012) 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.036>.

- [70] M. Chafie, M.F. Ben Aissa, A. Guizani, Energetic end exergetic performance of a parabolic trough collector receiver: An experimental study, *J. Clean. Prod.* 171 (2018) 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.012>.
- [71] R.S. Isravel, S. Saravanan, V. Vijayan, A review of material and coatings in solar collectors, *Mater. Today Proc.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.644>.
- [72] J. El Nady, A.B. Kashyout, S. Ebrahim, M.B. Soliman, Nanoparticles Ni electroplating and black paint for solar collector applications, *Alexandria Eng. J.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.029>.
- [73] K.S. Reddy, C. Ananthasornaraj, Design, development and performance investigation of solar Parabolic Trough Collector for large-scale solar power plants, *Renew. Energy.* 146 (2020) 1943–1957. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.158>.
- [74] K.S. Reddy, K. Ravi Kumar, C.S. Ajay, Experimental investigation of porous disc enhanced receiver for solar parabolic trough collector, *Renew. Energy.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.016>.
- [75] B. Kalidasan, R. Shankar, T. Srinivas, Absorber Tube with Internal Hinged Blades for Solar Parabolic Trough Collector, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2016: pp. 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.213>.
- [76] M.T. Jamal-Abad, S. Saedodin, M. Aminy, Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media, *Renew. Energy.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.004>.
- [77] M. Valizade, M.M. Heyhat, M. Maerefat, Experimental study of the thermal behavior of direct absorption parabolic trough collector by applying copper metal foam as volumetric solar absorption, *Renew. Energy.* 145 (2020) 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.112>.
- [78] H. Liang, C. Zhu, M. Fan, S. You, H. Zhang, J. Xia, Study on the thermal performance of a novel cavity receiver for parabolic trough solar collectors, *Appl. Energy.* 222 (2018) 790–798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.030>.
- [79] R. Suresh Isravel, M. Raja, S. Saravanan, V. Vijayan, Thermal augmentation in parabolic trough collector solar water heater using rings attached twisted tapes, *Mater. Today Proc.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.375>.
- [80] M.M. Heyhat, M. Valizade, S. Abdolazade, M. Maerefat, Thermal efficiency enhancement of direct absorption parabolic trough solar collector (DAPTSC) by using nanofluid and metal foam, *Energy.* 192 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116662>.
- [81] J.W. Ramsey, B.P. Gupta, G.R. Knowles, Experimental Evaluation of a Cylindrical Parabolic Solar Collector., *Am. Soc. Mech. Eng.* 99 (1976) 163–168.
- [82] S.M.A. Ibrahim, The forced circulation performance of a sun tracking parabolic concentrator collector, *Renew. Energy.* 9 (1996) 568–571. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88353-4](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88353-4).
- [83] J. Subramani, P. Sevvil, Anbuselvam, S.A. Srinivasan, Influence of CNT coating on the efficiency of solar parabolic trough collector using AL2O3 nanofluids - a multiple regression approach, *Mater. Today Proc.* (2020) 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.047>.
- [84] S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, Energy and exergy analysis of a parabolic trough collector using helically corrugated absorber tube, *Renew. Energy.* 155 (2020) 735–747.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.127>.

- [85] Z. Zhao, F. Bai, X. Zhang, Z. Wang, Experimental study of pin finned receiver tubes for a parabolic trough solar air collector, *Sol. Energy*. 207 (2020) 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.070>.
- [86] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: *Am. Soc. Mech. Eng. Fluids Eng. Div. FED*, 1995.
- [87] M.H. Ahmadi, M. Alhuyi Nazari, R. Ghasempour, H. Madah, M.B. Shafii, M.A. Ahmadi, Thermal conductivity ratio prediction of Al₂O₃/water nanofluid by applying connectionist methods, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 541 (2018) 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.01.030>.
- [88] M.H. Ahmadi, M.A. Ahmadi, M.A. Nazari, O. Mahian, R. Ghasempour, A proposed model to predict thermal conductivity ratio of Al₂O₃/EG nanofluid by applying least squares support vector machine (LSSVM) and genetic algorithm as a connectionist approach, *J. Therm. Anal. Calorim.* 135 (2019) 271–281. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7035-z>.
- [89] S.K. Verma, A.K. Tiwari, Application of Nanoparticles in Solar collectors: A Review, *Mater. Today Proc.* 2 (2015) 3638–3647. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.121>.
- [90] K. Chaudhari, P. Walke, U. Wankhede, R. Shelke, An Experimental Investigation of a Nanofluid (Al₂O₃+H₂O) Based Parabolic Trough Solar Collectors, *Br. J. Appl. Sci. Technol.* (2015). <https://doi.org/10.9734/bjast/2015/11946>.
- [91] A. Kasaeian, S. Daviran, R.D. Azarian, A. Rashidi, Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector, *Energy Convers. Manag.* 89 (2015) 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.056>.
- [92] M. Potenza, M. Milanese, G. Colangelo, A. de Risi, Experimental investigation of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluid, *Appl. Energy*. 203 (2017) 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.075>.
- [93] M.S. Bretado de los Rios, C.I. Rivera-Solorio, A.J. García-Cuéllar, Thermal performance of a parabolic trough linear collector using Al₂O₃/H₂O nanofluids, *Renew. Energy*. 122 (2018) 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.094>.
- [94] J. Subramani, P.K. Nagarajan, O. Mahian, R. Sathyamurthy, Efficiency and heat transfer improvements in a parabolic trough solar collector using TiO₂ nanofluids under turbulent flow regime, *Renew. Energy*. 119 (2018) 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.079>.
- [95] M.A. Rehan, M. Ali, N.A. Sheikh, M.S. Khalil, G.Q. Chaudhary, T. ur Rashid, M. Shehryar, Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collectors with nanofluids in winter conditions, *Renew. Energy*. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.062>.
- [96] J. Subramani, P.K. Nagarajan, S. Wongwises, S.A. El-Agouz, R. Sathyamurthy, Experimental study on the thermal performance and heat transfer characteristics of solar parabolic trough collector using Al₂O₃ nanofluids, *Environ. Prog. Sustain. Energy*. 37 (2018) 1149–1159. <https://doi.org/10.1002/ep.12767>.
- [97] T.V.R. Sekhar, R. Prakash, G. Nandan, M. Muthuraman, Performance enhancement of a renewable thermal energy collector using metallic oxide nanofluids, *Micro Nano Lett.* 13 (2018) 248–251. <https://doi.org/10.1049/mnl.2017.0410>.

- [98] P.S.G. Natividade, G. de Moraes Moura, E. Avallone, E.P. Bandarra Filho, R.V. Gelamo, J.C. de S.I. Gonçalves, Experimental analysis applied to an evacuated tube solar collector equipped with parabolic concentrator using multilayer graphene-based nanofluids, *Renew. Energy*. 138 (2019) 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.091>.
- [99] A. Gowda, S. Dassappa, R. Hanumanthappa, S. Kempanna, Effect of reduced graphene oxide as nanofluid on solar parabolic trough collector receiver model, *Mater. Today Proc.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.234>.
- [100] S. Sreekumar, A. Joseph, C.S. Sujith Kumar, S. Thomas, Investigation on influence of antimony tin oxide/silver nanofluid on direct absorption parabolic solar collector, *J. Clean. Prod.* 249 (2020) 119378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119378>.
- [101] H. Fathabadi, Novel solar collector: Evaluating the impact of nanoparticles added to the collector's working fluid, heat transfer fluid temperature and flow rate, *Renew. Energy*. 148 (2020) 1165–1173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.008>.
- [102] K. Farhana, K. Kadirgama, M.M. Rahman, D. Ramasamy, M.M. Noor, G. Najafi, M. Samykano, A.S.F. Mahamude, Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids — A state-of-the-art review, *Nano-Structures and Nano-Objects*. 18 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100276>.
- [103] D. Han, Z. Meng, D. Wu, C. Zhang, H. Zhu, Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption, *Nanoscale Res. Lett.* (2011). <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-457>.
- [104] M. Faizal, R. Saidur, S. Mekhilef, A. Hepbasli, I.M. Mahbubul, Energy, economic, and environmental analysis of a flat-plate solar collector operated with SiO₂nanofluid, *Clean Technol. Environ. Policy*. (2015). <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0870-0>.
- [105] A. Kasaeian, R. Daneshzarian, R. Rezaei, F. Pourfayaz, G. Kasaeian, Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector, *J. Clean. Prod.* 158 (2017) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.131>.
- [106] M. Bortolato, S. Dugaria, F. Agresti, S. Barison, L. Fedele, E. Sani, D. Del Col, Investigation of a single wall carbon nanohorn-based nanofluid in a full-scale direct absorption parabolic trough solar collector, *Energy Convers. Manag.* 150 (2017) 693–703. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.044>.
- [107] S.S. Bernard, G. Suresh, M.D.J. Ahmed, G. Mageshwaran, V. Madanagopal, J. Karthikeyan, Performance analysis of MWCNT fluid parabolic trough collector for whole year, *Mater. Today Proc.* (2020) 3–6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.289>.
- [108] K.E. Hassan, M.F. El-Refaie, Theoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrators, *Sol. Energy*. 15 (1973) 219–244. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90086-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90086-8).
- [109] H.M. Güven, R.B. Bannerot, Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries, *Sol. Energy*. (1986). [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90018-6).
- [110] J. Gong, J. Wang, P.D. Lund, E. Hu, Z. Xu, G. Liu, G. Li, Improving the performance of a 2-stage large aperture parabolic trough solar concentrator using a secondary reflector designed by adaptive method, *Renew. Energy*. 152 (2020) 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.019>.

- [111] Z. Zhang, J. Sun, L. Wang, J.J. Wei, Multiphysics-coupled study of wind load effects on optical performance of parabolic trough collector, *Sol. Energy*. 207 (2020) 1078–1087. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.107>.
- [112] K. Ravi Kumar, K.S. Reddy, Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver, *Appl. Energy*. 86 (2009) 1804–1812. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.007>.
- [113] C. Chang, C. Xu, Z.Y. Wu, X. Li, Q.Q. Zhang, Z.F. Wang, Heat Transfer Enhancement and Performance of Solar Thermal Absorber Tubes with Circumferentially Non-uniform Heat Flux, in: *Energy Procedia*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.036>.
- [114] Z. Huang, G.L. Yu, Z.Y. Li, W.Q. Tao, Numerical Study on Heat Transfer Enhancement in a Receiver Tube of Parabolic Trough Solar Collector with Dimples, Protrusions and Helical Fins, in: *Energy Procedia*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.149>.
- [115] Z. Huang, Z.Y. Li, G.L. Yu, W.Q. Tao, Numerical investigations on fully-developed mixed turbulent convection in dimpled parabolic trough receiver tubes, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2017) 1287–1299. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.012>.
- [116] X.W. Zhu, Y.H. Fu, J.Q. Zhao, A novel wavy-tape insert configuration for pipe heat transfer augmentation, *Energy Convers. Manag.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.006>.
- [117] X. Zhu, L. Zhu, J. Zhao, Wavy-tape insert designed for managing highly concentrated solar energy on absorber tube of parabolic trough receiver, *Energy*. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.010>.
- [118] B. Amina, A. Miloud, L. Samir, B. Abdelylah, J.P. Solano, Heat transfer enhancement in a parabolic trough solar receiver using longitudinal fins and nanofluids, *J. Therm. Sci.* 25 (2016) 410–417. <https://doi.org/10.1007/s11630-016-0878-3>.
- [119] A. Benabderrahmane, A. Benazza, L. Samir, A. Benazza, M. Aminallah, S. Laouedj, Heat transfer enhancement inside PTC absorber View project Call for Papers “ Special Issue : Nanofluids for Thermal Applications” View project HEAT TRANSFER BEHAVIORS IN A PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTOR TUBE WITH COMPOUND TECHNIQUE, 2016. www.ijstret.org.
- [120] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Optimum number of internal fins in parabolic trough collectors, *Appl. Therm. Eng.* 137 (2018) 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.037>.
- [121] P. Liu, J. Lv, F. Shan, Z. Liu, W. Liu, Effects of rib arrangements on the performance of a parabolic trough receiver with ribbed absorber tube, *Appl. Therm. Eng.* 156 (2019) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.037>.
- [122] B. Zou, Y. Jiang, Y. Yao, H. Yang, Thermal performance improvement using unilateral spiral ribbed absorber tube for parabolic trough solar collector, *Sol. Energy*. 183 (2019) 371–385. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.048>.
- [123] B. Kurşun, Thermal performance assessment of internal longitudinal fins with sinusoidal lateral surfaces in parabolic trough receiver tubes, *Renew. Energy*. 140 (2019) 816–827. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.106>.
- [124] X. Li, H. Chang, C. Duan, Y. Zheng, S. Shu, Thermal performance analysis of a novel linear cavity receiver for parabolic trough solar collectors, *Appl. Energy*. 237 (2019) 431–439.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.014>.

- [125] A.M. Norouzi, M. Siavashi, M.H. Khaliji Oskouei, Efficiency enhancement of the parabolic trough solar collector using the rotating absorber tube and nanoparticles, *Renew. Energy*. 145 (2020) 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.027>.
- [126] E. Bellos, C. Tzivanidis, Enhancing the performance of a parabolic trough collector with combined thermal and optical techniques, *Appl. Therm. Eng.* 164 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114496>.
- [127] O. Chakraborty, B. Das, R. Gupta, S. Debbarma, Heat transfer enhancement analysis of parabolic trough collector with straight and helical absorber tube, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 20 (2020) 100718. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100718>.
- [128] M.J. Chang, J.A. Roux, Parabolic solar collector with glass pipe and black fluid, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*. 108 (1986) 129–134. <https://doi.org/10.1115/1.3268079>.
- [129] E.W. Grald, T.H. Kuehn, Performance analysis of a parabolic trough solar collector with a porous absorber receiver, *Sol. Energy*. 42 (1989) 281–292. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(89\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(89)90030-3).
- [130] S.M. Hosseinalipour, A. Rostami, G. Shahriari, Numerical study of circumferential temperature difference reduction at the absorber tube of parabolic trough direct steam generation collector by inserting a twisted tape in superheated region, *Case Stud. Therm. Eng.* 21 (2020) 100720. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100720>.
- [131] İ.H. Yılmaz, A. Mwesigye, Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review, *Appl. Energy*. 225 (2018) 135–174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.014>.
- [132] A. Kasaeian, R. Daneshazarian, F. Pourfayaz, S. Babaei, M. Sheikhpour, S. Nakhjavani, Evaluation of MWCNT/ethylene glycol nanofluid flow in a parabolic trough collector with glass-glass absorber tube, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*. 30 (2019) 176–205. <https://doi.org/10.1108/HFF-11-2018-0693>.
- [133] A. Mwesigye, Z. Huan, Thermal and Thermodynamic Performance of a Parabolic Trough Receiver with Syltherm800-Al₂O₃ Nanofluid as the Heat Transfer Fluid, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015: pp. 394–402. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.402>.
- [134] A. Mwesigye, Z. Huan, J.P. Meyer, Thermodynamic optimisation of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil-Al₂O₃ nanofluid, *Appl. Energy*. 156 (2015) 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.035>.
- [135] A. Mwesigye, Z. Huan, Thermodynamic analysis and optimization of fully developed turbulent forced convection in a circular tube with water-Al₂O₃ nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transf.* 89 (2015) 694–706. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.099>.
- [136] A. Mwesigye, Z. Huan, J.P. Meyer, Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with Cu-Therminol®/VP-1 nanofluid, *Energy Convers. Manag.* 120 (2016) 449–465. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.106>.
- [137] Y. Wang, J. Xu, Q. Liu, Y. Chen, H. Liu, Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid, *Appl. Therm. Eng.* 107 (2016) 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.170>.

- [138] S.E. Ghasemi, A.A. Ranjbar, Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study, *J. Mol. Liq.* 222 (2016) 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.091>.
- [139] V. Ferraro, J. Settino, M.A. Cucumo, D. Kaliakatsos, Parabolic Trough System Operating with Nanofluids: Comparison with the Conventional Working Fluids and Influence on the System Performance, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2016: pp. 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.099>.
- [140] A. Mwesigye, J.P. Meyer, Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios, *Appl. Energy*. 193 (2017) 393–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.064>.
- [141] A. Kasaeian, R. Daneshazarian, F. Pourfayaz, Comparative study of different nanofluids applied in a trough collector with glass-glass absorber tube, *J. Mol. Liq.* 234 (2017) 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.03.096>.
- [142] E. Bellos, C. Tzivanidis, Parametric investigation of nanofluids utilization in parabolic trough collectors, *Therm. Sci. Eng. Prog.* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.05.001>.
- [143] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids, *Energy Convers. Manag.* 156 (2018) 388–402. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.051>.
- [144] S.E. Ghasemi, A.A. Ranjbar, Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 21626–21634. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.087>.
- [145] H. Khakrah, A. Shamloo, S.K. Hannani, Determination of Parabolic Trough Solar Collector Efficiency Using Nanofluid: A Comprehensive Numerical Study, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*. 139 (2017). <https://doi.org/10.1115/1.4037092>.
- [146] H. Khakrah, A. Shamloo, S. Kazemzadeh Hannani, Exergy analysis of parabolic trough solar collectors using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid, *Sol. Energy*. 173 (2018) 1236–1247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.064>.
- [147] A.A. Minea, W.M. El-Maghlany, Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison, *Renew. Energy*. 120 (2018) 350–364. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.093>.
- [148] M. Hatami, J. Geng, D. Jing, Enhanced efficiency in Concentrated Parabolic Solar Collector (CPSC) with a porous absorber tube filled with metal nanoparticle suspension, *Green Energy Environ.* 3 (2018) 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.12.002>.
- [149] M. Marefati, M. Mehrpooya, M.B. Shafii, Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids, *J. Clean. Prod.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.080>.
- [150] A.R. Mallah, S.N. Kazi, M.N.M. Zubir, A. Badarudin, Blended morphologies of plasmonic nanofluids for direct absorption applications, *Appl. Energy*. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.113>.
- [151] M. Malekan, A. Khosravi, S. Syri, Heat transfer modeling of a parabolic trough solar collector with working fluid of Fe₃O₄ and CuO/Therminol 66 nanofluids under magnetic field, *Appl.*

- Therm. Eng. 163 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114435>.
- [152] S. Kalogirou, S. Lloyd, J. Ward, Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system, *Sol. Energy*. 60 (1997) 49–59. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00131-4).
- [153] S.D. Odeh, G.L. Morrison, M. Behnia, Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors, *Sol. Energy*. 62 (1998) 395–406. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00031-0).
- [154] S. Quezada-García, H. Sánchez-Mora, M.A. Polo-Labarrios, R.I. Cázares-Ramírez, Modeling and simulation to determine the thermal efficiency of a parabolic solar trough collector system, *Case Stud. Therm. Eng.* 16 (2019) 100523. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100523>.
- [155] Y. Marif, H. Benmoussa, H. Bouguettaia, M.M. Belhadj, M. Zerrouki, Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharan region, *Energy Convers. Manag.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.002>.
- [156] A. de Risi, M. Milanese, D. Laforgia, Modelling and optimization of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluids, *Renew. Energy*. 58 (2013) 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.03.014>.
- [157] M. Ghazouani, M. Bouya, M. Benaissa, Thermo-economic and exergy analysis and optimization of small PTC collectors for solar heat integration in industrial processes, *Renew. Energy*. 152 (2020) 984–998. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.109>.
- [158] N.D.T. Dung, K.J. Wang, F.S. Chuang, K.Y. Kung, Optimizing the design of receiver in parabolic trough by using genetic algorithm, *Eur. J. Mech. B/Fluids*. 49 (2015) 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.08.003>.
- [159] J. Guo, X. Huai, Multi-parameter optimization design of parabolic trough solar receiver, *Appl. Therm. Eng.* 98 (2016) 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.041>.
- [160] N. Luo, G. Yu, H.J. Hou, Y.P. Yang, Dynamic Modeling and Simulation of Parabolic Trough Solar System, *Energy Procedia*. 69 (2015) 1344–1348. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.137>.
- [161] M.A. Ehyaei, A. Ahmadi, M. El Haj Assad, T. Salameh, Optimization of parabolic through collector (PTC) with multi objective swarm optimization (MOPSO) and energy, exergy and economic analyses, *J. Clean. Prod.* 234 (2019) 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.210>.
- [162] S. Kalogirou, C. Neocleous, C. Schizas, a Comparative Study of Methods for Estimating Intercept Factor of Parabolic Trough Collectors, (1987) 1987.
- [163] M.M. El-Kassaby, M.A. Hassab, Prediction of concentration distribution in parabolic trough solar collectors, *Int. J. Sol. Energy*. 16 (1994) 121–135. <https://doi.org/10.1080/01425919408914271>.
- [164] M.M. El-Kassaby, Prediction of optimum tilt angle for parabolic trough with the long axis in the north-south direction, *Int. J. Sol. Energy*. 16 (1994) 99–109. <https://doi.org/10.1080/01425919408914269>.
- [165] S.D. Odeh, G.L. Morrison, M. Behnia, Thermal Analysis of Parabolic Trough Solar Collectors for Electric Power Generation, *Manuf. Eng.* (1994).

- [166] K.J. Riffelmann, A. Neumann, S. Ulmer, Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region, *Sol. Energy*. 80 (2006) 1303–1313. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.001>.
- [167] Z.D. Cheng, Y.L. He, J. Xiao, Y.B. Tao, R.J. Xu, Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37 (2010) 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.05.002>.
- [168] Z.D. Cheng, Y.L. He, F.Q. Cui, R.J. Xu, Y.B. Tao, Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method, *Sol. Energy*. 86 (2012) 1770–1784. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.039>.
- [169] M. Wirz, M. Roesle, A. Steinfeld, Three-dimensional optical and thermal numerical model of solar tubular receivers in parabolic trough concentrators, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*. 134 (2012) 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4007494>.
- [170] O. Behar, A. Khellaf, K. Mohammedi, A novel parabolic trough solar collector model - Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES), *Energy Convers. Manag.* 106 (2015) 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>.
- [171] Z.D. Cheng, Y.L. He, B.C. Du, K. Wang, Q. Liang, Geometric optimization on optical performance of parabolic trough solar collector systems using particle swarm optimization algorithm, *Appl. Energy*. 148 (2015) 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.079>.
- [172] A. Mwesigye, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, Multi-objective and thermodynamic optimisation of a parabolic trough receiver with perforated plate inserts, *Appl. Therm. Eng.* 77 (2015) 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.018>.
- [173] A. Mwesigye, Z. Huan, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, Influence of optical errors on the thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver, *Sol. Energy*. 135 (2016) 703–718. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.045>.
- [174] Z.J. Zheng, Y. Xu, Y.L. He, Thermal analysis of a solar parabolic trough receiver tube with porous insert optimized by coupling genetic algorithm and CFD, *Sci. China Technol. Sci.* 59 (2016) 1475–1485. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-0373-x>.
- [175] T.E. Boukeli, O. Arslan, M.S. Mecibah, ANN-based optimization of a parabolic trough solar thermal power plant, *Appl. Therm. Eng.* 107 (2016) 1210–1218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.084>.
- [176] B. Zou, H. Yang, Y. Yao, Y. Jiang, A detailed study on the effects of sunshape and incident angle on the optical performance of parabolic trough solar collectors, *Appl. Therm. Eng.* 126 (2017) 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.149>.
- [177] S. Meiser, S. Schneider, E. Lüpfer, B. Schirricke, R. Pitz-Paal, Evaluation and assessment of gravity load on mirror shape and focusing quality of parabolic trough solar mirrors using finite-element analysis, *Appl. Energy*. 185 (2017) 1210–1216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.045>.
- [178] Y.P. Chandra, A. Singh, S.K. Mohapatra, J.P. Kesari, L. Rana, Numerical optimization and convective thermal loss analysis of improved solar parabolic trough collector receiver system with one sided thermal insulation, *Sol. Energy*. (2017).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.051>.

- [179] A. Ebrahimi-Moghadam, B. Mohseni-Gharyehsafa, M. Farzaneh-Gord, Using artificial neural network and quadratic algorithm for minimizing entropy generation of Al₂O₃-EG/W nanofluid flow inside parabolic trough solar collector, *Renew. Energy*. 129 (2018) 473–485. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.023>.
- [180] X. Wang, S. Luo, T. Tang, X. Liu, Y. He, A MCRT-FVM-FEM coupled simulation for optical-thermal-structural analysis of parabolic trough solar collectors, *Energy Procedia*. 158 (2019) 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.138>.
- [181] S.Y. Heng, Y. Asako, T. Suwa, K. Nagasaka, Transient thermal prediction methodology for parabolic trough solar collector tube using artificial neural network, *Renew. Energy*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.037>.
- [182] A. Mouaky, A. Alami Merrouni, N.E. Laadel, E.G. Bennouna, Simulation and experimental validation of a parabolic trough plant for solar thermal applications under the semi-arid climate conditions, *Sol. Energy*. 194 (2019) 969–985. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.040>.
- [183] F. Yahi, M. Belhamel, F. Bouzeffour, O. Sari, Structured dynamic modeling and simulation of parabolic trough solar collector using bond graph approach, *Sol. Energy*. 196 (2020) 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.065>.
- [184] M. Abubakr, H. Amein, B.M. Akoush, M.M. El-Bakry, M.A. Hassan, An intuitive framework for optimizing energetic and exergetic performances of parabolic trough solar collectors operating with nanofluids, *Renew. Energy*. 157 (2020) 130–149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.160>.
- [185] L. Salgado Conrado, A. Rodríguez-Pulido, G. Calderón, Thermal performance of parabolic trough solar collectors, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 1345–1359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.071>.
- [186] Z.D. Cheng, Y.L. He, F.Q. Cui, A new modelling method and unified code with MCRT for concentrating solar collectors and its applications, *Appl. Energy*. 101 (2013) 686–698. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.048>.
- [187] A.J. Abdulhamed, N.M. Adam, M.Z.A. Ab-Kadir, A.A. Hairuddin, Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91 (2018) 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.085>.
- [188] S.A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Prog. Energy Combust. Sci.* (2004). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- [189] Blaine F. Parker, Performance of an Air Heating Receiver for Line Focusing Solar Collectors, *Trans. ASAE*. 24 (1981) 0743–0746. <https://doi.org/10.13031/2013.34331>.
- [190] H.M. Qiblawey, F. Banat, Solar thermal desalination technologies, *Desalination*. (2008). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.059>.
- [191] S.A. Kalogirou, Seawater desalination using renewable energy sources, *Prog. Energy Combust. Sci.* (2005). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>.
- [192] C. Ray, R. Jain, *Drinking Water Treatment Focusing on Appropriate Technology and Sustainability Introduction*, 2011. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1104-4_1.
- [193] S. Kalogirou, Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination, *Appl.*

- Energy. (1998). [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00018-X).
- [194] L. García-Rodríguez, C. Gómez-Camacho, Design parameter selection for a distillation system coupled to a solar parabolic trough collector, *Desalination*. 122 (1999) 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00041-7).
- [195] L. García-Rodríguez, A.I. Palmero-Marrero, C. Gómez-Camacho, Application of direct steam generation into a solar parabolic trough collector to multieffect distillation, *Desalination*. 125 (1999) 139–145. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00132-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00132-0).
- [196] S. Raja Narayanan, S. Vijay, Desalination of water using parabolic trough collector, *Mater. Today Proc.* 21 (2020) 375–379. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.134>.
- [197] H.M. Toonen, Adapting to an innovation: Solar cooking in the urban households of Ouagadougou (Burkina Faso), *Phys. Chem. Earth.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.03.006>.
- [198] M. Bansal, R.P. Saini, D.K. Khatod, Development of cooking sector in rural areas in India - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.014>.
- [199] P.M. Cuce, Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis, *Sol. Energy.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.077>.
- [200] G. Kumaresan, V.S. Vigneswaran, S. Esakkimuthu, R. Velraj, Performance assessment of a solar domestic cooking unit integrated with thermal energy storage system, *J. Energy Storage.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.03.002>.
- [201] M.S. Al-Soud, E. Abdallah, A. Akayleh, S. Abdallah, E.S. Hrayshat, A Parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system, *Appl. Energy.* 87 (2010) 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.035>.
- [202] M. Mussard, O.J. Nydal, Charging of a heat storage coupled with a low-cost small-scale solar parabolic trough for cooking purposes, *Sol. Energy.* 95 (2013) 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.013>.
- [203] N. El Moussaoui, S. Talbi, I. Atmane, K. Kassmi, K. Schwarzer, H. Chayeb, N. Bachiri, Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC), *Sol. Energy.* 201 (2020) 866–871. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.079>.
- [204] M. Savsani, K. Motwani, J.R. Patel, Medium Temperature Application Of Parabolic Trough Collector For Industrial Process, (2017) 11.
- [205] S. Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, *Appl. Energy.* 76 (2003) 337–361. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00176-9).
- [206] B. El Ghazzani, D. Martinez Plaza, R. Ait El Cadi, A. Ihlal, B. Abnay, K. Bouabid, Thermal plant based on parabolic trough collectors for industrial process heat generation in Morocco, *Renew. Energy.* 113 (2017) 1261–1275. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.063>.
- [207] S.A. Kalogirou, Parabolic trough collectors for industrial process heat in Cyprus, *Energy.* 27 (2002) 813–830. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00018-X).
- [208] R. Silva, F.J. Cabrera, M. Pérez-García, Process heat generation with parabolic trough collectors for a vegetables preservation industry in Southern Spain, *Energy Procedia.* 48 (2014) 1210–1216. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.137>.

- [209] P.D. Tagle, A. Agraz, C.I. Rivera, Study of Applications of Parabolic Trough Solar Collector Technology in Mexican Industry, *Energy Procedia*. 91 (2016) 661–667. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.227>.
- [210] M. Eck, E. Zarza, M. Eickhoff, J. Rheinländer, L. Valenzuela, Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs, *Sol. Energy*. 74 (2003) 341–351. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00111-7).
- [211] Solair, increasing the market implementation of solar air-conditioning systems for small and medium applications in residential and commercial buildings., (2009). <http://www.solair-project.eu>.
- [212] D. Krüger, Y. Pandian, K. Hennecke, M. Schmitz, Parabolic trough collector testing in the frame of the REACT project, *Desalination*. 220 (2008) 612–618. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.062>.
- [213] A. Lokurlu, F. Richarts, D. Krüger, High efficient utilisation of solar energy with newly developed parabolic trough collectors (SOLITEM PTC) for chilling and steam production in a hotel at the Mediterranean coast of Turkey, *Int. J. Energy Technol. Policy*. (2005). <https://doi.org/10.1504/IJETP.2005.006745>.
- [214] A. El Fadar, A. Mimmet, A. Azzabakh, M. Pérez-García, J. Castaing, Study of a new solar adsorption refrigerator powered by a parabolic trough collector, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 1267–1270. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.06.012>.
- [215] F.J. Cabrera, A. Fernández-García, R.M.P. Silva, M. Pérez-García, Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20 (2013) 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.081>.
- [216] M. Quirante, L. Valenzuela, Dimensioning a small-sized PTC solar field for heating and cooling of a hotel in Almería (Spain), *Energy Procedia*. 30 (2012) 967–973. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.109>.
- [217] A.A. Shawky, A.K.H. Khalil, Design and Performance Analysis of Small-Scale Parabolic Trough Solar Collectors Using Sustainable Materials, in: *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11136-1>.
- [218] A. Arabkoohsar, M. Sadi, A solar PTC powered absorption chiller design for Co-supply of district heating and cooling systems in Denmark, *Energy*. 193 (2020) 116789. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116789>.
- [219] Y. Bi, L. Qin, J. Guo, H. Li, G. Zang, Performance analysis of solar air conditioning system based on the independent-developed solar parabolic trough collector, *Energy*. 196 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117075>.
- [220] K. Lovegrove, W. Stein, *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857096173>.
- [221] Q. Mao, Recent developments in geometrical configurations of thermal energy storage for concentrating solar power plant, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.355>.
- [222] H.L. Zhang, J. Baeyens, J. Degève, G. Cacères, Concentrated solar power plants: Review and design methodology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032>.

- [223] O. Behar, A. Khellaf, K. Mohammadi, A review of studies on central receiver solar thermal power plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017>.
- [224] M. Liu, N.H. Steven Tay, S. Bell, M. Belusko, R. Jacob, G. Will, W. Saman, F. Bruno, Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>.
- [225] M. Binotti, G. Zhu, A. Gray, G. Manzolini, P. Silva, Geometric analysis of three-dimensional effects of parabolic trough collectors, *Sol. Energy.* 88 (2013) 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.10.025>.
- [226] S. Qazi, Solar Thermal Electricity and Solar Insolation, 2017. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803022-6.00007-1>.
- [227] International Renewable Energy Agency (IRENA), Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050, 2018. [https://doi.org/10.1002/\(Sici\)1097-0029\(19990915\)46:6<398::Aid-Jemt8>3.0.Co;2-H](https://doi.org/10.1002/(Sici)1097-0029(19990915)46:6<398::Aid-Jemt8>3.0.Co;2-H).
- [228] E. Parliament, a Roadmap To Low Carbon Economy in 2050, *A Roadmap Mov. To Compet. Low Carbon Econ. 2050. XXXIII* (2012) 81–87. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- [229] Kusch-Brandt, Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21’s “Renewables 2019 Global Status Report,” 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8030139>.
- [230] A.G. Fernández, J. Gomez-Vidal, E. Oró, A. Kruiuzenga, A. Solé, L.F. Cabeza, Mainstreaming commercial CSP systems: A technology review, *Renew. Energy.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.049>.
- [231] G. Cohen, Operation and efficiency of large-scale solar thermal power plants, *Proc. SPIE.* 2017 (1997) 332–337.
- [232] P. Viebahn, Final report on technical data , costs , and life cycle inventories of solar thermal power plants, *Needs.* (2008) 1–95.
- [233] J.M. Llamas, D. Ballejos, M.R. De Adana, Optimal operation strategies into deregulated markets for 50 MW e parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage, *Energies.* (2019). <https://doi.org/10.3390/en12050935>.
- [234] J.R. José, E. F. Camacho, Centralized and distributed Model Predictive Control for the maximization of the thermal power of solar parabolic-trough plants, *Sol. Energy.* 204 (2020) 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.033>.
- [235] G. Wettermark, Performance of the SSPS solar power plants at Almeria, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME.* 110 (1988) 235–246. <https://doi.org/10.1115/1.3268263>.
- [236] R. Pitz-Paal, A. Amin, M. Bettzüge, P. Eames, F. Fabrizi, G. Flamant, F. Garcia Novo, J. Holmes, A. Kribus, H. Van Der Laan, C. Lopez, P. Papagiannakopoulos, E. Pihl, P. Smith, H.J. Wagner, Concentrating solar power in Europe, the Middle East and North Africa: Achieving its potential, *EPJ Web Conf.* 33 (2012) 1–8. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20123303004>.
- [237] Z. Aqachmar, A. Allouhi, A. Jamil, B. Gagouch, T. Kousksou, Parabolic trough solar thermal

- power plant Noor I in Morocco, *Energy*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.160>.
- [238] T.P. Fluri, The potential of concentrating solar power in South Africa, *Energy Policy*. (2009). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.017>.
- [239] X. Li, J. Jin, D. Yang, N. Xu, Y. Wang, X. Mi, Comparison of tower and trough solar thermal power plant efficiencies in different regions of China based on SAM simulation, in: *AIP Conf. Proc.*, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5117545>.
- [240] A. Wang, J. Liu, S. Zhang, M. Liu, J. Yan, Steam generation system operation optimization in parabolic trough concentrating solar power plants under cloudy conditions, *Appl. Energy*. 265 (2020) 114790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114790>.
- [241] N.R. Avezova, A.E. Khaitmukhamedov, A.Y. Usmanov, B.B. Boliyev, Solar thermal power plants in the world: The experience of development and operation, *Appl. Sol. Energy (English Transl. Geliotekhnika)*. 53 (2017) 72–77. <https://doi.org/10.3103/S0003701X17010030>.
- [242] N. Corral, N. Anrique, D. Fernandes, C. Parrado, G. Cáceres, Power, placement and LEC evaluation to install CSP plants in northern Chile, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.006>.
- [243] M. Hanel, R. Escobar, Influence of solar energy resource assessment uncertainty in the levelized electricity cost of concentrated solar power plants in Chile, *Renew. Energy*. 49 (2013) 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.056>.
- [244] M.S. Al-Soud, E.S. Hrayshat, A 50 MW concentrating solar power plant for Jordan, *J. Clean. Prod.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.002>.
- [245] K. Mohammadi, H. Khorasanizadeh, The potential and deployment viability of concentrated solar power (CSP) in Iran, *Energy Strateg. Rev.* 24 (2019) 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.04.008>.
- [246] I. Purohit, P. Purohit, Techno-economic evaluation of concentrating solar power generation in India, *Energy Policy*. (2010). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.041>.
- [247] N. Singh, S.C. Kaushik, Economic evaluation of solar thermal power generation: A case study for indian conditions, *Int. J. Sol. Energy*. 18 (1995) 1–15. <https://doi.org/10.1080/01425919508914301>.
- [248] K. Kaygusuz, Prospect of concentrating solar power in Turkey: The sustainable future, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2011). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.042>.
- [249] T. Makhbal, S. Sukchai, P. Thanarak, Techno-economic assessment of future perspectives of the concentrated solar power plant in Mongolia, 7 (2012).
- [250] T.M. Pavlović, I.S. Radonjić, D.D. Milosavljević, L.S. Pantić, A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.042>.
- [251] S. Ziuku, L. Seyitini, B. Mapurisa, D. Chikodzi, K. van Kuijk, Potential of Concentrated Solar Power (CSP) in Zimbabwe, *Energy Sustain. Dev.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.006>.
- [252] R. Djebbar, D. Belanger, D. Boutin, E. Weterings, M. Poirier, SolarPACES 2013 potential of concentrating solar power in Canada, *Energy Procedia*. 49 (2013) 2303–2312.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.244>.

- [253] E.R. Shouman, N.M. Khattab, Future economic of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Egypt, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.067>.
- [254] M. Balghouthi, S.E. Trabelsi, M. Ben Amara, A.B.H. Ali, A. Guizani, Potential of concentrating solar power (CSP) technology in Tunisia and the possibility of interconnection with Europe, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.052>.
- [255] M.H.B.M.T.H.H.B. Demuth, *Neural Network Toolbox Reference*, MathWorks. (2015) 532.
- [256] *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*, Choice Rev. Online. (1997). <https://doi.org/10.5860/choice.35-0330>.
- [257] F. Despagne, *Neural networks in multivariate calibration*, in: *Analyst*, 1998. <https://doi.org/10.1039/a805562i>.
- [258] A. Bassam, R.A. Conde-Gutierrez, J. Castillo, G. Laredo, J.A. Hernandez, Direct neural network modeling for separation of linear and branched paraffins by adsorption process for gasoline octane number improvement, *Fuel.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.080>.
- [259] G. Garson, *Interpreting Neural-Network Connection Weights*, AI Expert. Mill. Free. Inc., San Fr. (1991) 46.
- [260] R.A. Conde-Gutiérrez, U. Cruz-Jacobo, A. Huicochea, S.R. Casolco, J.A. Hernández, Optimal multivariable conditions in the operation of an absorption heat transformer with energy recycling solved by the genetic algorithm in artificial neural network inverse, *Appl. Soft Comput. J.* 72 (2018) 218–234. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.008>.
- [261] J.A. Hernández, D. Colorado, O. Cortés-Aburto, Y. El Hamzaoui, V. Velazquez, B. Alonso, Inverse neural network for optimal performance in polygeneration systems, in: *Appl. Therm. Eng.*, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.041>.
- [262] J.A. Hernández, Optimum operating conditions for heat and mass transfer in foodstuffs drying by means of neural network inverse, *Food Control.* 20 (2009) 435–438. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.07.005>.
- [263] Y. Ding, W. Zhang, L. Yu, K. Lu, The accuracy and efficiency of GA and PSO optimization schemes on estimating reaction kinetic parameters of biomass pyrolysis, *Energy.* 176 (2019) 582–588. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.030>.
- [264] D. Whitley, A genetic algorithm tutorial, *Stat. Comput.* 4 (1994) 65–85. <https://doi.org/10.1007/BF00175354>.
- [265] K.R. Ram, S.P. Lal, M.R. Ahmed, Design and optimization of airfoils and a 20 kW wind turbine using multi-objective genetic algorithm and HARP_Opt code, *Renew. Energy.* 144 (2019) 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.040>.
- [266] A.M. Abdelsalam, M.A. El-Shorbagy, Optimization of wind turbines siting in a wind farm using genetic algorithm based local search, *Renew. Energy.* 123 (2018) 748–755. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.083>.
- [267] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, in: *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, 1995.

- [268] A. Maleki, M. Ameri, F. Keynia, Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system, *Renew. Energy*. 80 (2015) 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.045>.
- [269] S. Bana, R.P. Saini, Identification of unknown parameters of a single diode photovoltaic model using particle swarm optimization with binary constraints, *Renew. Energy*. 101 (2017) 1299–1310. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.010>.
- [270] E. Venegas-Reyes, O.A. Jaramillo, R. Castrejón-García, J.O. Aguilar, F. Sosa-Montemayor, Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation, *J. Renew. Sustain. Energy*. 4 (2012) 42–59. <https://doi.org/10.1063/1.4751461>.
- [271] O.A. Jaramillo, M. Borunda, K.M. Velazquez-Lucho, M. Robles, Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts, *Renew. Energy*. 93 (2016) 125–141. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.046>.
- [272] Y.M. Slokar, J. Zupan, A.M. Le Marechal, The use of artificial neural network (ANN) for modeling of the H₂O₂/UV decoloration process: Part I, *Dye. Pigment*. 42 (1999) 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(99\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(99)00022-4).
- [273] S.A. Kalogirou, Performance of Solar Collectors, in: *Sol. Energy Eng.*, Elsevier, 2009: pp. 219–250. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374501-9.00004-2>.
- [274] P.B. Maheshwary, C.C. Handa, K.R. Nemade, S.R. Chaudhary, Role of nanoparticle shape in enhancing the thermal conductivity of nanofluids, *Mater. Today Proc.* 28 (2019) 873–878. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.315>.
- [275] J. Muñoz, A. Abánades, Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools, *Appl. Energy*. (2011). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.026>.
- [276] M.A. Ehyaei, A. Ahmadi, M.E.H. Assad, A.A. Hachicha, Z. Said, Energy, exergy and economic analyses for the selection of working fluid and metal oxide nanofluids in a parabolic trough collector, *Sol. Energy*. 187 (2019) 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.046>.
- [277] E. Bellos, C. Tzivanidis, D. Tsimpoukis, Enhancing the performance of parabolic trough collectors using nanofluids and turbulators, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91 (2018) 358–375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.091>.
- [278] S. Gunes, V. Ozceyhan, O. Buyukalaca, Heat transfer enhancement in a tube with equilateral triangle cross sectioned coiled wire inserts, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34 (2010) 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.12.010>.
- [279] S. Eiamsa-ard, P. Nivesrangsarn, S. Chokphoemphun, P. Promvong, Influence of combined non-uniform wire coil and twisted tape inserts on thermal performance characteristics, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37 (2010) 850–856. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.05.012>.
- [280] S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics in a circular tube fitted with V-nozzle turbulators, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* (2006). <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.02.022>.
- [281] W. Ajbar, A. Parrales, U. Cruz-Jacobo, R.A. Conde-Gutiérrez, A. Bassam, O.A. Jaramillo, J.A. Hernández, The multivariable inverse artificial neural network combined with GA and

PSO to improve the performance of solar parabolic trough collector, *Appl. Therm. Eng.* (2021) 116651. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116651>.