



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS BASICAS APLICADAS.**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA  
Y CIENCIAS APLICADAS.**

**“DESARROLLO EXPERIMENTAL Y MODELADO  
EMPÍRICO DEL COLECTOR SOLAR PARABÓLICO DE  
BAJO COSTO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS OPCIÓN TERMINAL  
EN TECNOLOGÍA QUÍMICA.**

**MICA. CARDOSO HERRERA EDGAR.**

**Directores de tesis  
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ P.  
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ.**

**CUERNAVACA, MORELOS.**

**JUNIO 2019**

## RESUMEN.

El presente trabajo y de acuerdo con el consumo de los combustibles fósiles así como con la contaminación ambiental, es necesario hacer cada vez más eficiente el uso de la energía con base en las diferentes fuentes de energía renovable, como es la solar particularmente. Para este caso se presenta una propuesta experimental, que inicia con el diseño, instalación y montaje de un tren de concentradores solares. Un concentrador solar es un tipo de intercambiador de calor, el cual transforma la energía radiante en calor. Dentro del análisis que se presenta en este trabajo de investigación sobre los concentradores solares de tipo colector cilindro parabólico o canal parabólico (CCP), es un estudio teórico – experimental a las diferentes superficies reflectoras de cada colector: como son superficie reflectora acero inoxidable tipo 316 L, y superficie reflectora acero inoxidable tipo 304. Se desarrolló diferentes configuraciones de CCP para analizar y discutir el incremento de la energía útil ( $Q_u = kW$ ) y rendimiento del colector ( $n = \%$ ). Los resultados promedio demuestran que los máximos incrementos experimentales en rendimiento y energía útil para cada concentrador son: concentrador de acero inoxidable tipo 316 L  $Q_u = 50.5 kW$  y  $n = 37 \%$ . Con respecto al concentrador de acero inoxidable 304 CCP, los resultados obtenidos son satisfactorios demostrando de esta manera que los CCP con mejores resultados fueron el tipo acero inoxidable 316L y acero inoxidable tipo 304. Por lo tanto es recomendable utilizar el modelo experimental como una herramienta de apoyo para el diseño en computación. Finalmente se desarrolló un modelo matemático basado con redes neuronales con la finalidad de predecir y optimizar la eficiencia energética del CCP. El modelo consistió en una estructura de 7 neuronas de entrada, 25 neuronas en la capa oculta y 1 neuronal en la capa de salida. El modelo predice satisfactoriamente la temperatura de salida del CCP con un coeficiente de correlación de 0.99.

## **ABSTRACT.**

The present work and in accordance with the consumption of fossil fuels as well as with environmental pollution, it is necessary to make more efficient use of energy based on different sources of renewable energy, such as solar in particular. For this case an experimental proposal is presented, which begins with the design, installation and assembly of a train of solar concentrators. A solar concentrator is a type of heat exchanger, which transforms radiant energy into heat. Within the analysis presented in this research work on solar concentrators of the parabolic trough cylinder or parabolic trough type (CCP), it is a theoretical - experimental study of the different reflecting surfaces of each collector: how are 316 stainless steel reflective surface L, and type 304 stainless steel reflective surface. Different CCP configurations were developed to analyze and discuss the increase in useful energy ( $Q_u = \text{kW}$ ) and collector performance ( $n = \%$ ). The average results show that the maximum experimental increases in performance and useful energy for each concentrator are: stainless steel concentrator type 316 L  $Q_u = 50.5 \text{ kW}$  and  $n = 37\%$ . With respect to the 304 CCP stainless steel concentrator, the results obtained are satisfactory, demonstrating in this way that the CCP with the best results was the type 316L stainless steel and type 304 stainless steel. Therefore it is advisable to use the experimental model as a tool for support for computer design. Finally, a mathematical model based on neural networks was developed in order to predict and optimize the energy efficiency of the CCP. The model consisted of a structure of 7 input neurons, 25 neurons in the hidden layer and 1 neuronal in the output layer. The model successfully predicts the output temperature of the CCP with a correlation coefficient of 0.99.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A **Dios** gracias por la vida que me ha dado

Por los días buenos y los días malos.

Dedico el presente trabajo a **Miriam** y **Ayeen** porque

Gracias a nuestro amor somos una familia feliz.



Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su apoyo, consejo y asesoría hicieron posible la realización de este trabajo.

- ✓ Al centro de investigación en ingeniería y ciencias aplicadas por permitirme realizar los estudios de maestría y trabajo de investigación.
- ✓ Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*, por el apoyo económico para la realización de este proyecto.
- ✓ En particular, a la Dra. SUSANA SILVA MARTÍNEZ, Por la oportunidad brindada y por creer en mí para la realización de este proyecto.
- ✓ Mi más sincero agradecimiento, aprecio y respeto, al Dr. J ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ. Por la confianza depositada en mi persona, la asesoría, el apoyo y las facilidades brindadas en el laboratorio de Simulación y automatización.
- ✓ Gracias a todos mis catedráticos del centro de investigación en ingeniería y ciencias aplicadas. porque con sus conocimientos contribuyeron a mi formación académica.
- ✓ Todo mi aprecio a mis compañeros y amigos del cubil felino Darío, Víctor, Youhess.

Nunca tanto como hoy día, gracias al progreso de la ciencia  
El universo manifiesta al hombre la grandeza y hermosura de Dios  
Pero, al hacerse hombre, el hijo de Dios  
Ha colocado al hombre por encima de toda la creación material  
Y recalcado la igualdad fundamental de todos los hombres.

**Salmo 8**

[Biblia latino americana, ed. verbo divino, 43 ediciones, 2002]

La ciencia no reside en las sensaciones  
Sino en el razonamiento sobre las sensaciones,  
Puesto que, según parece, sólo por el razonamiento  
Se puede descubrir la ciencia y la verdad.

**Platón o de la ciencia**

[Platón, Diálogos, Teetetes o de la ciencia, ed. Porrúa, 1993]

**INDICE GENERAL.**

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
INDICE GENERAL.....	6
Lista de tablas.....	8
Lista de figuras.....	9
Nomenclatura.....	10
CAPITULO I.....	12
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	12
EL SOL.....	14
TIERRA.....	15
ENERGIA.....	16
CAPITULO II.....	17
<i>ANTECEDENTES: ESTADO DEL ARTE</i> .....	17
GENERALIDADES (RECURSO SOLAR).....	19
COECTORES SOLARES.....	19
FUNCIONAMIENTO DEL CALENTADOR.....	20
Componentes de un colector solar.....	21
Medición de la radiación solar.....	22
HIPOTESIS.....	22
OBJETIVO.....	23
CAPITULO III.....	23
METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	23
Descripción de concentradores.....	24
Superficie concentradora.....	25
Superficie receptora.....	27
Montaje e instrumentación.....	28
Cálculos de energía.....	29
CAPITULO IV.....	32
RESULTADOS.....	32
Descripción del equipo para obtener los datos experimentales.....	32

4.1.1. Condiciones de operación .....	35
4.2 Red neuronal artificial para predecir la temperatura de salida del fluido .....	36
CAPITULO V .....	51
<i>CONCLUSIONES GENERALES</i> .....	51
REFERENCIAS.....	53
<i>PRODUCTOS OBTENIDOS</i> .....	56

## **Lista de tablas**

Tabla 4.1 Condiciones de operación de entrada y salida de la RNA. ....	36
Tabla 4.2 Comparación estadística y de significancia para diferentes arquitecturas. .	40
Tabla 4.3 Valores de los pesos y bias de la ARN. ....	47

## **Lista de figuras**

Figura 3 1 Esquema general del tren de colectores, con accesorios y tanques. ....	24
Figura 3 2 Concentrador con espejos. ....	25

Figura 3 3 Concentrador con lamina de acero inoxidable tipo 316 L.....	26
Figura 3 4 Concentrador con lámina de aluminio.....	26
Figura 3 5 Concentrador con pintura de aceite color aluminio.....	27
Figura 3 6 Concentrador con lámina de acero inoxidable tipo 304. ....	27
Figura 3 7 Azotea del CIICAp vista general de los concentradores, tuberías y tanque de alimentación y tanque de recepción. ....	28
figura 3 8 Diseño de termo pozo. ....	29
Figura 4 1 Esquema sistema del colector solar de bajo costo. ....	35
figura 4 2 Variables del modelo RNA para el sistema del colector solar de bajo costo. ....	37
Figura 4 3 Arquitectura del modelo RNA para el sistema del colector solar de bajo costo. ....	38
Figura 4 4 Comparación de los modelos a diferentes días.....	44
Figura 4 5 Regresión lineal y comparación entre los datos experimentales y simulados para el modelo con 25 neuronas en la capa oculta. ....	45
Figura 4 6 Análisis de sensibilidad de variable del modelo con 25 neuronas.....	50
Figura 5 1 Tren de concentradores trabajando en día normal. ....	52

## Nomenclatura.

Símbolo	Descripción	Unidades
---------	-------------	----------

Rd.	<u>Radiación directa</u> : es la que se recibe directamente del sol sin haber sufrido ninguna desviación en su trayectoria.	-
Rdi.	<u>Radiación difusa</u> : se debe a su dispersión al atravesar la atmosfera y reflexión sobre la tierra.	-
Cs.	<u>Colector solar</u> : dispositivo que absorbe la radiación solar y transfiere su energía a un fluido.	-
Co.	<u>Concentrador</u> : dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor.	-
Ab.	<u>Absorbedor (Receptor)</u> : componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar.	-
Aa.	<u>Área de apertura</u> : área del captador que intercepta la radiación.	-
ONU	Organización de las naciones unidas.	
KIOTO	El protocolo de Kioto sobre el cambio climático.	-
UNFCCC	De las naciones unidas sobre el cambio climático.	-
GEI	Gases de efecto invernadero.	-
CCP	Concentrador solar.	-
DIA	Aplicación informática para la creación de diagramas.	-
MATLAB	Software Matemático. Laboratorio de matrices.	-
CPVC	Cloruro de polivinilo tratado con cloro.	-
CCP	Concentrador parabólico compuesto.	-
CCP	Concentrador parabólico compuesto.	-
QU	Cantidad de energía útil extraída por unidad de tiempo.	KW
F <sub>R</sub>	Factor de remoción de calor.	-
I <sub>s</sub>	Irradiancia solar útil.	W
A <sub>a</sub>	Área de apertura del concentrador.	m <sup>2</sup>
A <sub>r</sub>	Área del absorbedor.	m <sup>2</sup>
U <sub>L</sub>	Coefficiente global de pérdidas del colector.	-
T <sub>a</sub>	Temperatura ambiente.	°C

$T_i$	Temperatura media en la superficie de la placa colectora.	$^{\circ}\text{C}$
$C$	Razón de concentración.	-
$\text{Sin } \theta_s$	Semi-ángulo de aceptación.	-
$h_w$	Coefficiente convectivo.	-
$h_r$	Coefficiente radiativo.	-
$A_c$	Superficie del receptor.	$\text{m}^2$
$R_b$	Factor geométrico.	-

## **CAPITULO I.**

### *INTRODUCCIÓN.*



“No sé qué opina el mundo de mí; pero yo me siento como un niño que juega en la orilla del mar, y se divierte descubriendo que de vez en cuando un guijarro más liso o una concha más bella de lo corriente, mientras el gran océano de la verdad se extiende ante, todo para descubrir” Newton.

La curiosidad del niño conquistó su propio temor. Cuando era pequeño recuerdo que vivía en una colonia sencilla a un par de calles pasaba el tren frecuentemente, y como fiel enamorado cuando escuchaba el silbato del tren que se acercaba. En el lugar que me encontrara de la casa, me ponía de pie y salía corriendo para ver, contemplar, admirar el paso de tan grande belleza. En algunas ocasiones cuando llegaba a la esquina de la casa para contemplarlo ya había pasado el tren. Pero no por eso me desanimaba. Mañana vendrá de nuevo.

En la mañana sutil del asombro, no hay nada más impresionable que la imaginación de un niño, recuerdo que en mis mocedades papá me obsequio una lupa, recuerdo haber tratado de quemar, papel, un muñeco de plástico, mi mano entre otras cosas. Desconocía el término empírico, el método científico. Ahora entiendo y comprendo términos técnicos, científicos como colector solar, concentrador solar, efecto invernadero, energías renovables.

La tierra es nuestro hogar, es sobre este mundo donde desarrollamos nuestra pasión por explorar. El traspaso de casa es la imaginación que queda impresa en nuestros sentidos, hace unos días haciendo el jardín de casa, acompañado de mi incansable compañera mi hija. Encontramos un insecto, lo tome entre mis manos y se lo mostré. El asombro dibujado en su rostro me recordó que tenemos el privilegio de vivir entre personas brillantes, apasionadamente inquisitivas y en una época en que se premia generalmente la búsqueda del conocimiento

## EL SOL.

Apenas había el rubicundo apolo tendido por la faz de la mancha y espaciosa tierra las doradas hebras de sus hermosos cabellos, y apenas los pequeños y pintados pajarillos con sus arpadas lenguas había saludado con dulce y melifua armonía la venida de la rosada aurora que dejando la blanca cama del celoso marido, por las puertas y balcones del manchego horizonte a los mortales se mostraba, cuando el famoso caballero Don quijote de la mancha, dejando las ociosas plumas; subió sobre su famoso caballo rocinante, y comenzó a caminar por el antiguo y conocido campo de Montiel. (El ingenioso hidalgo, don miguel de Cervantes).

El sol es la estrella más cercana a la tierra la cual se encuentra situada a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la tierra tiene un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m. el núcleo solar es la región comprendida entre 23 % de su radio, a partir del centro. Éste corresponde a tan solo el 15% del volumen pero contiene al 40 % de la masa y genera el 90% de la energía. En esta región la energía es del orden de  $10^7$  kW y la densidad de  $10^5$  kg m<sup>-3</sup> posee una masa de  $2 \times 10^{30}$  kg por lo tanto es 333 veces más pesado que la, tierra, el núcleo del sol tiene una temperatura de  $15 \times 10^6$  °C y esta va disminuyendo hasta llegar hasta la superficie solar donde posee una temperatura promedio de 5.770 °C se estima que la edad de la estrella es de unos  $5000 \times 10^6$  años y se estima que seguirá viviendo durante un periodo similar. La parte del sol conocida como fotosfera es conocida como la superficie del sol de donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio. Todo el sol desde la superficie hasta el núcleo se encuentra en forma gaseosa, no existe una superficie física claramente definida, sobre la fotosfera, también existen gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, que constituyen la corona solar, ésta es la atmosfera del sol. (Plana, Rusell, Urutia, 2005).

El sol es la fuente de energía que calienta en su totalidad la tierra, el aire y el mar. No sería posible la vida en nuestro planeta. La potencia irradiada es por lo tanto tan basta y equivalente a una disminución de cuatro millones de toneladas por segundo de la masa del sol de acuerdo con Valero Michael. Por lo tanto la energía irradiada emitida por el sol, proveniente de las reacciones termonucleares como la fusión de átomos de deuterio para dar átomos de helio. Un porcentaje de esta energía llega a la tierra en forma de radiación electromagnética.

El planeta tierra es un diminuto grano de roca que refleja la luz del sol recibe en el exterior de su atmosfera una potencia más o menos de  $1.73 \times 10^{14}$  kW conforme con lo anterior podemos decir que La fuente de energía solar puede estimarse como inagotable.

## **TIERRA**

Los planetas del sistema solar, son mundos pesados, cautivos del sol, obligados gravitatoriamente en orbitas casi circulares. Atraídos como polillas al centro de la luminaria nocturna. Por lo tanto todos los planetas están en órbita alrededor del sol.

El planeta tierra lugar de cielos azules de nitrógeno, océanos de agua líquida, bosques frescos y prados suaves, un mundo donde se oye de modo evidente el murmullo de la vida (Sagan Calr. 1983).

De aquel rincón bañado por los fulgores del sol que el cielo triunfante llena, de la florida tierra donde entre flores se deslizo mi infancia, dulce y serena. (Poema, Marcos Rafael Blanco Belmonte). Es hermosa la descripción de Belmonte sobre el planeta tierra.

Los seres humanos nacidos en definitiva de las estrellas. Somos chispas irrisorias en relación con el universo. Como pequeñas manifestaciones de

energía, la energía se encuentra en torno a nosotros por todas partes y se manifiesta de numerosas formas diferentes.

## **ENERGIA.**

El termino energía por definición del griego (en) y ergon (trabajo) concepto científico más aceptado de energía. De acuerdo con lo anterior los cuerpos poseen cierta capacidad para realizar trabajo. La cual puede tener su origen en su constitución, en la posición que ocupan en un campo gravitatorio o eléctrico, en su estado de movimiento.

A esta capacidad de realizar trabajo que poseen los cuerpos se les denomina energía. La energía por lo tanto es una magnitud homogénea con el trabajo. La llevamos en lo más hondo de nosotros mismos, el uso de la energía ha acompañado a la actualidad de los seres humanos desde la más remota actualidad. Históricamente la humanidad contaba únicamente con la fuerza muscular. Por lo tanto podríamos considerarnos hombres – maquina, ya que con nuestro sudor y la consistencia de rudimentarias poleas palancas, vehículos de tracción animal y molinos de viento llegamos a construir pirámides, acueductos y catedrales. La mera existencia del ser humano exige que este ingiera alimentos que no sean otra cosa que combustible biológico. La energía es el motor del combustible social, económico y tecnológico de la humanidad. Por lo tanto ha sido la base para la transformación de las sociedades desde la primitiva, cazadora de carácter nómada, primitiva agrícola, agrícola avanzada, la industrial y finalmente la sociedad tecnológica que consume petróleo, el fundamento de las sociedades modernas, industriales y pos industriales se produce como consecuencia del uso de cantidades de energía desmesuradas, la mayor parte de la energía que se utiliza procede de la combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) de las cuales las reservas son limitadas y su agotamiento será cuestión de plazos no tan largos.

## **CAPITULO II.**

### ***ANTECEDENTES: ESTADO DEL ARTE.***

Cada vez tenemos mayor dependencia energética y por lo tanto se incrementa nuestra incertidumbre económica, ya que los precios de las energías no renovables van en aumento. En próximos años el conocimiento sobre la

energía solar será aún más notable, mostrara su capacidad para acoplarse y formar parte del panorama energético. Nuestro país, el cual posee regiones con el promedio mundial de insolación más alto, el aprovechamiento de la energía solar constituye, sin lugar a dudas una buena opción. De acuerdo con lo anterior, ahora contamos con la creciente integración medio ambiental de la sociedad. La energía es indispensable para realizar todas y cada una de las actividades del hombre.

La energía solar es la obtenida mediante la captación de la luz y el calor obtenidos por el sol. Hoy los llamamos energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, y corresponden a la producción de electricidad y agua caliente sanitaria, principalmente. [Iglesias. 2010]. Por lo tanto, la tierra aprovecha la radiación solar que la alcanza, el calor que produce dicha radiación es absorbida mediante dispositivos ópticos. Este dispositivo se conoce con el nombre de calentador solar.

El calentador está constituido principalmente por el elemento colector, tanque receptor el cual almacena el agua caliente y tanque de alimentación. Los calentadores se dividen en dos grupos. Los colectores de baja temperatura y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos. Los primeros pueden destinarse a satisfacer necesidades como la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), calefacción de hogares y hoteles, aplicaciones en agricultura, con este tipo de energía se podría reducir más del 25% de consumo de energía convencional.

Nos centraremos en los colectores de baja temperatura, que proveen calor útil a temperaturas menores a 65 °C para aplicaciones tales como calentamiento domestico de agua para baño, piscinas y en general para todas aquellas actividades industriales en el que el calor de proceso no sea mayor a 60 °C. el rendimiento de la energía solar térmica depende directamente de la

temperatura con la que el sol incide sobre los paneles. Los más altos se consiguen con los colectores solares térmicos a baja temperatura, que puede alcanzar un 70 % de rendimiento en la transferencia de energía solar a térmica. [Iglesias. 2010]

## **GENERALIDADES (RECURSO SOLAR).**

Bajo la perspectiva humana, la fuente energética solar puede considerarse como inagotable, el que esta fuente de energía sea rentable depende de las investigaciones que se realicen, de los recursos económicos destinados a su estudio y del interés que se presente a su desarrollo. Vivimos en una sociedad que se basa en el desarrollo para producir bienes y servicios, a su vez, el funcionamiento de estos dispositivos contribuye directamente al gasto energético. [Sagan Carl, 1980].

Las denominadas energías renovables pueden contribuir a resolver las dificultades de abastecimiento que al parecer se presentarán inevitablemente en un futuro no tan lejano. Autores definen el término energético renovable como. “energía que se obtiene a partir de corrientes de energía continua y recurrentes en el mundo natural”. [González Velazco, 1980]

## **COLECTORES SOLARES.**

Comúnmente para calentar agua se necesita hacerlo con leña, carbón, petróleo, gas o algún otro combustible, también se puede lograr aprovechando la energía emitida por el sol. Hoy en día se consigue hacer un uso directo de la radiación solar que es transformada mediante los correspondientes dispositivos en fototérmica y fotovoltaica respectivamente. El elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil es el

panel solar, pudiendo ser de dos clases: módulos fotovoltaicos y captadores solares térmicos. Estos últimos son conocidos también como colector solar que es un tipo especial de intercambiador térmico, el cual transforma la radiación solar en energía térmica utilizable, para aplicaciones tales como es la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), calentamiento de piscinas, calentamiento domestico calefacción de hoteles y en general, para todas aquellas actividades industriales en el que el calor de proceso no es mayor a 60°C. Con este tipo de energía se podría reducir más del 25 % de consumo de energía convencional en viviendas. [Iglecias Maldonado Pablo, 2010]

## **FUNCIONAMIENTO DEL CALENTADOR.**

El calentador solar funciona bajo dos principios llamados efecto invernadero y efecto termosifón. La combinación de estos efectos, la absorción de la radiación de los objetos negros y el aislamiento para evitar las pérdidas de calor constituyen los principios fundamentales para comprender el funcionamiento de un colector.

Efecto invernadero, para calentar el agua en el colector. Los rayos del sol que pasan a través de la cubierta transparente, son absorbidos por la lámina o placa negra. Al elevarse la temperatura de la placa, ésta transmite su calor a los tubos conductores del liquido caloportador, pero no todo el calor es absorbido, por lo que la placa o lamina emite calor a través de radiaciones infrarrojas, las cuales son reflejadas por la cubierta ya que ésta no permite el paso a este tipo de radiaciones; así evita que el calor recibido por la lamina escape a la atmosfera. [Ramírez. 1979]

El efecto termosifón. Fenómeno que se fundamenta en la variación de la densidad del agua, lo cual indica que es inversamente proporcional al incremento de la temperatura. Así, para hacer fluir el



agua desde el colector hasta el tanque de agua caliente sin el uso de una bomba. [Ramírez. 1979]

Las pérdidas térmicas del colector hacia sus alrededores implican que un porcentaje de la energía absorbida es cedida al entorno del colector y no al fluido hacia el sistema de almacenamiento. El colector tiene limitaciones de tal manera que transforma solo una fracción de la radiación solar recibida en energía útil.

### ***Componentes de un colector solar.***

El colector solar está constituido de tres partes principales: colector, tanque de almacenamiento de agua caliente y tanque de alimentación. A continuación se analizarán las funciones que desempeñan los componentes del calentador.

Cubierta transparente. Su función principal es permitir el paso de los rayos solares que inciden en la placa del colector y al mismo tiempo producir el llamado efecto invernadero. Es suficientemente transparente a la radiación solar y opaca para la radiación en el infrarrojo térmico. Aprovecha tanto la radiación directa como la difusa.

Placa selectiva. Es el elemento que recibe los rayos solares y los refleja al receptor, tiene una alta absorción de la energía emitida por el sol y una baja emisividad de la misma, permitiendo así absorber la luz del sol y convertir la mayor parte de ella en calor. Es importante que el material de ésta placa selectiva sea muy buen conductor térmico.

Tubo receptor. Es por el cual circula el agua, la cual se calienta por contacto con la pared, por esta razón es necesario que estén hechos de un material que sea buen conductor térmico.

Aislante térmico. Esta parte del colector sirve para evitar las fugas de calor por la parte inferior del mismo, logrando así que el calor que se obtiene en el colector no escape hacia el exterior, éste aislante puede ser fibra de vidrio y espumas sintéticas.

Armazón. La cual contiene los elementos integrantes del colector ya descritos. Y los protege de las inclemencias del tiempo.

### ***Medición de la radiación solar.***

Básicamente existen dos equipos para la medición de la radiación solar.

El piranómetro: este recibe la radiación en todas las direcciones del hemisferio, por lo tanto mide la radiación global, la adición de radiación directa y difusa incidentes en una superficie.

El pirheliómetro: tiene una abertura colimada que restringe su visión de la bóveda celeste, habitualmente a 5° se utiliza para la medida de la radiación directa. Enfocándolo al sol.

## **HIPOTESIS.**

Este trabajo es una continuación de un estudio realizado a un tren de concentradores solares. En el trabajo anterior se diseñó y evaluó comparativamente la eficiencia y energía útil de cada colector. Los resultados experimentales demostraron que dos de los concentradores solares tuvieron mejores eficiencias por encima de los demás concentradores siendo los concentradores acero inoxidable tipo 316L y 304 respectivamente. Por lo tanto en el presente trabajo se pretende evaluar y optimizar en condiciones de

diseño el tren de concentradores solares. Realizar pruebas experimentales a diferentes flujos, aplicar técnicas de optimización como pueden ser redes neuronales artificiales (ANN).

## **OBJETIVO.**

Estudiar el diseño y evaluar comparativamente la eficiencia y energía útil de un tren de concentradores solares por medio de redes neuronales artificiales (ANN).

1. Evaluar comparativamente condiciones de diseño de un concentrador solar (CP) contra un concentrador parabólico compuesto (CPC) en el tren de concentradores solares.
2. Realizar pruebas experimentales para comparar eficiencia y energía útil de cada concentrador solar.
3. Diseñar y aplicar técnicas de optimización por medio de redes neuronales (ANN).

## **CAPITULO III.**

### ***METODOLOGÍA Y MATERIALES.***

Para los criterios de diseño, el calentador solar funciona bajo dos principios fundamentales. El efecto termosifón y el efecto invernadero, con base en lo anterior y por lo tanto la planeación del trabajo nos lleva al diseño, dibujo de la

instalación del equipo, para esto se utilizó software “DIA”<sup>1</sup>, se realizaron diferentes dibujos hasta llegar al apropiado. Un tren de concentradores solares (figura 3.1). La observación a este diseño es para poder ejemplificar el trabajo de los concentradores de tal manera como si estuvieran operando individualmente, y así tener libre accesibilidad a la colección de los datos diarios para tener un comparativo entre cada uno de ellos.

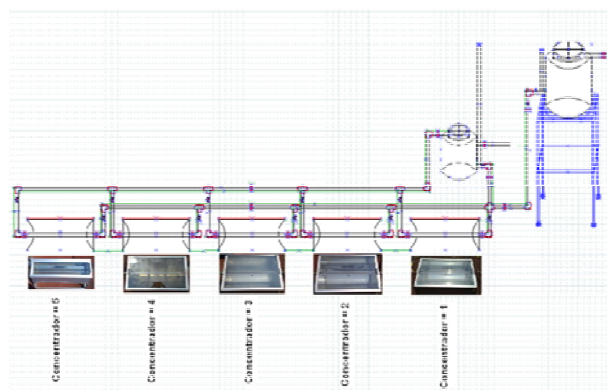


Figura 3 1 Esquema general del tren de colectores, con accesorios y tanques.

### ***Descripción de concentradores.***

El concentrador solar está diseñado en una base general, Consiste de un bidón de lámina de acero con una capacidad de 216.5 L, el cual está cortado verticalmente obteniéndose dos medias cañas. Estas con dimensiones de 85 cm de largo por 57 cm de diámetro. El concentrador está montado en una base estructural que le permite ser fijado al piso. El exterior está pintado de negro mate y en el interior va montada la superficie concentradora.

---

<sup>1</sup> Dia. Aplicación informática de propósito general para la creación de diagramas, diagramas de redes, diagramas de circuitos eléctricos.

### ***Superficie concentradora.***

El concentrador es el sistema óptico encargado de dirigir la radiación directa solar hacia el receptor. Existen diferentes tipos de superficies concentradoras, es importante ya que aumenta la eficiencia de los dispositivos de captación. Con base en lo anterior y para poder realizar la comparación entre los concentradores se modificaron las superficies reflejantes de 5 concentradores de la siguiente manera.

1. Arreglo con espejos: la superficie reflejante consta de 34 piezas de espejos de 84 cm de largo por 2 cm de ancho y 3 mm de espesor, fijados en la parte interna del concentrador así como lo muestra la figura 3.2.

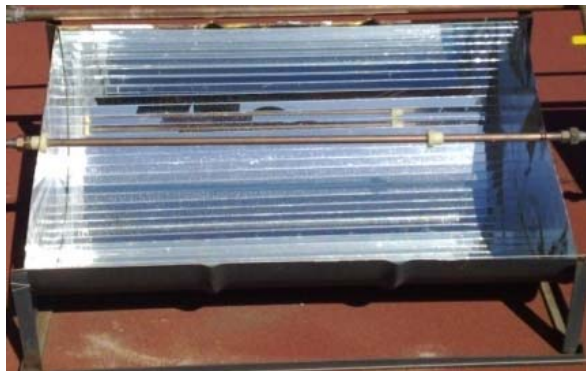


Figura 3 2 Concentrador con espejos.

2. Arreglo con lámina de acero inoxidable: la superficie reflejante consta de una lámina de acero inoxidable tipo 316L calibre 16, con pulimento espejo lado interior, rolada a media caña. Como lo muestra la figura 3.3.



Figura 3 3 Concentrador con lamina de acero inoxidable tipo 316 L.

3. Arreglo con lámina de aluminio: la superficie reflejante consta de una lámina de aluminio, rolada a media caña, con pulimiento lado interior. Como se muestra en la siguiente figura 3.4.



Figura 3 4 Concentrador con lámina de aluminio.

4. Arreglo con pintura reflejante: la superficie reflejante es una pintura de aceite para altas temperaturas con partículas de aluminio, pintada sobre la lámina interna del colector. Como se muestra en la siguiente figura 3.5.



Figura 3 5 Concentrador con pintura de aceite color aluminio.

5. Arreglo con lámina de acero inoxidable: la superficie reflejante consta de una lámina de acero inoxidable tipo 304, calibre 16, con pulimento espejo lado interior, rodada a manera de concentrador parabólico compuesto. Como lo muestra la figura 3.6.



Figura 3 6 Concentrador con lámina de acero inoxidable tipo 304.

### ***Superficie receptora.***

El receptor es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida en algún tipo de energía. El receptor utilizado para los

concentradores. Consta de un tubo de cobre de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro por 90 cm de largo. Pintado de negro mate para así captar mejor la radiación solar.

Tubo foco, enchaqueta al tubo de cobre, este tubo foco consta de dos tubos de vidrio de diferentes diámetros unidos, con tapas roscadas en los extremos, con la finalidad de aprovechar mejor el efecto invernadero.

Con fin de aprovechar mejor el efecto invernadero y evitar pérdidas de calor en el concentrador, se decidió implementar una tapa de vidrio de 85 cm. de largo por 57 cm. de ancho y 5 mm de espesor, con marco de aluminio y pestañas para permitir su libre movimiento.

### ***Montaje e instrumentación.***

El tren de concentradores solares consta de 5 concentradores con diferentes arreglos, orientación este-oeste. Ver figura 3.7.



**Figura 3 7 Azotea del CHICAp vista general de los concentradores, tuberías y tanque de alimentación y tanque de recepción.**

El área de interés para esta investigación es el concentrador y el receptor, la segunda es donde sucede el intercambio de energía solar en energía térmica, por lo tanto, es de suma importancia monitorear lo que sucede al principio del tubo receptor y al finalizar, para esto se utilizan termopares tipo (T), una tarjeta



de adquisición un software y equipo de cómputo. Se diseñó un termo pozo adecuado para las necesidades del presente trabajo. Consiste en un tapón macho de latón de  $\frac{1}{2}$ " perforado, en el cual se ha soldado un tubo de cobre flexible que sirve de guía para el termopar, ver figura 3.8.



figura 3 8 Diseño de termo pozo.

### ***Cálculos de energía.***

Para entender los fenómenos de transferencia de energía del sistema concentrador receptor hacia el fluido se establece un modelo termodinámico

donde el sistema en estudio es el receptor del concentrador, para el modelo que se ha desarrollado se usa la ecuación 3.1 [Duffie, Beckman. 2006].

Balance de energía, del colector en un instante de tiempo dado es la diferencia entre la energía absorbida por la placa absorbente y la energía perdida.

$$Q_U = F_R A_a \left[ I_s - \frac{A_r}{A_a} U_l (T_i - T_a) \right] \quad 3.1$$

Donde:

$Q_U$  = Cantidad de energía útil extraída por unidad de tiempo.

$F_R$  = Factor de remoción de calor.

$I_s$  = Irradiancia solar útil.

$A_a$  = Área de apertura del concentrador.

$A_r$  = Área del absorbedor.

$U_L$  = Coeficiente global de pérdidas del colector.

$T_a$  = Temperatura ambiente.

$T_i$  = Temperatura media en la superficie de la placa colector.

Razón de concentración: Esta razón de concentración tiene un límite máximo que depende de si la concentración se hace en un concentrador circular como un paraboloide o en un lineal como un concentrador cilíndrico parabólico. La razón de concentración máxima para un concentrador lineal se calcula de la siguiente manera ecuación 3.2 [Duffie, Beckman. 2006].

$$C = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad 3.2$$

Donde:

$\sin \theta_s$  = Semi-ángulo de aceptación.

Entre más alta es la temperatura a la cual la energía necesita ser liberada, más alta debe ser la razón de concentración y también más precisos deben ser los

componentes ópticos del concentrador, receptor y el mecanismo de seguimiento del sol.

Coeficiente de transferencia de calor. El coeficiente global de pérdidas queda definido por las pérdidas convectivas de la siguiente manera por la ecuación 3.3 [Duffie, Beckman. 2006].

$$U_L = h_w + h_r \quad 3.3$$

Donde:

$h_w$  = Coeficiente convectivo.

$h_r$  = Coeficiente radiativo.

Rendimiento del concentrador. El rendimiento instantáneo de un colector se define por la ecuación 3.4 [Duffie, Beckman. 2006].

$$h = \frac{Q_u}{A_c * I_s * R_b} \quad 3.4$$

Donde:

$Q_u$  = Cantidad de energía útil extraída por unidad de tiempo.

$A_c$  = Superficie del receptor.

$I_s$  = Irradiancia solar útil.

$R_b$  = Factor geométrico.

El modelo del colector está basado en un balance de energía para la primera ley de la termodinámica. En los experimentos se esperan obtener la radiación absorbida por el receptor, las temperaturas del agua a la entrada y salida del receptor. El modelo teórico desarrollado en este capítulo es muy sencillo y se implementa fácilmente. Como se muestra en capítulo posterior.

## **CAPITULO IV.**

### **RESULTADOS.**

#### ***Descripción del equipo para obtener los datos experimentales***

Como ya mencionamos anteriormente, un colector estático con concentrador de canal parabólico (CCP) solar de placa reflejante de lámina de acero

inoxidable tipo 316L calibre 16 con pulimiento espejo del lado interior. Se eligió este colector solar porque fue el más viable al tener mejores resultados en su rendimiento de colección (37%) y una mejor energía térmica utilizable (ya incluye las pérdidas) con 50.5 kW (Cardoso et al. 2013).

El concentrador consta de un bidón de lámina de acero cortado verticalmente con dimensiones de 85 cm de largo por 57 cm de diámetro. La superficie receptora se constituye de un tubo de cobre de 1.27 cm de diámetro ( $\frac{1}{2}$  pulgada) por 90 cm de largo y está pintado de negro para tener una mayor absorción.

Para evitar pérdidas convectivas y aprovechar el efecto invernadero, se tiene una tapa de vidrio de 85 cm de largo por 57 cm de ancho, con un marco de aluminio.

Esta instrumentado con termopares tipo T debidamente calibrados para medir la temperatura en las siguientes zonas:

1. En la entrada del tubo de cobre.
2. En la salida del tubo de cobre.
3. En la superficie reflectora.
4. En la superficie de la placa de vidrio.
5. Uno atmosférico

Se cuenta con una tarjeta de adquisición Agilent 34970A y mediante el software Agilent Benchlink Data Logger se guardan y almacenan las temperaturas previamente descritas con su fecha y hora para crear la base de datos.

La Figura 4.2 muestra que el sistema está compuesto por un tanque de alimentación (agua fría) y un tanque de almacenamiento de agua caliente (termotanque) de 750 y 450 L, respectivamente. Se encuentran interconectados para tener recirculación y así elevar la temperatura del tanque de alimentación cuando no se tenga en uso el agua caliente. No tienen aislamiento porque se recircula el agua durante todo el proceso de calentamiento de agua durante el día.

Para controlar el flujo se cuentan con válvulas de paso y con una Motobomba Presurizadora modelo AQC-15 que tiene la opción de operación en manual y automático al detectar un flujo de agua. Se conectan in-line (directamente en la tubería sin necesidad de soportes). Tiene una potencia de 2/15 HP y soporta presiones de hasta 73 psi. También se tiene un flujometro Blue-White F-400 de 20 LPM de capacidad para medir el flujo volumétrico a la salida del tubo de cobre de la superficie receptora.

Todas las demás tuberías que están conectadas en el sistema son de cobre y de 1.27 cm de diámetro y están pintadas de negro para aprovechar la radiación solar.

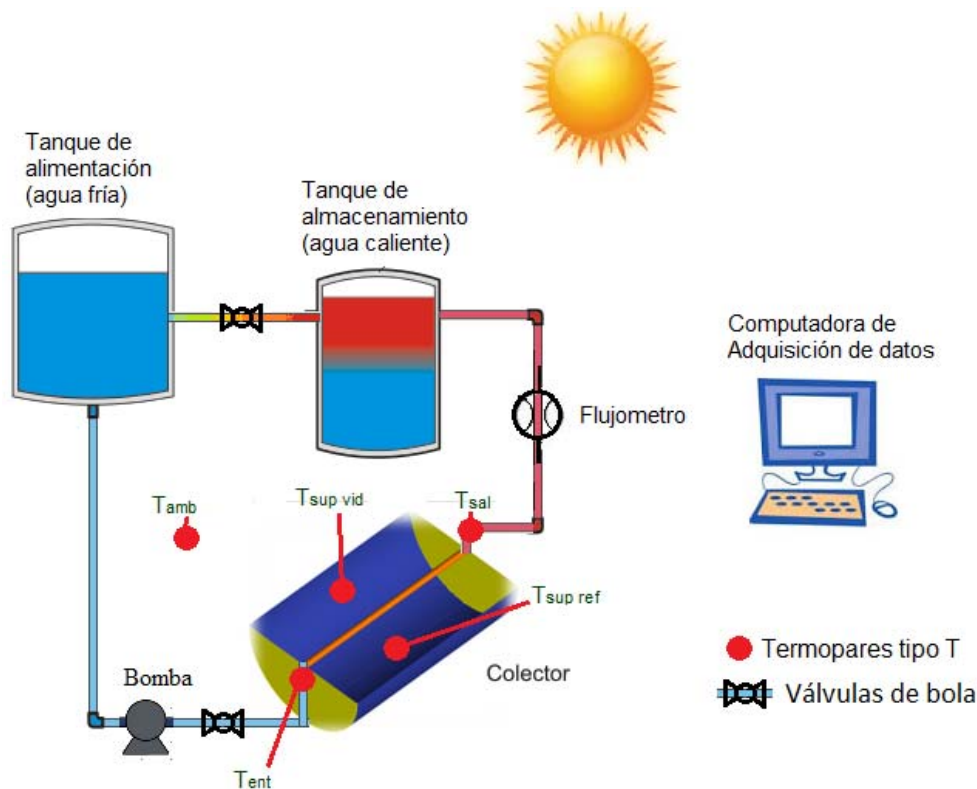


Figura 4 1 Esquema sistema del colector solar de bajo costo.

#### 4.1.1. Condiciones de operación

El colector solar es fijo y todo el sistema se encuentra ubicado en las instalaciones del CIICAp-UAEM en el Estado de Morelos, en el municipio de Cuernavaca; con coordenadas en latitud y longitud de 18.981655, -99.23418, respectivamente. Su orientación es de Este-Oeste con la cara de la placa reflectora apuntando hacia al Sur. Tiene  $19^\circ$  de inclinación para aprovechar mejor la incidencia de la radiación solar, de acuerdo a la latitud del lugar.

Las pruebas experimentales se realizaron con un flujo volumétrico de 1 LPM para agua sanitaria de uso común. Para esto, se regulaban las llaves de paso y de acuerdo al flujo metro para mantener dicho flujo constante a lo largo de la duración de la prueba.

Las horas a la que se iniciaba la prueba y finalizaba fueron variadas, teniéndose la hora más temprana del día a las 5:30 h mientras que la más tarde fue a las 19:10 h La hora más común de inicio y fin de prueba fue de las 9:00 h a las 17:30 h. El intervalo entre medición y medición fue de 10 segundos. Dichas pruebas se realizaron en los meses de mayo y junio (en primavera y verano) de 2014 y enero de 2016 (invierno).

#### **4.2 Red neuronal artificial para predecir la temperatura de salida del fluido**

Se desarrollaron diferentes modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA) para describir la temperatura de salida en un colector experimental de canal parabólico de bajo costo. Las variables de entrada fueron 7 variables de entrada (Tabla 4.1), la cuales fueron: Temperatura de superficie reflectante, Temperatura de superficie del vidrio, Temperatura ambiente, Temperatura de entrada, Mes, Día y Hora del día. La salida del modelo de red neuronal artificial fue la temperatura de la salida del concentrador de canal parabólico (CCP) (Figura 4.2). Cabe mencionar que se usaron como función de transferencia en la capa oculta la función tangencial hiperbólica (tansig) mientras que para la capa de salida se utilizó la función lineal (purelin). En este caso las variables de entrada fueron normalizadas entre 0.1 y 0.9.

Tabla 4.1 Condiciones de operación de entrada y salida de la RNA.

Variables experimentales	Intervalos de operación	Unidades
--------------------------	-------------------------	----------



<b>Entradas:</b>		
Mes	1,2,5 y 6	-
Día	1-31	-
Hora	20267-69085	s
Temp. entrada	9-50.01	°C
Temp. Ambiente	9.07-70.28	°C
Temp. Superficie	9.53-51.4	°C
Temp. Reflectancia	9.05-77.92	°C
<b>Output</b>		
Temp. Salida	9.73-50.67	°C

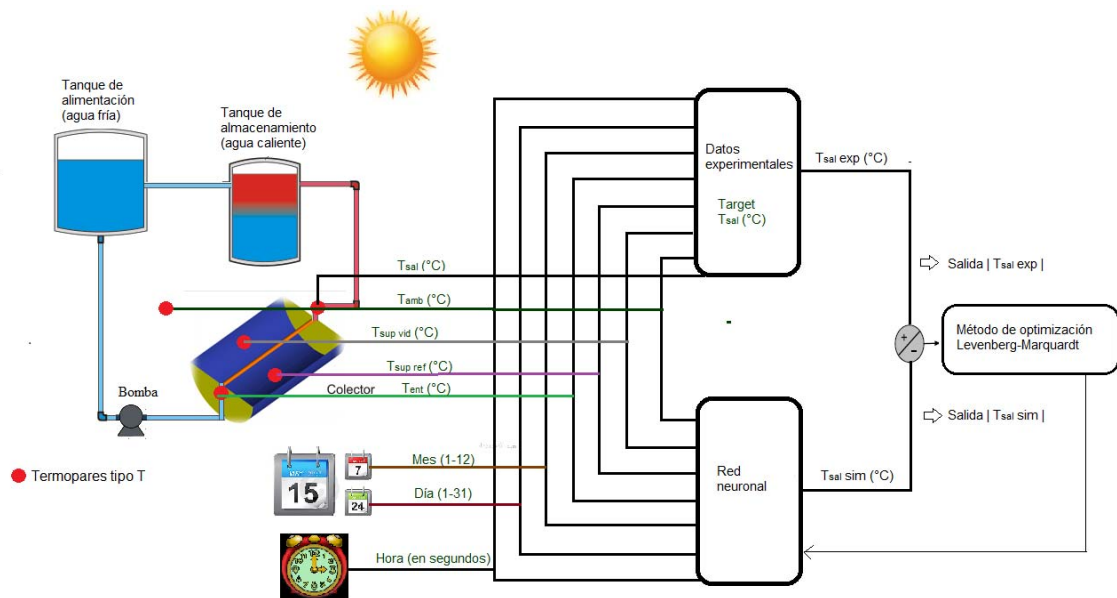


figura 4 2 Variables del modelo RNA para el sistema del colector solar de bajo costo.

El método de entrenamiento fue el de Levenberg-Marquardt (Fig. 4.3).

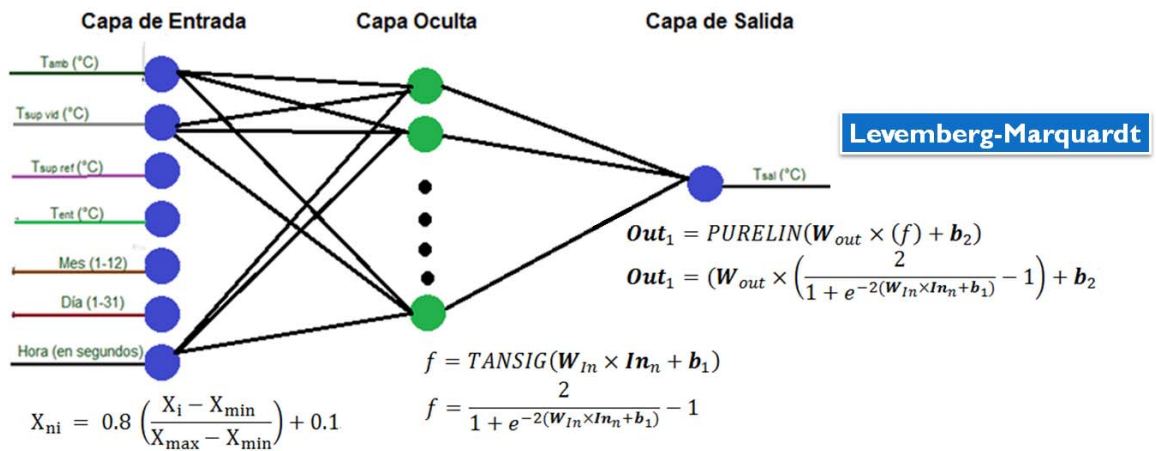


Figura 4.3 Arquitectura del modelo RNA para el sistema del colector solar de bajo costo.

Se determinó que el modelo de red neural artificial óptimo fue el que pasó satisfactoriamente las pruebas estadísticas. Dichas pruebas fueron: Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), Error medio absoluto porcentual (MAPE) and Error Medio de la raíz cuadrada (RMSE).

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

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

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

Asimismo, es necesario hacer un análisis paramétrico para saber si el modelo se debe rechazar o no. Las pruebas paramétricas que se usaron fueron la prueba F (prueba de Fisher) y prueba t (prueba t-student). Ambas pruebas

establecen que su hipótesis nula debe ser aceptada para que el modelo sea representativo, de lo contrario se debe desechar (aceptar hipótesis alternativa). Las hipótesis son:

- $H_0$ : las varianzas de ambas muestras deben ser iguales o similares (prueba F); además de que sus medias son iguales o que ambas muestras provienen de la misma población (prueba t).
- $H_1$ : las varianzas y las medias son diferentes.

$$F = \frac{S_{exp}^2}{S_{sim}^2}$$

$$t = \frac{|\bar{x}_{exp} - \bar{x}_{sim}|}{S \left( \sqrt{\left( \frac{1}{n_{exp}} + \frac{1}{n_{sim}} \right)} \right)}$$

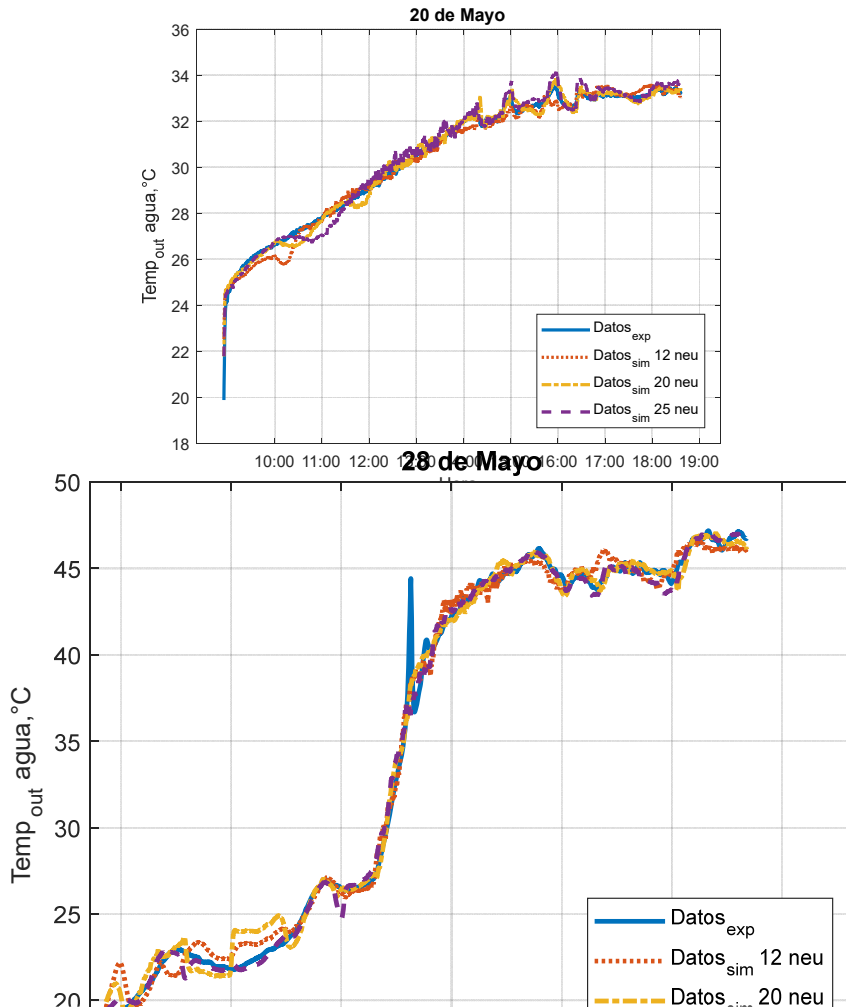
Donde  $S$  es la desviación estándar,  $S^2$  es la varianza,  $n$  el número de muestras y  $\bar{x}$  es la media de la muestra. El resultado de  $F$  y  $t$  se comparan con el dato correspondiente de tablas, ambos deben ser menores. Además se compara el p-valor para determinar cual es nivel de significancia mínimo para rechazar  $H_0$ .

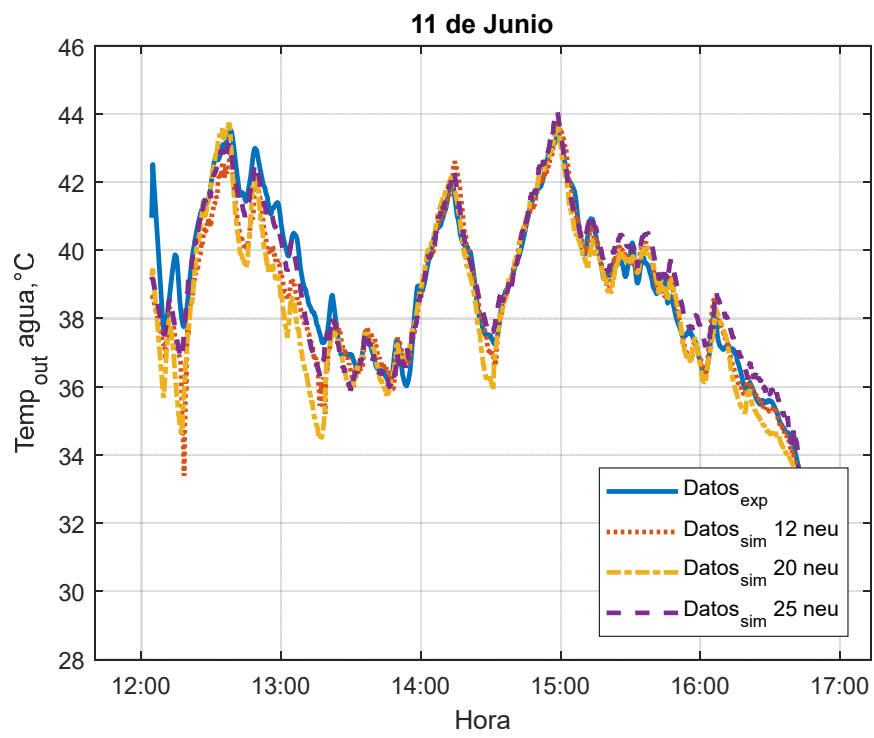
La Tabla 4.2 presenta la comparación del análisis estadístico y de significancia para la determinación del número de neuronas en la capa oculta. Los modelos óptimos fueron los que se resaltan en negrillas. Los demás modelos no pasan la prueba F.

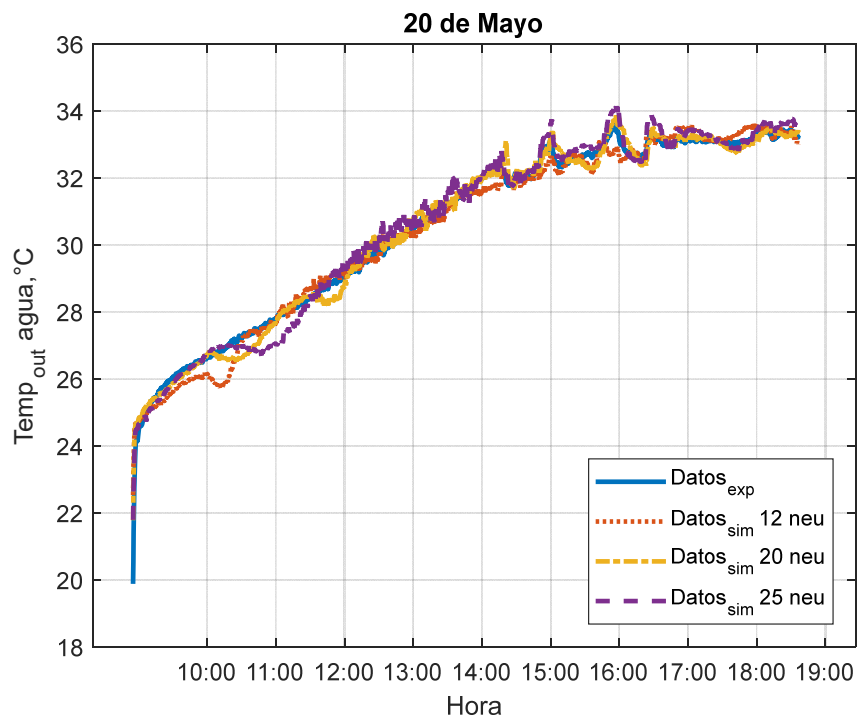
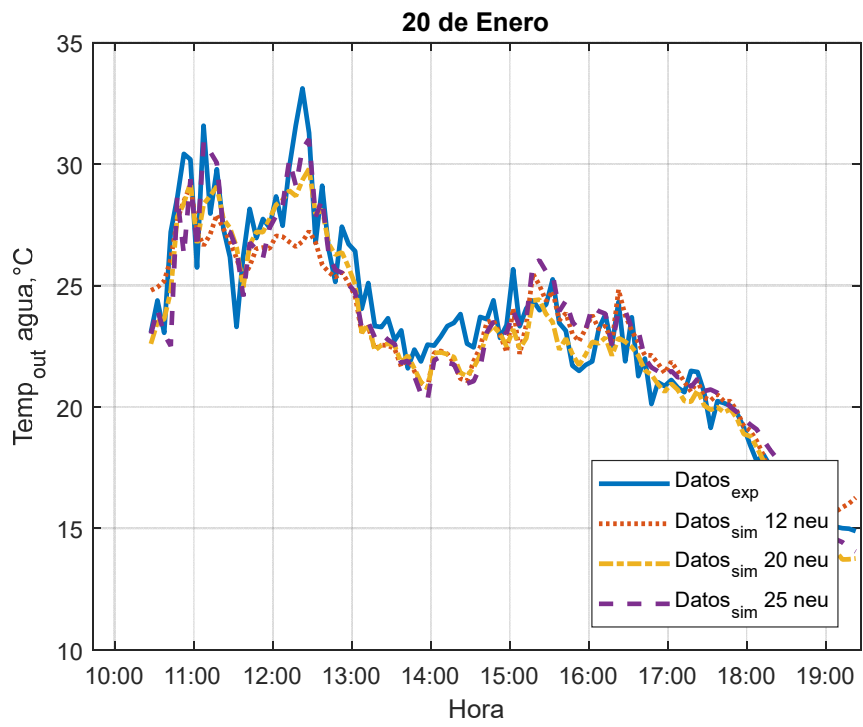
Tabla 4.2 Comparación estadística y de significancia para diferentes arquitecturas.

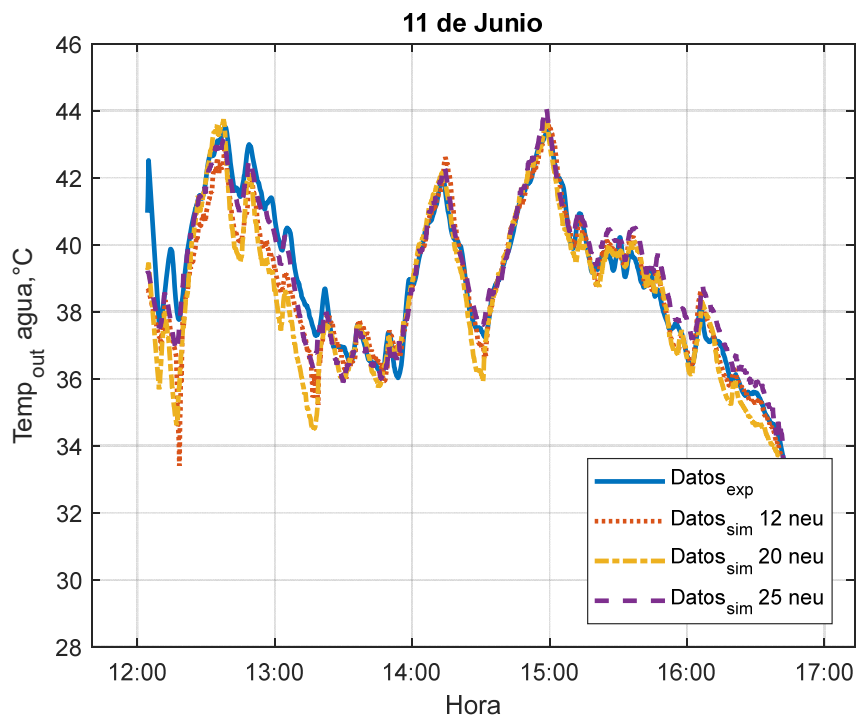
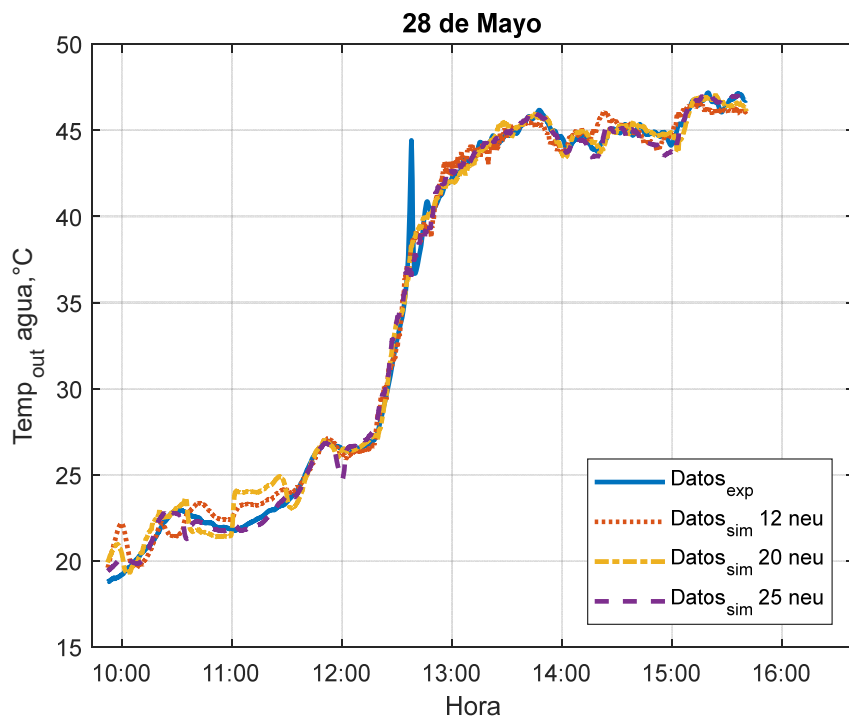
Neuronas	R	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE	F	t	P
1	0.956554	0.914995	1.946371	0.407222	1.093218	0.008860	0.992931
2	0.970421	0.941717	1.611667	0.295196	1.062228	0.006951	0.994454
3	0.977443	0.955395	1.409929	0.199452	1.046932	0.021083	0.983180
4	0.982462	0.965231	1.244803	0.162510	1.036102	0.015941	0.987281
5	0.983872	0.968004	1.194126	0.153951	1.033365	0.075255	0.940012
6	0.985488	0.971188	1.133170	0.122651	1.029930	0.031760	0.974663
7	0.986509	0.973200	1.092873	0.123080	1.027716	0.012291	0.990193
8	0.987884	0.975914	1.036062	0.096943	1.024836	0.000640	0.999489
9	0.988366	0.976868	1.015348	0.112251	1.023830	0.048165	0.961585
10	0.988984	0.978090	0.988189	0.126571	1.023758	1.922689	0.054523
11	0.990360	0.980813	0.924723	0.083774	1.019823	0.030212	0.975898
12	<b>0.991746</b>	<b>0.983561</b>	<b>0.855936</b>	<b>0.072207</b>	<b>1.016856</b>	<b>0.051586</b>	<b>0.958859</b>
20	<b>0.993273</b>	<b>0.986590</b>	<b>0.773050</b>	<b>0.055815</b>	<b>1.013710</b>	<b>0.032608</b>	<b>0.973987</b>
25	<b>0.993909</b>	<b>0.987856</b>	<b>0.735682</b>	<b>0.049365</b>	<b>1.012757</b>	<b>0.270616</b>	<b>0.786687</b>

Se comparó la temperatura de salida de los modelos simulados con 12, 20 y 25 neuronas en la capa oculta con respecto a los datos experimentales, para diferentes días aleatoriamente (ver figura 4.4).









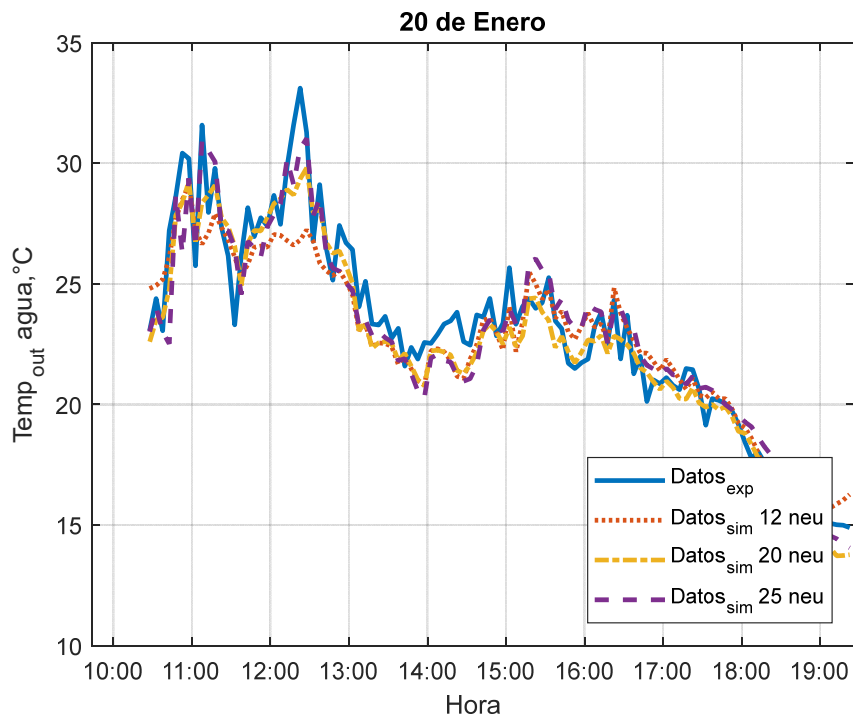


Figura 4 4 Comparación de los modelos a diferentes días.

La Figura 4.4 describe como los tres modelos se ajustan adecuadamente a los datos experimentales, siendo el modelo con 25 neuronas el que mejor comportamiento tienen por tener mayor  $R^2$  y menores RMSE así como MAPE. El uso de redes neuronales artificiales demuestra que es una herramienta poderosa para modelar sistemas altamente variables, incluso con datos que tienen ruidos.

Se tomó como mejor opción el modelo con 25 neuronas en la capa oculta por ser el que mejores resultados estadísticos tiene y el que pasa todas las pruebas de significancia, además de ser el que visualmente se comporta mejor.



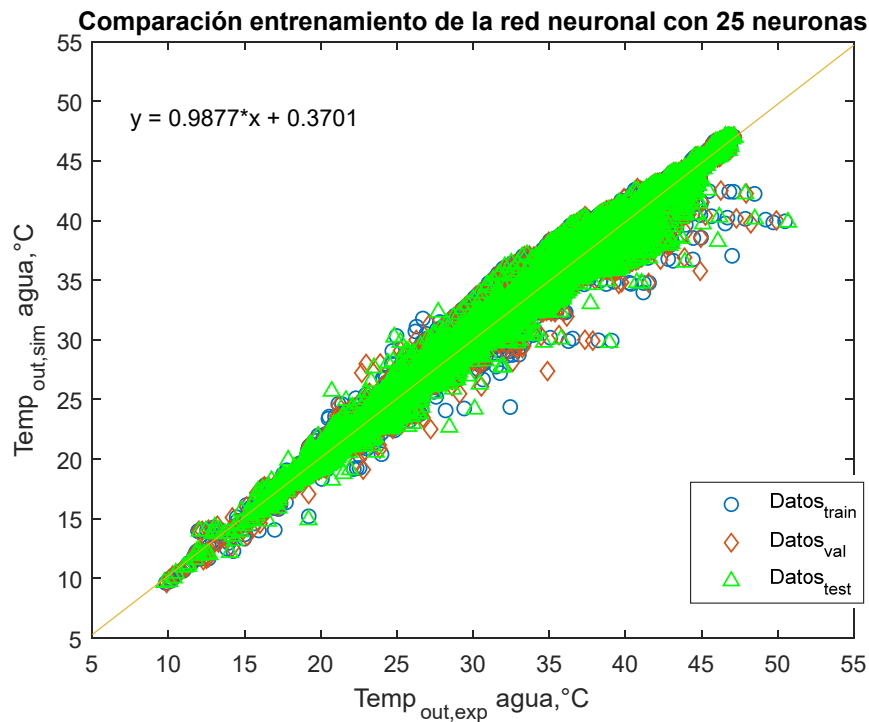


Figura 4.5 Regresión lineal y comparación entre los datos experimentales y simulados para el modelo con 25 neuronas en la capa oculta.

La Figura 4.5 presenta la comparación de todos los datos de experimentales con los predichos con el modelo de 25 neuronas, los cuales fueron divididos para su entrenamiento, validación y prueba.

Posteriormente, una vez elegido el modelo óptimo, se requiere sacar la ecuación de la red neural artificial la cual es dada por la siguiente expresión:

$$T_{sal\ agua} = \sum_{k=1}^K \left\{ W_{0(K,J)} \left[ \frac{2}{1 + e^{-2 \sum_{j=1}^J (W_{i(j,R)} \cdot P_{(R)} + b_{(1,j)})}} - 1 \right] \right\} + b_{(2,K)}$$

Donde  $W_i$  son los coeficientes de los pesos en la conexión entre la capa de entrada y la capa oculta,  $W_o$  son los pesos entre la capa oculta y la capa de

salida.  $P$  es el valor de la variable de entrada;  $R, J$  y  $K$  son el número de neuronas en la capa de entrada, oculta y de salida, respectivamente. De forma expandida:

$$\begin{aligned}
 T_{sal\ agua} = 2 & \left[ \frac{Wo_{(1,1)}}{1 + e^{(x_1)}} + \frac{Wo_{(1,2)}}{1 + e^{(x_2)}} + \frac{Wo_{(1,3)}}{1 + e^{(x_3)}} + \frac{Wo_{(1,4)}}{1 + e^{(x_4)}} + \frac{Wo_{(1,5)}}{1 + e^{(x_5)}} + \frac{Wo_{(1,6)}}{1 + e^{(x_6)}} \right. \\
 & + \frac{Wo_{(1,7)}}{1 + e^{(x_7)}} + \frac{Wo_{(1,8)}}{1 + e^{(x_8)}} + \frac{Wo_{(1,9)}}{1 + e^{(x_9)}} + \frac{Wo_{(1,10)}}{1 + e^{(x_{10})}} + \frac{Wo_{(1,11)}}{1 + e^{(x_{11})}} \\
 & + \frac{Wo_{(1,12)}}{1 + e^{(x_{12})}} + \frac{Wo_{(1,13)}}{1 + e^{(x_{13})}} + \frac{Wo_{(1,14)}}{1 + e^{(x_{14})}} + \frac{Wo_{(1,15)}}{1 + e^{(x_{15})}} + \frac{Wo_{(1,16)}}{1 + e^{(x_{16})}} \\
 & + \frac{Wo_{(1,17)}}{1 + e^{(x_{17})}} + \frac{Wo_{(1,18)}}{1 + e^{(x_{18})}} + \frac{Wo_{(1,19)}}{1 + e^{(x_{19})}} + \frac{Wo_{(1,20)}}{1 + e^{(x_{20})}} + \frac{Wo_{(1,21)}}{1 + e^{(x_{21})}} \\
 & \left. + \frac{Wo_{(1,22)}}{1 + e^{(x_{22})}} + \frac{Wo_{(1,23)}}{1 + e^{(x_{23})}} + \frac{Wo_{(1,24)}}{1 + e^{(x_{24})}} + \frac{Wo_{(1,25)}}{1 + e^{(x_{25})}} \right] - (Wo_{(1,1)} \\
 & + Wo_{(1,2)} + Wo_{(1,3)} + Wo_{(1,4)} + Wo_{(1,5)} + Wo_{(1,6)} + Wo_{(1,7)} \\
 & + Wo_{(1,8)} + Wo_{(1,9)} + Wo_{(1,10)} + Wo_{(1,11)} + Wo_{(1,12)} + Wo_{(1,13)} \\
 & + Wo_{(1,14)} + Wo_{(1,15)} + Wo_{(1,16)} + Wo_{(1,17)} + Wo_{(1,18)} + Wo_{(1,19)} \\
 & + Wo_{(1,20)} + Wo_{(1,21)} + Wo_{(1,22)} + Wo_{(1,23)} + Wo_{(1,24)} + Wo_{(1,25)}) \\
 & + b_{(2,1)}
 \end{aligned}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 x_1 = -2 \cdot ( & Wi_{(1,1)} \cdot P_1 + Wi_{(1,2)} \cdot P_2 + Wi_{(1,3)} \cdot P_3 + Wi_{(1,4)} \cdot P_4 + Wi_{(1,5)} \cdot P_5 \\
 & + Wi_{(1,6)} \cdot P_6 + Wi_{(1,7)} \cdot P_7) + b_{(1,1)}
 \end{aligned}$$

Escriba aquí la ecuación.

$$\begin{aligned}
 x_{25} = -2 \cdot ( & Wi_{(25,1)} \cdot P_1 + Wi_{(25,2)} \cdot P_2 + Wi_{(25,3)} \cdot P_3 + Wi_{(25,4)} \cdot P_4 + Wi_{(25,5)} \\
 & \cdot P_5 + Wi_{(25,6)} \cdot P_6 + Wi_{(25,7)} \cdot P_7) + b_{(1,25)}
 \end{aligned}$$

Por consecuencia, en la Tabla 4. 3 se muestran los valores de los coeficientes obtenidos de la red neuronal artificial, los cuales se sustituyen en la posición correspondiente de la ecuación anterior para recrear la predicción de la temperatura de salida en el colector experimental de canal parabólico de bajo costo.

Tabla 4.3 Valores de los pesos y bias de la ARN.

	R=1	R=2	R=3	R=4	R=5	R=6	R=7	K=1	b1	b2
J = 1	- 39.6 0187 3	66.90 7385	26.9 1119 2	- 62.2 8142 1	- 56.3 2080 2	- 11.0 6874 9	55.6 3797 5	2.89 5753	27.87 1779	
J = 2	- 34.1 6813 7	2.431 875	2.78 0904	- 2.28 1537	- 2.12 5678	- 0.06 5039	- 1.19 6606	- 16.0 6722 0	0.743 777	
J = 3	- 0.12 8428	- 3.547 851	- 1.98 4968	0.50 0930	- 1.86 2526	- 0.03 8929	- 0.60 7061	17.9 9376 4	- 8.580 057	
J = 4	22.7 6291 0	- 4.282 313	4.27 4971	- 1.40 1990	3.80 5544	1.45 0420	- 1.68 0918	- 29.1 4626 0	17.04 2908	
J = 5	7.76 4055	- 3.444 659	- 2.03 3348	5.64 9573	2.48 3022	- 3.81 4861	3.09 2906	- 74.7 9395 5	- 5.322 431	- 7.15 038 8
J = 6	- 34.7 8279 5	50.97 2022	7.58 1313	- 29.7 7308 2	- 35.7 8734 7	5.90 8712	8.50 9625	- 1.95 8109	27.53 1606	
J = 7	- 0.67 3616	- 3.927 800	- 4.77 3357	4.75 7932	3.40 9580	- 0.06 8103	- 2.51 5411	13.7 8387 5	1.705 456	
J = 8	37.8 3695 4	- 1.898 563	102. 8969 30	44.3 0919 0	- 15.5 5109 4	52.5 6221 3	- 14.5 3445 7	0.40 9443	- 135.6 6161 0	
J = 9	- 3.83 3702	- 15.69 5958	19.8 4436 6	- 11.4	- 1.30 1563	- 0.69 9614	10.4 2815 5	22.8 1555 7	10.62 2572	

				4252 1						
J = 1 0	20.4 0845 0	- 14.30 5001	6.90 8260	- 22.0 6883 4	- 25.6 7753 6	5.43 4129	0.53 6903	1.46 6367	3.572 642	
J = 1 1	45.4 9981 9	19.95 4183	13.6 9016 4	6.49 3063	0.80 3920	- 7.65 0720	- 2.04 6064	- 7.49 4519	- 22.19 1100	
J = 1 2	- 11.2 7761 1	- 18.73 4316	- 8.56 4850	5.11 0797	11.2 9690 8	4.20 9097	- 11.3 5655 5	3.42 9719	26.34 4819	
J = 1 3	- 32.6 1434 1	- 11.95 5310	56.7 5772 2	1.77 3554	- 57.8 6568 6	13.6 8831 4	- 20.6 2952 6	- 2.60 3838	9.046 438	
J = 1 4	59.5 8393 5	- 123.8 7283 0	173. 5191 40	- 42.7 6595 3	104. 0762 50	- 37.5 0741 6	44.2 8130 5	3.11 8525	- 143.6 8493 0	
J = 1 5	- 2.50 8088	10.80 6440	3.51 3372	- 4.64 2611	0.61 0924	3.68 5747	2.50 2577	- 16.4 6626 0	10.75 7468	
J = 1 6	- 13.3 0031 9	78.34 5477	- 80.2 2446 3	53.2 2469 1	- 42.5 1131 3	4.90 9047	- 15.7 3069 9	- 1.69 4175	- 14.20 3167	
J = 1 7	- 7.73 7678	- 18.93 6159	33.2 7964 5	- 14.9 7016 2	- 4.21 8526	- 1.83 3726	14.1 4208 9	- 15.4 9412 6	12.08 5482	
J = 1 8	7.70 0761	- 2.245 314	3.12 7368	0.54 7133	3.49 9907	- 1.21 5007	- 2.30 7763	- 20.8 8892 1	7.603 786	
J = 1 9	3.09 5564	10.62 7283	25.7 1721 7	- 18.9 6120 6	- 11.4 6373 1	- 1.23 0379	5.57 4657	- 2.16 2232	- 12.35 5126	

J = 2 0	12.7 7559 4	4.422 020	6.54 2089	7.55 1344	2.47 8481	- 1.55 4819	- 11.5 3117 3	- 2.56 4272	- 17.64 8972	
J = 2 1	6.51 3514	6.793 123	78.5 3065 0	113. 2920 70	36.3 6728 2	- 23.7 3457 4	- 30.8 8956 3	- 0.63 3675	- 70.14 6623	
J = 2 2	- 0.09 6513	0.382 528	0.30 6903	- 0.18 3546	- 0.24 8262	0.06 0274	0.21 3140	186. 7789 30	0.329 181	
J = 2 3	4.00 0439	- 4.792 340	26.1 2101 1	- 11.1 4243 6	4.23 8710	- 7.02 9245	12.1 3355 7	1.33 0240	- 12.30 3321	
J = 2 4	- 31.0 2967 8	- 28.84 7499	- 6.45 8081	24.6 4764 5	13.9 1614 8	- 16.2 4950 9	17.4 0923 5	- 7.64 9612	- 5.491 770	
J = 2 5	- 6.94 3900	3.244 970	1.98 9696	- 5.74 9116	- 2.18 4622	3.56 9070	- 2.53 0057	- 82.3 9643 9	4.698 536	

Finalmente, se utilizó la ecuación de Garzon (1991) para determinar la importancia de las variables entrada dentro de la red neural artificial, esta ecuación está basada en la partición de las conexiones de los pesos.

$$I_p = \frac{\sum_{j=1}^J \left( \left( \frac{|W_{(P,J)}|}{\sum_{r=1}^R |W_{(R,J)}|} \right) \times |W_{(J,K)}| \right)}{\sum_{r=1}^R \left\{ \sum_{j=1}^J \left( \left( \frac{|W_{(R,J)}|}{\sum_{R=1}^R |W_{(R,J)}|} \right) \times |W_{(J,K)}| \right) \right\}}$$

Donde  $I_p$  es la importancia relativa de la variable de entrada P sobre la variable de salida.

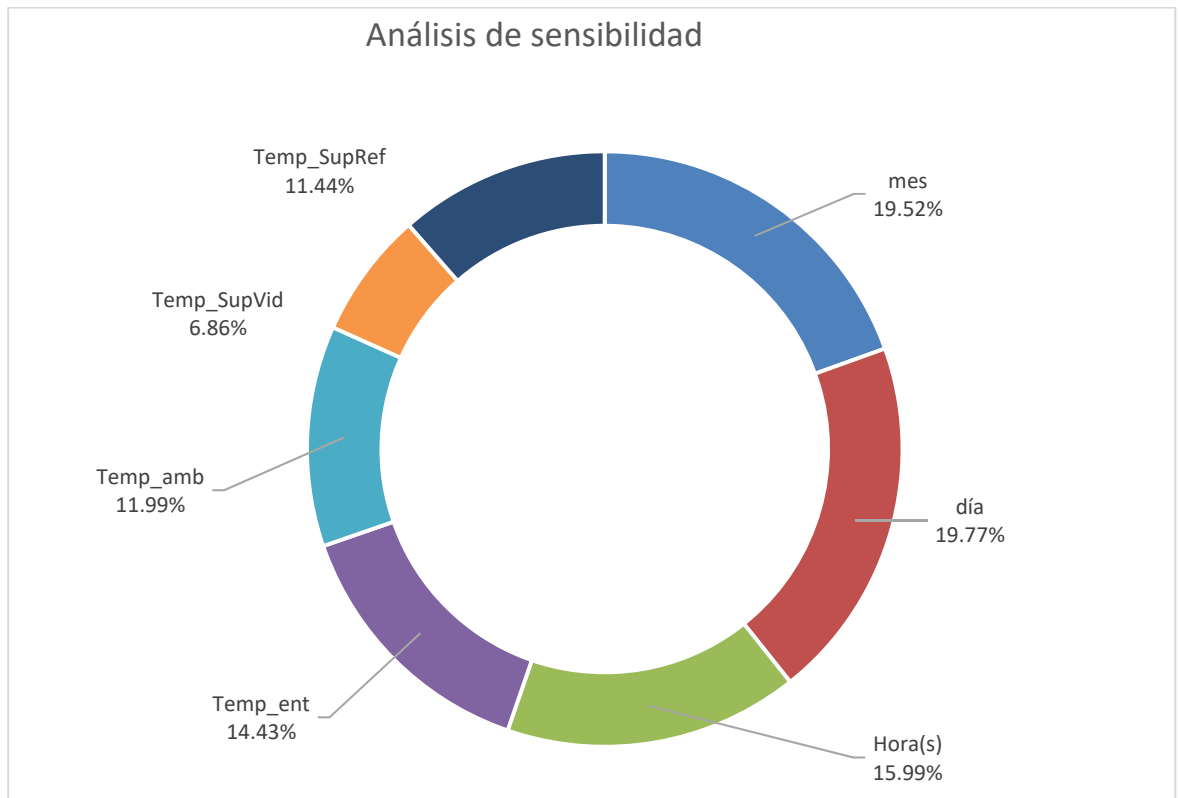


Figura 4.6 Análisis de sensibilidad de variable del modelo con 25 neuronas.

El análisis de sensibilidad de variables sirve para determinar si una variable tiene cierto peso o es representativa del modelo. Para el sistema analizado, las variables seleccionadas son representativas, puesto que ninguna tiene un valor pequeño como para ser despreciada, como se muestra en la Figura 4.6. También se observó que el día y el mes fueron las variables más importantes, debido a que está implícita la estación del año (verano o invierno). Además, se nota que la variable que sigue en el orden de importancia fue la hora del día. Estas tres variables actúan sobre la temperatura de entrada, que ocupa el cuarto lugar. El resto de las variables siguen teniendo importancia, porque representan indirectamente la radiación solar.

## CAPITULO V

### *CONCLUSIONES GENERALES*

Un colector estático con concentrador de canal parabólico (CCP) solar de placa reflejante de lámina de acero inoxidable tipo 316L calibre 16 con pulimiento espejo del lado interior fue analizado y modelado. Se eligió este colector solar porque fue el más viable al tener mejores resultados en su rendimiento de colección (37%) y una mejor energía térmica utilizable (ya incluye las pérdidas) con 50.5 kW. Se realizaron pruebas experimentales con un flujo volumétrico de 1 LPM para agua sanitaria de uso común. Para esto, se regulaban las llaves de paso y de acuerdo al flujo metro para mantener dicho flujo constante a lo largo de la duración de la prueba. Las horas a la que se iniciaba la prueba y finalizaba fueron variadas, teniéndose la hora más temprana del día a las 5:30 h mientras que la más tarde fue a las 19:10 h La hora más común de inicio y fin de prueba fue de las 9:00 h a las 17:30 h. El intervalo entre medición y medición fue de 10 segundos. Dichas pruebas se realizaron en los meses de mayo y junio (en primavera y verano) de 2014 y enero de 2016 (invierno).

A partir de la base de datos generada se desarrolló un modelo matemático basado en redes neuronales artificiales (RNA). Este modelo RNA consideró como variables de entrada: Temperatura de superficie reflectante, Temperatura de superficie del vidrio, Temperatura ambiente, Temperatura de entrada, Mes, Día y Hora del día. La salida del modelo de red neuronal artificial fue la temperatura de la salida del concentrador de canal parabólico (CCP). Cabe mencionar que se usaron como función de transferencia en la capa oculta la función tangencial hiperbólica (tansig) mientras que para la capa de salida se utilizó la función lineal (purelin). En este caso las variables de entrada fueron normalizadas entre 0.1 y 0.9. Los resultados mostraron que con 25

neuronas en la capa oculta se puede obtener un modelo con una arquitectura de 7-25-1 para predecir la temperatura de salida del agua dentro del CCP satisfactoriamente ( $R>0.99$ ). Este modelo RNA propuesto puede ser usado para optimizar el calentamiento de agua de salida en un CCP.



Figura 5 1 Tren de concentradores trabajando en día normal.



## REFERENCIAS.

Burbano J. C., Hernán Á. Diseño y construcción de un calentador solar de agua operando por termo sifon. Scientia, Nom 31, 2006.

Camara oficial de comercio e industria de Madrid. Energia solar térmica en la comunidad de Madrid. Madrid, España. No. 117.

Álvarez Guerra J, Roca Oria E.. Limite termodinámico en los procesos de concentración de la luz solar. Centro de estudios energia y medio ambiente, Cuba.

Fernández Diez P. Libros sobre ingeniería energética, 04 colectores de concentración de mediana temperatura, 29, [<http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=12>].

Fernández Diez Pedro. libros sobre ingeniería energética, 03 colectores de placa plana. 15, [<http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=12>].

Fondo de cultura económica. El oro solar y otras fuentes de energia. Ed fondo de cultura economica, S.A. de C.V. México. 1993.

Gómez Cuellar A. Pulido Granados J. Colector solar parabolico. No.8.

Gonzáles Martin M. I. Refrigeración solar para adsorción con sistema de captación CPC experimentos y modelos. universidad de burgos. 2006

Gonzáles Velasco J. Energias renovables. Reverte. España. 2009. 656.

Guevara Vásquez S. Teoría para el diseño de calentadores solares de agua. ed. Agencia suiza para el desarrollo. Lima. 2003, 23.

Ibañez Plana M, Rosell Polo Jr., Rosel Urutia Jr. Tecnología solar. ed. Mundiprensa libros. España. 2005. 544.

Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal process. ed. Wiley and sons ing. 2006. 908.

Madrid Solar. Guía de la energía solar. Madrid. 2006.

Meinel B A, Pettit Meinel M. Aplicaciones de la energía solar. ed. Reverte S.A. Barcelona. 1982. 691.

Mendoza Ramírez M. Notas Sobre el curso de energía solar, Instituto tecnológico y de estudios superiores de occidente. Jalisco, México. 1995. 42.

Pablo Bravo C. Evaluación experimental de un concentrador solar cilíndrico parabolico (CCP). Centro de energías renovables de Tacna (CERT). 12.

Platón Arias L, San José Alonso J. F. Optimización del dimensionado de instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria. Escuela Técnica superior de ingenieros industriales de Valladolid. España. 26.

Paz Gutiérrez J. C. Energía solar, colectores solares planos construcción. chihuahua, México, 2006.

Ramírez Vázquez P., Gonzales S. L. Ibarra Herrera J. Energía solar. México. 1979. Cartillas 1, 2, 3.

Romero Álvarez M. Energía Solar termo eléctrica, Plataforma solar de Almeira. CIEMAT. 22.

Sagan. Cosmos. ed. Planeta. México. 366.

Salgado Almanza R, Muños Gutiérrez F. Ingeniería de la energía solar. El colegio nacional. México. 1994.

Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Segunda Comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climatico. México. 2001. 374.

Silva Pérez M. Aprovechamiento de energia solar en mediana y alta temperatura, sistemas termo solares de concentración. 2004, 2005. 15.

Solar tronic, S.A. de C.V. Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas. México, 64.

Venegas Reyes E. Sistemas para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco puntual. Tesis de Maestría. México. 2008. 81.

Vídriales Escobar L. G. Colector de canal Parabólico para la generación de directa de vapor para calor calor de proceso. Tesis de Maestría. México. 112.

*PRODUCTOS OBTENIDOS.*

This article was downloaded by: [U A E M]

On: 17 September 2013, At: 11:18

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Desalination and Water Treatment

Publication details, including instructions for authors and subscription information:  
<http://www.tandfonline.com/loi/tdwt20>

### Design and experimental analysis of low-cost heat water solar collectors

E. Cardoso <sup>a</sup>, S. Silva-Martinez <sup>b</sup>, A. Alvarez <sup>b</sup> & J.A. Hernández <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, Mexico

<sup>b</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62209, Mexico Phone: Tel. +52 777 3297984

Published online: 18 Jun 2012.

To cite this article: E. Cardoso, S. Silva-Martinez, A. Alvarez & J.A. Hernández (2013) Design and experimental analysis of low-cost heat water solar collectors, *Desalination and Water Treatment*, 51:4-6, 1302-1309, DOI: [10.1080/19443994.2012.698807](https://doi.org/10.1080/19443994.2012.698807)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.698807>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>



## Design and experimental analysis of low-cost heat water solar collectors

E. Cardoso<sup>a</sup>, S. Silva-Martinez<sup>b</sup>, A. Alvarez<sup>b</sup>, J.A. Hernández<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos C.P. 62209, Mexico

<sup>b</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad No. 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos C.P. 62209, Mexico  
Tel. +52 777 3297984; email: alfredo@uaem.mx

Received 27 February 2012; Accepted 10 May 2012

---

### ABSTRACT

Owing to fossil fuels' consumption and environmental pollution, it is necessary to make efficient use of energy based on the different renewable energy sources such as solar energy. The present research has focused on the design, construction, and assembly of a train of solar energy collectors consisting of five concentrators, which individually have significant differences in the arrangements focus tube reflective surface and the greenhouse effect. The collectors are operated under the same environmental conditions. In the analysis presented on the train of solar energy collectors, a theoretical–experimental study was performed on the different reflecting surfaces of each collector, such as the mirrors' reflecting surface, reflecting surface of the 316 L stainless-steel mirror polished, reflecting surface of the aluminum foil's reflective surface with an aluminum paint, surface reflective type 304 stainless steel-mirror polish. The present study was developed to analyze and discuss the increase in the useful energy ( $Q_u$ , kW) and efficiency of the collector ( $\eta$ , %). The results of the study have that the highest average increases in performance and energy experimental tool for each collector are in the following order: 316 L stainless-steel collector (50.5 kW with 37%) > 304 stainless-steel collector (43.1 kW with 31.6%) > aluminum collector (35.2 kW with 25.8%) = mirror collector (35.5 kW with 25.6%) > aluminum paint collector (0.4 kW with 0.3%). The best performance was obtained from the stainless-steel solar collectors, regardless of the type of stainless-steel quality. Thus, it is advisable to use the experimental model itself as a supporting tool for drawing up the computer design. In fact, the use of 316 L or 304 stainless-steel low-cost heat water solar collector represents an environmentally friendly alternative.

*Keyword:* Water solar collectors

---

### 1. Introduction

From the perspective of human beings, the solar power is regarded as an inexhaustible source of

energy, whose profitability depends on the research efforts undertaken, the financial resources available at one's disposal for undertaking its study, and the interest shown towards its development. We live in a society which is under constant pursuit of conducting research and development with a crew to producing

\*Corresponding author.

better goods and services, which directly contribute to energy expenditure [1–7].

The so-called renewable energy can help us to solve any energy supply problem that is likely to inevitably appear. The renewable energy is defined as “Energy obtained from continuous energy flows and recurring in the natural world” [6].

### 1.1. Solar collectors

While water heating is usually brought about with the use of wood, coal, oil, gas, or any other fuel, it is also possible to heat water with solar energy, i.e. the energy emitted by the sun. Nowadays, direct use of solar radiation that is transformed by the corresponding photo-thermal and photovoltaic devices has become important. The solar panels are components which are so designed as to capture sunlight and transform it into a useful energy. These solar panels are of two types: photovoltaic modules and solar thermal collectors. These panels are also known as solar collectors, a special type of heat exchanger, which converts the solar radiation into a usable thermal energy a variety of applications such as obtaining sanitary hot water, heating of pools, domestic use heating in hotels, and in general for all those industrial activities where the process heat temperature does not exceed 60°C. With this type of energy resource it is possible to bring down by more than 25% of conventional energy consumption in homes [7–20].

The present work is based on the search for affordable and low-cost materials to build solar equipment. Therefore, the experimental analysis carried out by the present work to show which equipment yields better results into useful energy and efficiency. To achieve the said objective, we need to design, construct, and install solar concentrators with different surface characteristics in the solar concentrator connected in parallel.

Two types of solar collectors were used: compound parabolic collectors (CPCs) and parabolic concentrating collectors (PCCs) all having in common greenhouse effect, double-jacketed tube focus, and matte black receiver; the characteristics of their surfaces are as follows:

No.	Name	Feature
1	PCC	Mirrors
2	PCC	316 Stainless steel
3	PCC	Aluminum
4	PCC	Aluminum paint
5	CPC	304 stainless steel

## 2. Materials and methods

As far as the design criteria are concerned, a solar heater runs on two fundamental principles: the natural circulation and the greenhouse effect, based on the previous information, the planning of work leads to drawing design of equipment installation. The DIA software is used for the same, which refers to General purpose computer program for creating diagrams, network diagrams and, diagrams of electrical circuits. A train of solar concentrators is shown in Fig. 1, which shows the manner in which these concentrators are connected using different patterns. It can also be observed that this design housing a number of concentrators illustrates how each solar collector can be operated individually. Thus, it is even possible to freely access the daily data to make a comparison of the performance between all of them.

We performed a cost analysis of the different materials that could be used to effect the installation of solar concentrators. The suggestions put forth went in favour of the materials mentioned below: copper and CPVC pipe plus. After reviewing the cost estimates which were based on the materials, a decision was made to install these solar concentrations with copper material.

### 2.1. Concentrator description

A solar concentrator is designed on a base consisting of a sheet of steel drum with a 216.5 L capacity, which is cut vertically into half. Its dimensions are 85 cm long with a diameter of 57 cm. The solar concentrator is mounted on a structural base, which allows it to be floor mounted. The exterior is painted matte black and mounted inside the concentrator surface.

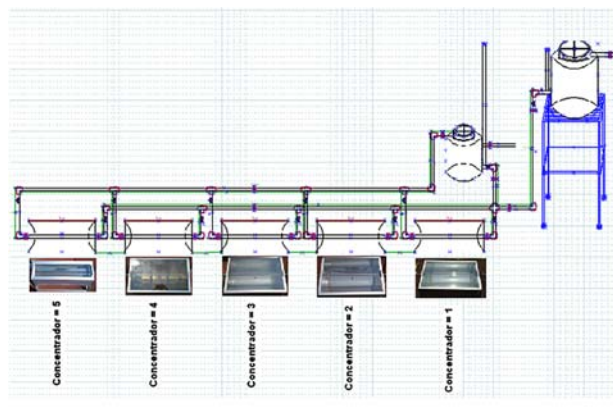


Fig. 1. A general scheme of a train of solar collectors with the fittings and tanks.

## 2.2. Concentrator surfaces

The concentrator is an optic system, which is responsible for leading the solar radiation to the receiver. There are different types of surface concentrators, which are important as they enhance the efficiency of collection devices. Based on these findings and with a view to bringing about a comparison between these collectors, the reflecting surfaces of all the five concentrators were modified as follows:

- (1) Arrangement with mirrors: the mirror surface consists of 34 pieces of mirrors of 84 cm long, 2 cm wide, and 3 mm thick, fixed on the inside of the hub as shown in Fig. 2.
- (2) Arrangement with a stainless-steel sheet: the reflective surface comprises a steel sheet 16 gauge 316L stainless, with a mirror polish inside and rolled a half-round, shown in Fig. 3.
- (3) Aluminum foil arrangement: the reflective surface consists of an aluminum foil rolled to a half-round, with the inner side polish, shown in Fig. 4.
- (4) Arrangement with a reflective paint: the mirror surface is an oil painting with particles for high temperature aluminum sheet painted on the inside of the collector, shown in Fig. 5.

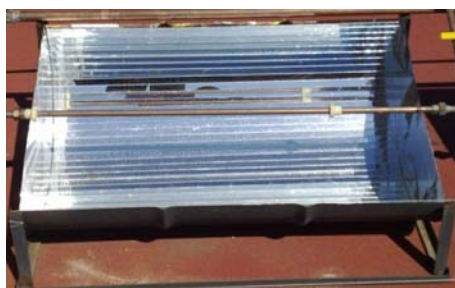


Fig. 2. Mirror concentrator.



Fig. 3. 316 stainless steel concentrator.



Fig. 4. Aluminum foil concentrator.



Fig. 5. Aluminum oil painting concentrator.



Fig. 6. 304 Stainless steel sheet concentrator.

- (5) Arrangement with a stainless-steel sheet: the reflective surface comprises a sheet of type 304 stainless steel 16 gauge with a mirror polish inside, rolled by way of compound parabolic concentrator, as shown in Fig. 6.

## 2.3. Receiving surface

The receiver system is an element where the radiation is absorbed and converted into some form of energy. The receiver used for the concentrators consists of a copper tube half inch diameter by 90 cm length painted matt black to have better sunlight capture.

The focus tube, jacketing the copper tube, is a tube bulb which consists of two glass tubes of different diameters joined together with screw caps on the ends, to exploit the greenhouse effect better. To make better use of the greenhouse gases and prevent any



heat loss in the concentrator, it was decided to employ a cover glass 85 cm in length by 57 cm width and 5 mm thick with aluminum frame and tabs to allow free movement.

#### 2.4. Assembly and instrumentation

The train consists of five solar concentrators with different arrangements, east-west (shown in Fig. 7).

The areas of interest for this research are the concentrator and the receiver; it is in the latter, that exchange of solar energy with heat takes place. Hence it is very much important to monitor the temperature at the beginning and at the end of the receiver tube. The temperature was measured with the help of T-type thermocouples and software acquisition card and computer equipment were employed. The thermocouples were designed in such a manner as to be inserted into a well according to the present work's needs. These thermocouples consisted of a male half perforated brass plug, which was welded to a flexible copper tube, which served as a guide for the thermocouple (shown in Fig. 8).



Fig. 7. Overview CIICAp rooftop concentrators, power piping and tank and receiving tank.



Fig. 8. Design of thermocouples well.

#### 2.5. Energy calculations

To understand the phenomena of energy transfer from a concentrator system to a fluid receiver, establishing a thermodynamic model where the system under study is the recipient of the concentrator, Eq. (1) was used to develop the model [9].

Energy balance, manifold at a given instant of time, is the difference shown between the energy absorbed by the absorber plate and the energy lost.

$$Q_u = F_R A_a \left[ I_s - \frac{A_\gamma}{A_a} U_l (T_i - T_a) \right] \times \left[ I_s - \frac{A_\gamma}{A_a} U_l (T_i - T_a) \right] \quad (1)$$

where  $Q_u$  is the amount of useful energy extracted per unit of time,  $F_R$  is the heat removal factor,  $I_s$  is the useful solar irradiance.  $A_a$  is the area of opening of the hub,  $A_\gamma$  is the area of the absorber.  $U_l$  is the overall coefficient of losses of the collector;  $T_a$  is the ambient temperature and  $T_i$  is the average surface temperature of the collector plate.

The heat transfer coefficient (the overall coefficient of loss) is defined by convective losses in the following manner using Eq. (2) [9]:

$$U_l = hw + hr \quad (2)$$

where  $hw$  is the convective coefficient and  $hr$  is the radiative coefficient.

Performance of the concentrator. The instantaneous performance of a manifold is defined by Eq. (3) [9]:

$$h = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_s \cdot R_b} \quad (3)$$

where  $A_c$  is the area of the receiver,  $I_s$  is the solar irradiance which is useful, and  $R_b$  is the geometric factor.

### 3. Results and discussion

It is common practice to determine the thermal performance of the concentrators to obtain instantaneous values of the efficiency from values and of incident radiation on the collector. These are: room temperature, inlet and outlet temperatures of the working fluid.

Below are analyzed and presented the theoretical and experimental results obtained in the present work. Using the experimental values it is possible to obtain the useful energy output per day for each of the concentrators. Based on the same values,  $I_s$ , the useful energy concentrator performance in each min-

ute can be evaluated during the collection of data at different temperatures. It was observed, experimentally and theoretically, that the concentrators are much more efficient in a normal working day.

The outlet temperatures are presented in the receiver of each of the PCCs. For day conditions. Fig. 9 shows the outlet water temperatures throughout the day, and we noted that concentrators # 2 and # 5 are the best in providing heat to the system. Whereas, Table 1 shows the useful energy and performance of the concentrators, being concentrator No. 2 the most stable in terms of the energy input to the system and owing to its design features and material properties.

Fig. 10 shows the maximal and the minimal temperatures reached during the day at different days for each of the concentrators. In this figure, it can be observed that concentrators 2, 3, and 5 are the major contributors to the temperature system.

The day wise energy efficiency achieved at different days for each of the concentrators is shown in Fig. 11. This figure shows that concentrators 2 and 5 showed the best reported efficiencies. However, this comparison did not apply to concentrator 4 whose surface did not get any direct light nor was the light reflected by the atmosphere, being in this case the efficiency near zero or zero.

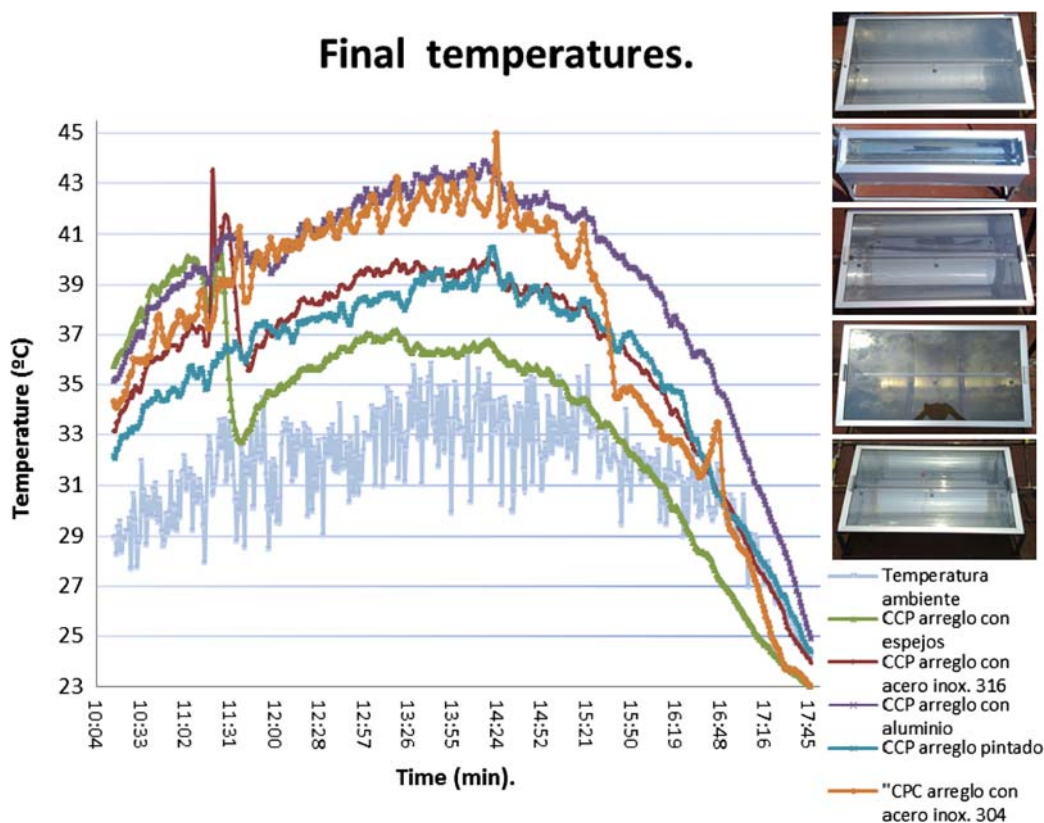


Fig. 9. The water outlet temperatures for the five concentrators, 5 January 2011.

Table 1  
Useful energy and performance of the concentrators, 5 January 2011

No.	Solar concentrator	Useful energy $Q_u$ (kW)	Performance of the concentrators ( $h = \%$ )
1	PCC. Mirrors	40.3	29
2	PCC. 316 Stainless steel	53.0	39
3	PCC. Aluminum	36.5	27
4	PCC. Aluminum paint	-43.0	-31
5	CPC. 304 stainless steel	49.2	36

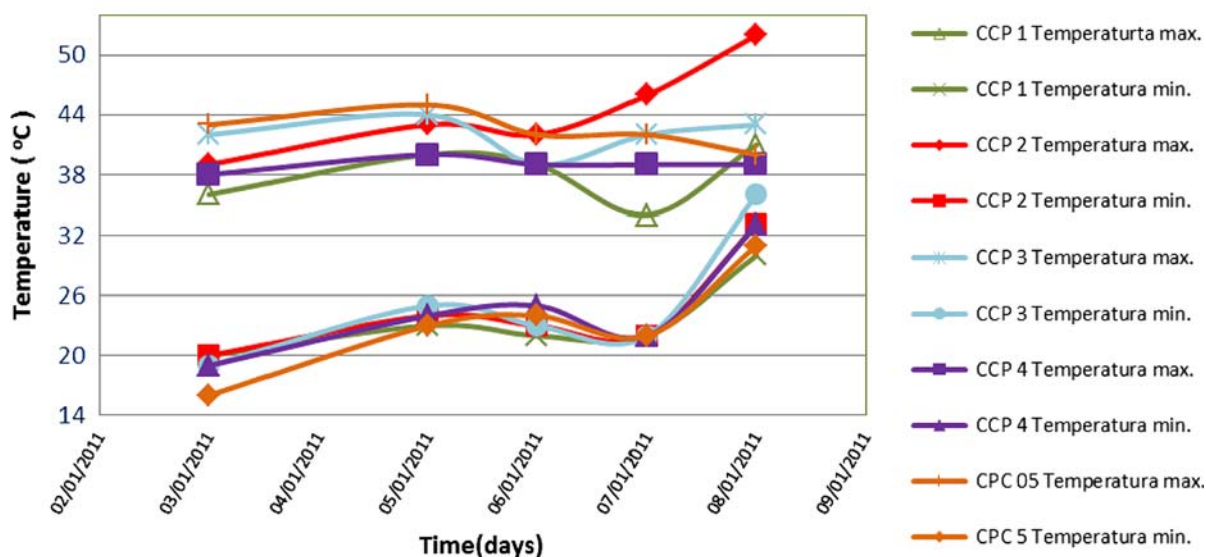


Fig. 10. Highest and lowest and lowest temperatures at different days for all concentrators.

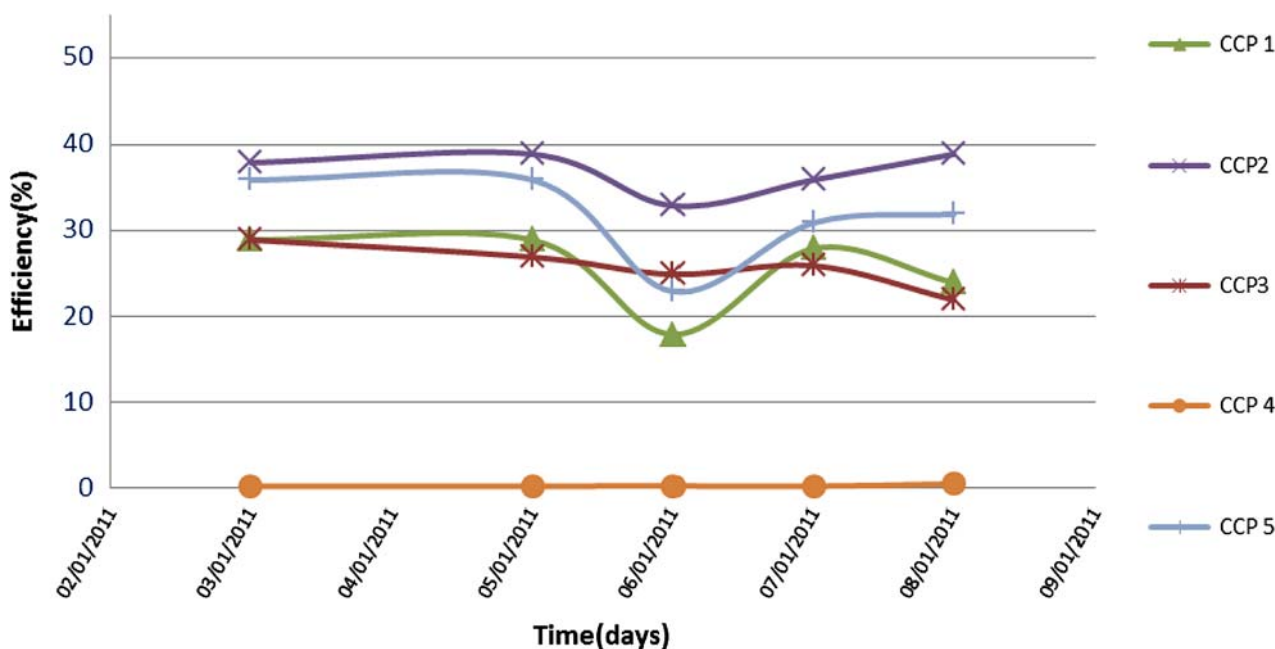


Fig. 11. Efficiency reached different days for the five concentrators.

Fig. 12 shows the useful energy that is reached during the day at different days for each of the concentrators. Concentrators 2 and 5 provide more useful energy in the first 3 days of measurement, while the number 2 maintained practically constant the useful energy throughout the test period. There are differ-

ences in design between these two concentrators, being concentrator 2 in accordance with a parabolic reflective surface of stainless steel 316 L, with a mirror polish inside. Concentrator 5 under a parabolic reflector surface made with type 304 stainless steel with a mirror polish inside.

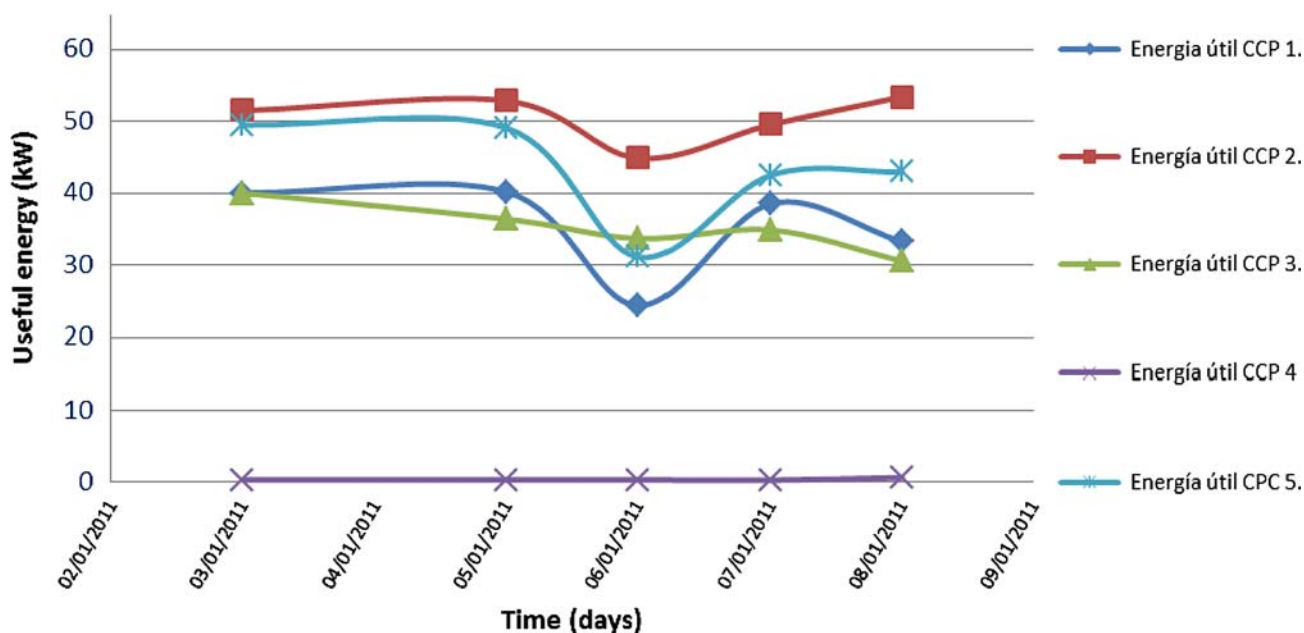


Fig. 12. Useful energy achieved at different days for the five concentrator.

Table 2  
Cost of each collector

No.	Name	Feature	Cost (US\$)
1	PCC	Mirrors	123.66
2	PCC	316 Stainless steel	292.00
3	PCC	Aluminum	209.28
4	PCC	Aluminum paint	133.18
5	CPC	304 stainless steel	157.53

Table 2 shows the unit cost of each collector load according to the design criteria.

#### 4. Conclusions

The conclusions are presented for each concentrator and in the order they were installed. The first one (No. 1): PCC arrangement with mirrors, the concentrator for the time period reported in figures and tables shows a low heat input to the system (underperformance), for moreover the ability of the mirrors to reflect light is highly effective. It would be feasible to consider a sheet of plate glass as a concentrating plate.

The second concentrator is the PCC (No. 2) in accordance with type 316 stainless steel. This collector, based on the results, is the best collector, has brought useful energy, and has given a better performance to the system. The properties of the thermal stainless-steel mirror polish achieved a better efficiency

throughout the day as directly affected by increasing awareness of the direct and diffuse light.

The third of the solar concentrator arrangement with aluminum has a stable system temperature, but it has significantly changed the environmental conditions. Therefore, it is suitable to install both in sunny regions like partially cloudy. This is mainly due to properties of thermal conductivity of the aluminum; a visible disadvantage is that it is very difficult to make a mirror polish concentrator plate. This considerably affects the efficiency and useful energy of the system, also in the light gathering.

The fourth of the solar concentrator array with aluminum paint is a concentrator that showed particularly strange behavior as the results have shown that far from warm water over the receiving tube is was cold. This is because the paint reflective plate does not make any visible positive contribution to the system, which means that it neither captures direct light nor diffused or reflected light to the environment. Therefore, the useful energy and efficiency are negative. While it is apparent that it maintains higher temperatures than the glass concentrator. Probably the paint containing the aluminum particles in the suspension causes the greenhouse effect and the temperature increases in the system.

The fifth and the last of the solar concentrators, has a different design to others, better known as a compound parabolic concentrator, or CPC. This solar concentrator composed of a parable on which the receiver tube rests, thanks to this design, it is smaller

but it has the possibility to capture better the diffuse light reflected by the atmosphere; this benefit is reflected in the contributions of the useful energy efficiency and heat that is visible in comparison with the aluminum concentrator and in some cases even better. This arrangement makes it comparatively and esthetically better, it also has better convective features that avoid the losses for being smaller.

According to the above results, it can be concluded that the application of renewable energy must be the future of national and global research owing to the perennial problem with fossil fuels.

## References

- [1] J.C. Burbano, Á. Hernán. Diseño y construcción de un calentador solar de agua operando por termo sifon, *Scientia et Technica*, XII(31) (2006) 85–90.
- [2] J. Álvarez Guerra, E. Roca Oria, Limite termodinámico en los procesos de concentración de la luz solar, *Centro de estudios energía y medio ambiente, Cuba*, 2006. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar26/.../articulo06.htm>.
- [3] P. Fernández Diez, Libros sobre ingeniería energética, 04 colectores de concentración de mediana temperatura, 29, 2011. <http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=12>.
- [4] A. Gómez Cuellar, J. Pulido Granados, Colector Solar Parabólico, No. 8, 2007. [http://www.expodime.cucei.udg.mx/vexpo/IVEXPODIME/pdf/EXPODIME\\_07.PDF](http://www.expodime.cucei.udg.mx/vexpo/IVEXPODIME/pdf/EXPODIME_07.PDF).
- [5] M.I. Gonzáles Martín, Refrigeración solar para adsorción con sistema de captación CPC experimentos y modelos, Thesis MS of Universidad de Burgos, 2006.
- [6] J. Gonzáles Velasco, Energías renovables, Editorial reverté. España, 2009, p. 656. <http://www.reverte.com/catalogo/img/pdfs/9788429179125.pdf>.
- [7] S. Guevara Vásquez, Teoría para el diseño de calentadores solares de agua. ed. Agencia suiza para el desarrollo, Lima, 2003, p. 23.
- [8] M. Ibañez Plana, Rosell Polo Jr., Rosel Urutia Jr., Tecnología solar. ed. Mundiprensa libros. España, 2005, p. 544.
- [9] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
- [10] B.A. Meinel, M. Pettit Meinel, Aplicaciones de la energía solar, Reverte S.A., Barcelona, 1982, p. 699.
- [11] M. Mendoza Ramírez, Notas Sobre el curso de energía solar, Instituto tecnológico y de estudios superiores de occidente, Jalisco, México, 1995.
- [12] C. Pablo Bravo, Evaluación experimental de un concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP), Centro de energías renovables de Tacna (CERT), facultad de ciencias, Perú, 2008, p. 12.
- [13] L. Platón Arias, J.F. San José Alonso, Optimización del dimensionado de instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria, Escuela Técnica superior de ingenieros industriales de Valladolid, España, energías renovables, No. 153, 2009, p. 43.
- [14] J.C. Paz Gutiérrez, Energía solar, colectores solares planos construcción. Universidad autónoma de ciudad Juárez, instituto de ingeniería y tecnología, México, 2006, p. 116.
- [15] P. Ramírez Vázquez, S.L. Gonzales, Ibarra Herrera, J. Energía Solar, México, 1979.
- [16] Sagan, Cosmos, Planeta, México, 1985.
- [17] R. Salgado Almanza, F. Muños Gutiérrez, Ingeniería de la energía solar, El colegio nacional, México, 1994.
- [18] M. Silva Pérez, Aprovechamiento de energía solar en mediana y alta temperatura, sistemas termo solares de concentración (2005) 15.
- [19] E. Venegas Reyes, Sistemas para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco puntual, Tesis de Maestría, México, 2008, p. 81.
- [20] L.G. Vidriales Escobar, Colector de canal Parabólico para la generación de directa de vapor para calor de proceso, Tesis de Maestría, México, 2007, p. 112.



## Optimal operating condition for a type W parabolic trough collector with low-cost components using inverse neural network and solved by genetic algorithm

E.D. Reyes-Téllez<sup>a</sup>, R.A. Conde-Gutiérrez<sup>a,\*</sup>, J.A. Hernández<sup>b,\*</sup>, E. Cardoso<sup>a</sup>,  
S. Silva-Martínez<sup>b</sup>, F. Z. Sierra<sup>b</sup>, O. Cortés<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Posgrado del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, CP. 62209, Cuernavaca, Morelos, México, email: roberto.conde@uaem.mx (R.A. Conde-Gutiérrez)

<sup>b</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa, CP. 62209, Cuernavaca, Morelos, México, Tel. +52 01 777 3297084 email: alfredo@uaem.mx (J.A. Hernández)

<sup>c</sup>Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido "Serrano" s/n, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, Puebla, C.P. 72640

Received 28 June 2016; Accepted 16 November 2016

### ABSTRACT

The parabolic trough collectors (PTC) are able to concentrate the solar radiation and in turn transferred heat along a tube. In this paper, the PTC uses copper tube to heat water in residential use, which reduced costs in the system. An artificial neural network (ANN) model was developed to predict the hot-water outlet temperature of PTC with low-cost components, and its inverse (ANNi) was used to optimize the system's performance. The best fitting training data was acquired with the architecture of 9-9-1 considering a hyperbolic tangent sigmoid transfer-function in the hidden layer and a linear transfer-function in the output. Comparing the predicted and experimental data it was observed a satisfactory agreement ( $R^2 > 0.9854$ , RMSE  $> 0.8055$  and MAE  $\sim 0.0586$ ). Furthermore, from this ANN model, a strategy was applied for optimize the feeding tank temperature, in order to increase the water outlet temperature of the PTC, using inverse artificial neural networks (ANNi) and solved by the method of genetic algorithms (GAs). These results showed that the highest outlet temperature reached by the PTC was 49°C. Consequently a good prediction of the ANN model, as well as the optimized data using ANNi-GAs, makes it possible to control on-line the operation of the system and improve performance.

*Keywords:* Parabolic trough collector with low-cost components; Increase of water temperature; Inverse artificial neural network; Genetic algorithms; Optimal values

### 1. Introduction

Currently, the exploitation of flat panel solar thermal collectors has assumed a great importance not only in residential applications, but also in industrial and commercial buildings, where low temperature-hot water is required and particularly for hot climates [1].

However, in the search at increase efficiency in these equipment, they have become more expensive, due to the materials used for its manufacture, making them inaccessible to the residential areas of low economic resources, in where only is required to increase the temperature of the water to meet their daily needs.

Apart of the flat panel solar collectors, there are also of type parabolic, which has the capability to absorb the solar

\*Corresponding author.

Presented at the EDS conference on Desalination for the Environment: Clean Water and Energy, Rome, Italy, 22–26 May 2016.

radiation and convert it to heat, transferring it to the working fluid. The working fluid to be heating can be maybe air, water, oil or some organic solvents. The heat energy which is in the form of thermal energy in the working fluid of the solar collector can directly be utilized for different applications [2].

The parabolic trough collectors (PTC) are one possible option for use in residential areas, as they can be made with inexpensive materials and feasible for installation in low-income communities. In this work, this type of collector is elected in specific because the materials used can be found in any region (copper tube and concentrator of steel), in order to have a long shelf life by his resistance, in comparison with other fragile materials.

In this work, we study the description of experimental equipment PTC with low-cost components. In addition, simulate the obtained experimental data with an artificial neural network (ANN) model. ANN has been widely used to simulate diver's solar collectors, as: Kalogirou [3] used the artificial neural networks for the prediction of the performance parameters of flat-plate solar collectors. Sözen et al. [4] studied a new formula based on artificial neural network technique which was developed to determine the efficiency of flat plate solar collectors, where the surface temperature in collector, date, time, solar radiation, declination angle, azimuth angle and tilt angle are used in the input layer of the network and the efficiency of flat-plate solar collector was in the output layer. Caner et al. [5] used an artificial neural network model to estimate thermal performances of solar air collectors for two types of solar air collectors, calculated values of thermal performances are compared to predict values and the results demonstrate effectiveness of the proposed ANN. Fischer et al. [6] realized a comparison between state-of-the-art and neural network modeling of solar collectors. The obtained results showed better agreement between measured and calculated collector output for the artificial neural network approach compared with the state-of-the-art modelling.

Consequently, once simulated the experimental data using ANN, it is necessary to know the optimal conditions in the input variables for the PTC in order to deliver better results. Inverse artificial neural network (ANNi) is an essential element to calculate the optimal operation conditions. This model uses the same weights and bias obtained during training ANN model and has been used in experimental equipment in order to improve performance, such as: Laidi et al. [7] used this kind of methodology to determine the optimal solar COP value of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs, where this methodology was applied to find optimal input parameter for the required solar COP. Hattab et al. [8] developed and tested an inverse artificial neural network model for the prediction of the optimal soil treatment to reduce copper (Cu) toxicity assessed by a given target concentration of Cu in dwarf bean leaves (BL) from selected soil inputs. Morales et al. [9] developed an artificial neural network (ANN) model to predict the coefficient of performance (COP) of an absorption heat transformer with a new physical design consisting of compact components and they applied a model of inverse artificial neural network to optimize the

value of COP, showing an increase in COP of 0.35–0.40, finding the optimal conditions in the inlet temperatures generator and for evaporator.

In this work, the water outlet temperature ( $T_{out}$ ) of the PTC is chosen as a required value, as it is considered a general variable to determine the performance system, but to know this value, depends on the variables of system, such as: the feeding tank temperature ( $T_{feed}$ ), the storage tank temperature of the water hot ( $T_{sto}$ ), inlet temperature to the solar collector ( $T_{in}$ ), month ( $m$ ), day ( $d$ ), total time ( $t$ ), ambient temperature ( $T_{amb}$ ), surface temperature to glass solar collector ( $T_{surf}$ ) and the temperature of reflector surface ( $T_{ref}$ ), which some of these input variables can be optimized to increase the performance of the PTC.

The aim of the present work was to develop a strategy to optimally control of a parabolic trough collector with low-cost components. In this case, the input condition to optimize the system was the feeding tank temperature ( $T_{feed}$ ). This inlet variable was optimized using the methodology of ANNi and solved by the genetic algorithms (GAs). It is interesting mention the identification of this parameter, since this was supplied to the equipment and can be regulated directly, unlike other input variables that depend on climatic conditions. Determining optimal conditions of input variables may increase the  $T_{out}$  value, in order to know the maximum water temperature at the outlet of PTC and determine that domestic activities can be performed with the temperature interval.

## 2. Description of experimental equipment

A static collector with solar type-parabolic concentrator of foil reflective plate 316L stainless steel 16 gauge with mirror polishing the inside was installed as shown in Fig. 1. This solar collector was chosen because it was the most viable to have better results in collection performance (37%) and better usable thermal energy (and includes losses) with 50.5 kW [10].

The concentrator consists of a steel sheet drum vertically cut with dimensions of 85 cm long by 57 cm diameter (see Fig. 1). The receiving surface was constituted of a copper tube of 1.27 cm diameter ( $\frac{1}{2}$  inch) by 90 cm long and was painted black to have a higher absorptivity.

To avoid convective losses and take advantage of the greenhouse effect, it has a glass cover of 85 cm long by 57 cm wide, with an aluminum frame.

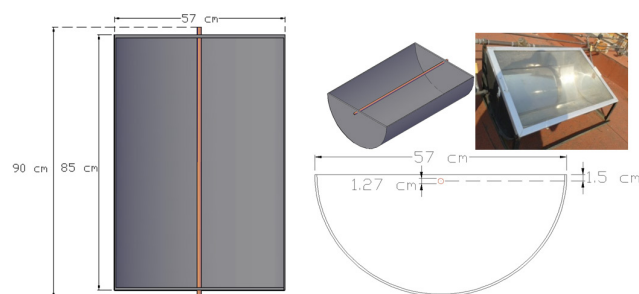


Fig.1. Dimensions with front and side view of the PTC system.

This PTC was instrumented with thermocouples type T properly calibrated to measure temperature in the following region (see Fig. 2):

1. At the entrance of the copper tube
2. At the output of the copper tube
3. In the reflective surface
4. On the surface of the glass plate
5. One atmospheric

An acquisition card Agilent Agilent 34970A was used and by Benchlink Data Logger software was saved and stored the previously described temperatures with date and time to create the database.

Fig. 2 shows that the system comprises a feed tank (cold water) and storage tank of hot water (thermo-tank) of 750 and 450 L, respectively. They are interconnected to have recirculation and thus raise the temperature of the feed tank when hot water will not be in use.

### 2.1. Operating conditions

The type-parabolic trough collector was fixed and the entire system was located on the facilities of CIICAp-UAEM in the State of Morelos, in the city of Cuernavaca; with latitude and longitude coordinates of 18.981655, -99.23418 respectively. Its orientation was East-West with the face of the reflector plate pointing south. It has 19° inclination to better exploit the incidence of solar radiation, according to the latitude.

Experimental tests were performed with a flow rate of 1 LPM sanitary water for common use. For this, the shut-off valves were regulated and according to the flow meter to maintain this constant flow throughout the duration of the test. Table 1 show the operating conditions which were applied in the PTC experimental.

Table 1

Interval of experimental operating conditions used to obtain the  $T_{out}$  values

Experimental variables	Working range
Inputs	
Month	1–12
Day	1–31
Time, s	20267–69085
Temp. input, °C	9–50.01
Temp. ambient, °C	9.07–70.28
Temp. surface, °C	9.53–51.4
Temp. reflectance, °C	9.05–77.92
Temp. feed, °C	13.14–30.35
Temp. storage, °C	13.57–54.07
Output	
Temp. output, °C	9.73–50.67

The hours, at which the tests were started and ended, were varied, taking the earliest time of day at 5:30 am while the later was at 19:10 h. The most common start and end of test was 9:00 has 17:30 h. The interval between measurements was 10 s. These tests were conducted in the months of May and June (spring and summer) of 2014 and January 2016 (winter) [11].

### 3. Development of the neural network model

The artificial neural network model (ANN) was integrated with  $k$  inputs, where each input ( $In_i$ ) was assigned with an appropriate coefficient called weight ( $W$ ). The sum

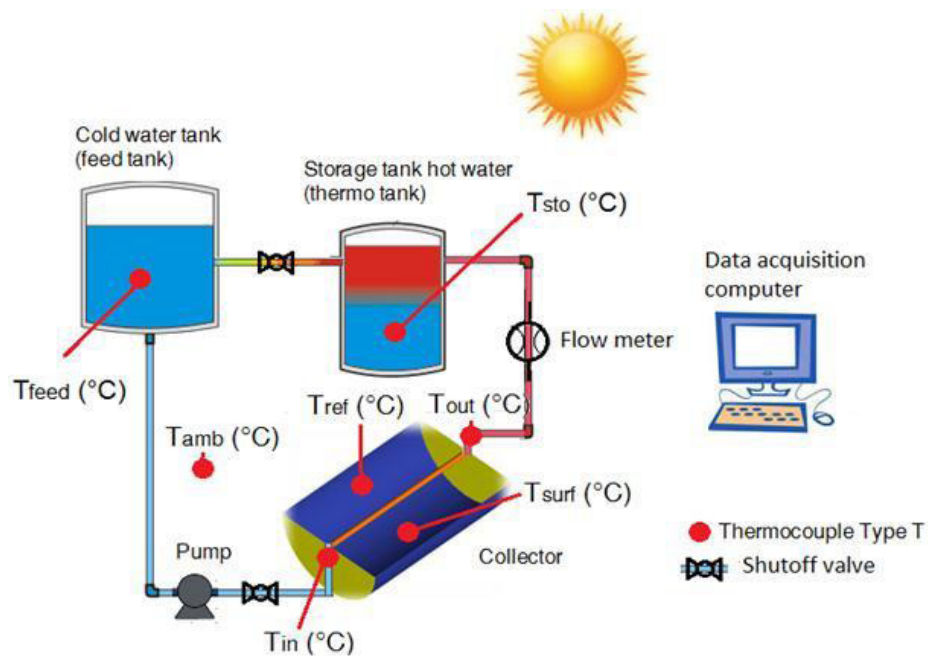


Fig. 2. Schematic diagram of experimental system PTC with low-cost components.



of the inputs, weights and biases  $b$  generate the argument ( $n_s$ ) [see Eq. (1)] to be applied at a transfer-function which will generate an output.

$$n_s = W_{i(s,1)} \times In_1 + W_{i(s,2)} \times In_2 + \dots + W_{i(s,k)} \times In_k + b_{(1,s)} \quad (1)$$

The weights ( $W_i$ ) and biases ( $b_i$ ) are coefficients connected with the input-hidden layers which are grouped into matrices. For the output-layer, the weighted sum of the signals provided by the hidden layer, and the associated coefficients were grouped into matrices  $W_o$  and  $b_o$ . In the hidden layer, the hyperbolic tangent transfer function (TANSIG) was applied and in output layer was used the linear transfer function (PURELIN) to had a better prediction with respect to the experimental data. All calculations were carried out with Matlab mathematical software with the ANN toolbox.

In order to ANN model development, it was carried out through three general tasks [12] (see Fig. 3):

- i) Divide randomly the database experimental (69,047) into training (50%), testing (25%) and validation (25%). These data was sufficient to train and test the ANN model.
- ii) Development and evaluation of ANN models, for the reliable prediction of the outlet temperature of hot water of PTC.
- iii) Comparative statistical analysis between experimental data and predicted  $T_{out}$  (inferred from the application of the ANN tools).

It is important to mention that the input parameters were normalized ( $x_{i, Norm}$ ) in the range (0, 0.9) as follows [13]:

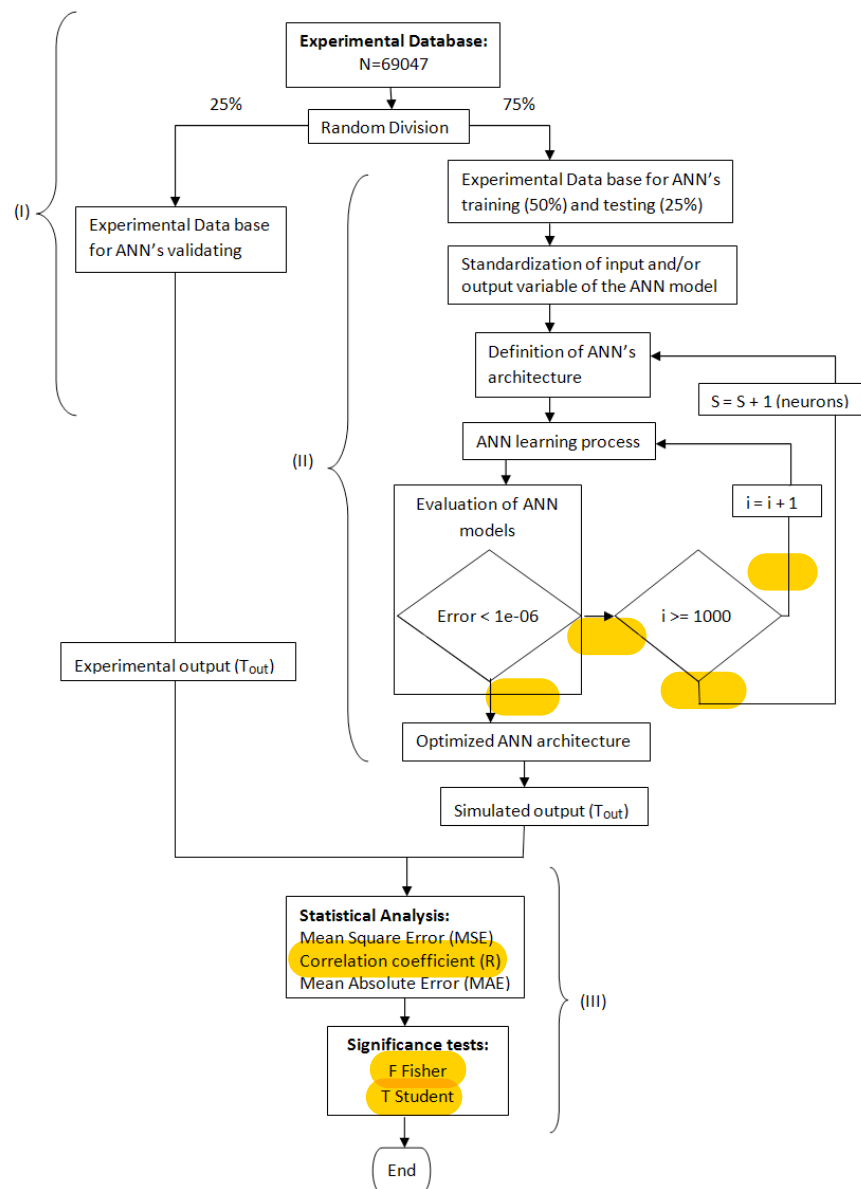


Fig. 3. Schematic methodology [modified from 12].

$$x_{i, Norm} = 0.8 \times \left( \frac{X_{i, Real} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) + 0.1 \quad (2)$$

ANN was normally trained for leading a particular input to predict an output target. For minimizing the differences between the output target (given by experimental data) and simulated output (generated by a weight adjusting process), the back-propagation optimization algorithms using the Levenberg–Marquardt algorithm (see Fig. 4), was considered by Hagan and Menhaj [14,15] as the most efficient and it was widely preferred [16]. The root mean square error (RMSE) was applied as an optimization criterion in training for the adjustment ANN model.

In order to corroborate the adaptability of the ANN model was compared experimental data and simulated applying the following statistical test parameters: root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the coefficient of determination ( $R^2$ ) [17].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{Sim(i)} - P_{Exp(i)})^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{Exp(i)} - P_{Sim(i)}}{P_{Exp(i)}} \right) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{Exp(i)} - P_{Sim(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{Exp(i)} - \bar{P}_{Exp})^2} \quad (5)$$

where  $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ ;  $P_{Sim(i)}$  was the value estimated by ANN;  $P_{Exp(i)}$  was the experimental value of the variable ( $T_{out}$ ).

Finally, the comparison of the simulated database by ANN and the experimental database was applied the tests of the relationship Fisher F and Student  $t$  for confirm the adequacy of the model. The aim was to analyze statistically: if the two databases have the same or similar variances (test Fisher-F); or if the two databases belong to the same population or similar populations through its mean (test Student- $t$ ) [18].

$$F = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (6)$$

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{s \left( \sqrt{\frac{1}{nx} + \frac{1}{ny}} \right)} \quad (7)$$

#### 4. Neural network model

An ANN model with nine neurons in the hidden layer was found to be efficient in predicting  $T_{out}$  values for a parabolic trough collector with low-cost components. Different numbers of neurons in the hidden layer were tested to determine the best architecture of the ANN model. Table 2 provides a comparison between the transfer function (TAN-SIG) and the error for  $T_{out}$  predicted by an ANN model.

According to data obtained by the ANN training, the best values for RMSE, MAE and  $R^2$  were 0.8055, 0.0586, and 0.9854, respectively. Fig. 5 presents a comparison between the predicted and experimental data of the  $T_{out}$  values, using all data (training, testing and validation). Experimental  $T_{out}$  Exp and simulated  $T_{out}$  Sim data were compared satisfactorily through a linear regression model [ $T_{out} Sim = 0.98542 * T_{out} Exp + 0.44038$ ].

Table 3 shows the test from the relationship Student  $t$  and Fisher  $F$ , where the hypothesis null  $H_0$  is accepted for both tests showed. The results in the two samples have the same variance and the means of the samples are equal, indicating that the sample comes from the same population.

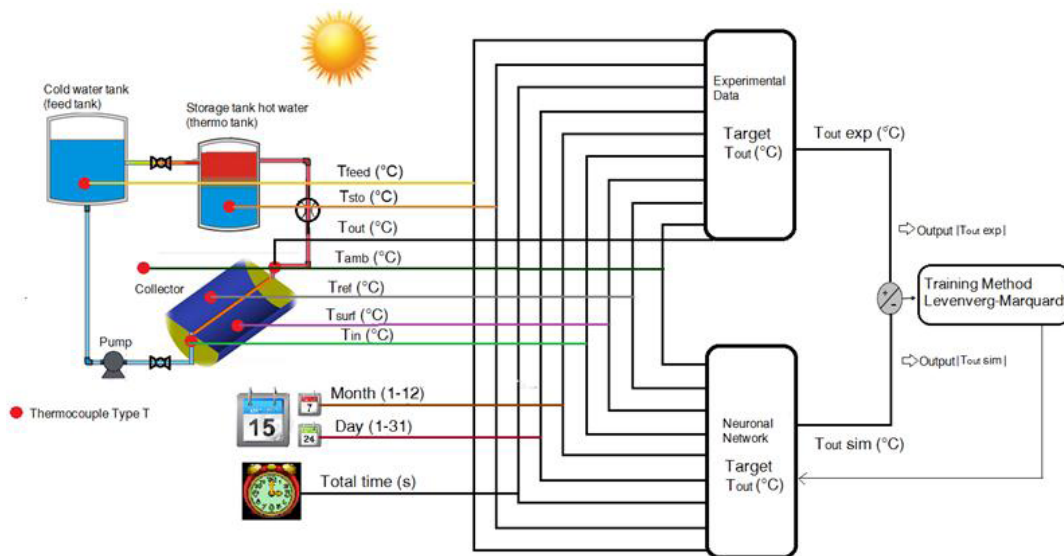


Fig. 4. Applied network architecture for  $T_{out}$  values and procedure used for neural network learning.

Table 2  
Tests with different architectures ANN

Architecture ANN	Number of neurons	Epoch	Coefficient of determination	Root mean square error	Mean absolute error	Root mean square error	Mean absolute error
			(R <sup>2</sup> )	(RMSE)	(MAE)	(RMSE)	(MAE)
			TANSIG			Data Training	
9-1-1	1	1000	0.9158	1.9373	0.3969	1.3697	0.3975
9-2-1	2	1000	0.9461	1.5492	0.2131	1.0956	0.2140
9-3-1	3	1000	0.9587	1.3560	0.1729	0.9586	0.1728
9-4-1	4	1000	0.9693	1.1695	0.1350	0.8277	0.1353
9-5-1	5	1000	0.9712	1.1335	0.1296	0.8018	0.1285
9-6-1	6	1000	0.9751	1.0532	0.1041	0.7458	0.1057
9-7-1	7	1000	0.9786	0.9764	0.1000	0.6905	0.0995
9-8-1	8	1000	0.9808	0.9244	0.0897	0.6540	0.0909
9-9-1	9	1000	0.9854	0.8055	0.0586	0.5700	0.0603
9-10-1	10	1000	0.9851	0.8140	0.0651	0.5763	0.0673

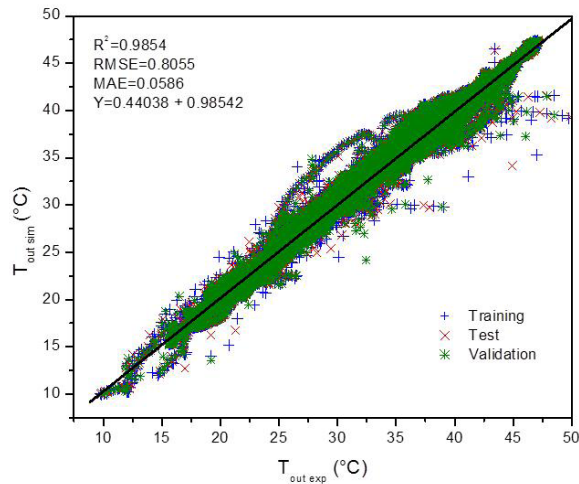


Fig. 5. Statistical comparison between simulated (ANN) and experimental  $T_{out}$  data.

Table 3  
Application of significance tests from relationship Fisher  $F$  and Student  $t$

Test Fisher $F$	Test Student $t$
$F$ (Inflicted Eq. 6) 1.0146	$t$ (Inflicted Eq. 7) 0.1161
$F_c$ (Inflicted from statistical tables 99%) 1.0178	$t_c$ (Inflicted from statistical tables 99%) 2.3264
Comparison 1.0146 < 1.0178	Comparison 0.1161 < 2.3264
The null hypothesis $H_0$ is accepted " $S_x^2 \approx S_y^2$ "	The null hypothesis $H_0$ is accepted " $\bar{x} \approx \bar{y}$ "

Table 4 presents the adjustable parameters ( $W_i$ ,  $W_o$ ,  $b_1$  and  $b_2$ ) of the proposed model. Consequently, these coefficients are used in the ANN model to simulate  $T_{out}$  values.

Basing on the best structure of ANN (9 neurons in the hidden layer) and a transfer function (TANSIG), the

proposed model can be analytically represented by the following Eq. (8):

$$T_{out} = \sum_{j=1}^s W_o(j) \cdot \left[ \frac{2}{1 + \exp\left(-2 \cdot \left(\sum_{k=1}^K (W_i(j,k) \cdot \ln(k)) + b1(j)\right)\right)} - 1 \right] + b2 \quad (8)$$

where  $s$  is the neurons number in the hidden layer ( $s = 9$ ),  $k$  is the neurons number in the input layer ( $k = 9$ ), and  $W$  and  $b$  are weights and biases, respectively (see Table 4).

This model after being compared and analyzed statistically, we can be successfully used for simulation and control on-line of the experimental equipment, as it is shown in Fig. 6, which is compared the  $T_{out}$  values with respect to the time of day, where it is observed that the highest values of  $T_{out}$  reached in the period of 12 to 16 h, due to region and sunlight. With ANN model, was observed a good agreement between predicted values and experimental data points. This confirmed the adequacy of the ANN to carry out the simulation from the hot water outlet temperature for a parabolic trough collector with low-cost components.

## 5. Development of the inverse neural network model

This methodology was used to calculate optimum operating conditions at the input variables of experimental equipment to obtain better results [19]. Starting from Eq. (8), if output the  $T_{out}$  was known, it can find an optimal input variable ( $k$ ), as shown in the following steps:

First develop the equation of the  $T_{out}$  from the ANN model, with nine neurons, with their weights and bias, respectively.

$$T_{out} = 2 \left[ \frac{W_{0(1,1)}}{1 + \exp(x_1)} + \frac{W_{0(1,2)}}{1 + \exp(x_2)} + \frac{W_{0(1,3)}}{1 + \exp(x_3)} + \frac{W_{0(1,4)}}{1 + \exp(x_4)} + \frac{W_{0(1,5)}}{1 + \exp(x_5)} + \frac{W_{0(1,6)}}{1 + \exp(x_6)} + \frac{W_{0(1,7)}}{1 + \exp(x_7)} + \frac{W_{0(1,8)}}{1 + \exp(x_8)} + \frac{W_{0(1,9)}}{1 + \exp(x_9)} \right] - (W_{0(1,1)} + W_{0(1,2)} + W_{0(1,3)} + W_{0(1,4)} + W_{0(1,5)} + W_{0(1,6)} + W_{0(1,7)} + W_{0(1,8)} + W_{0(1,9)}) + b2 \quad (9)$$

Table 4  
Weighting and bias parameters obtained for the ANN model developed

Number of Inputs (k)	Hidden layer weight $W_i(k,s)$								
	(s = 1)	(s = 2)	(s = 3)	(s = 4)	(s = 5)	(s = 6)	(s = 7)	(s = 8)	(s = 9)
1	-7.47223	-45.43951	-23.35323	-28.32771	8.04169	6.66546	6.94243	-9.03039	132.64311
2	-4.33701	0.01231	6.69262	-3.32465	0.42654	0.80512	3.23766	1.83490	-0.08478
3	0.19145	0.66056	-0.98259	1.55410	-1.23535	-0.16123	0.45906	0.57498	0.64693
4	-49.39705	11.99704	-5.02621	-36.71076	-19.01847	2.39624	25.20531	27.59983	13.66471
5	13.39573	12.11535	7.49851	-15.02677	-9.06184	-2.68765	8.22856	2.31844	4.25276
6	-30.41051	-37.72298	-50.21982	16.61051	-7.70863	8.37961	-27.39636	-43.31220	266.32813
7	8.39629	-1.98483	-1.20287	11.43457	5.90166	-1.24893	-4.12611	-8.70573	-4.95515
8	4.88839	-5.00822	3.21137	8.65863	4.98912	-2.18178	-3.74167	-7.26927	-12.09112
9	-46.48324	6.28701	-25.30987	10.58262	-20.10860	-0.48387	-9.75767	18.70274	-14.01995
Output layer weights ( $l = 1$ ) $W_0(s,l)$									
$s,l$	1.96232	6.55676	21.17485	3.29298	-2.98869	-1.59993	3.95455	4.29601	-2.13722
Bia $b_1(s)$	28.05543	-2.35558	-0.75726	37.70280	-18.33455	18.67116	-1.07319	0.33432	52.19837
Bia $b_2(l = 1)$	22.14903								

$s$  is the number of neurons in the hidden layer,  $k$  is the number of neurons in the input layer,  $l$  is the number of neurons in output layer ( $l = 1$ ).

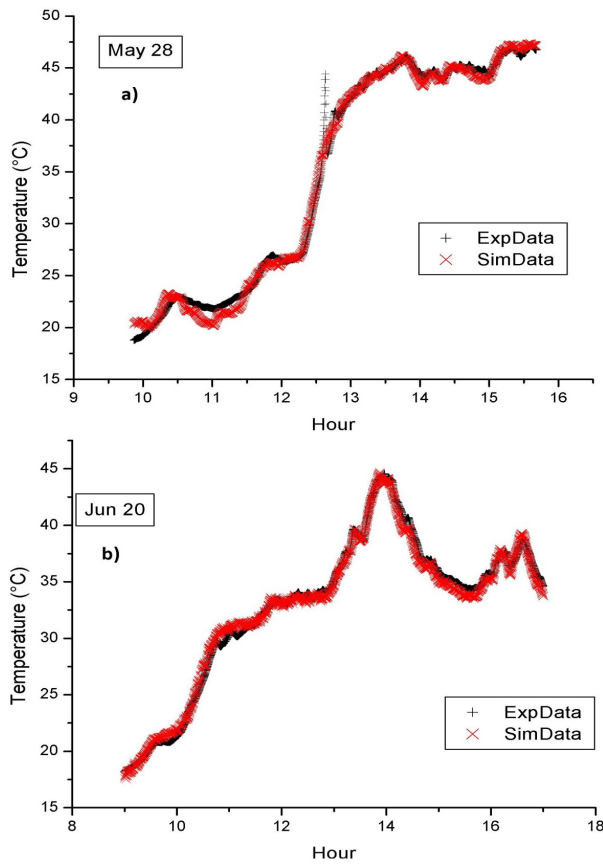


Fig. 6. Comparison of the hot water outlet temperature of PTC between experimental and simulated by ANN, with respect to the time of day a) for May, b) for June.

wherein in  $(x)$  you can choose any of the 9 available input variables  $(k)$ , to know its optimum value and observe the results obtained with respect to  $T_{out}$ .

$$x_1 = -2 \cdot \left( \frac{W_{i(1,1)} \cdot k1 + W_{i(1,2)} \cdot k2 + W_{i(1,3)} \cdot k3 + W_{i(1,4)} \cdot k4 + W_{i(1,5)} \cdot k5}{+ W_{i(1,6)} \cdot k6 + W_{i(1,7)} \cdot k7 \dots + W_{i(1,8)} \cdot k8 + W_{i(1,9)} \cdot k9 + b1_{(1)}} \right) \quad (10)$$

$$x_9 = -2 \cdot \left( \frac{W_{i(9,1)} \cdot k1 + W_{i(9,2)} \cdot k2 + W_{i(9,3)} \cdot k3 + W_{i(9,4)} \cdot k4 + W_{i(9,5)} \cdot k5}{+ W_{i(9,6)} \cdot k6 + W_{i(9,7)} \cdot k7 \dots + W_{i(9,8)} \cdot k8 + W_{i(9,9)} \cdot k9 + b1_{(9)}} \right) \quad (11)$$

In this work, it was important identify parameters of operation through ANNi, in order to set an optimal value. In this case, the feeding tank temperature was elected, since this variable can be regulated directly by a valve and according with optimization you can vary the temperature of water, entering warmer or colder at equipment, as required. The new set temperatures, will allow efficiently operate the system and may increasing the value of  $T_{out}$ .

Applying the methodology ANNi (see Fig. 7), the objective function can be minimized to zero to set the optimal input condition which is obtained in Eq. (12), which in this work was resolved by an optimization method from genetic algorithms.

$$Fun(T_{feed}) = b_2 - \sum_{j=1}^S W_o(j) - T_{out} + \sum_{j=1}^S \left[ \frac{2W_o(j)}{1 + \exp\left(-2\left(W_i(j,k) \cdot \ln(T_{feed})\right) + \sum_{k=1}^K \left(W_i(j,k) \cdot \ln(k) + b1_{(j)}\right)\right)} \right] \quad (12)$$

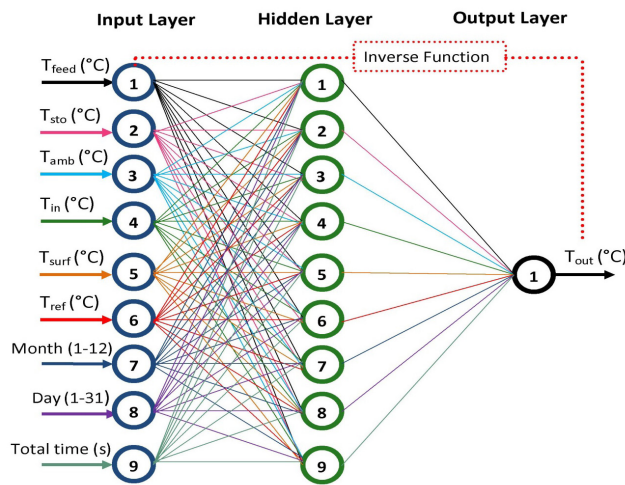


Fig. 7. Architecture of the ANNi for determining the optimum  $T_{feed}$  and find the maximum value of  $T_{out}$ .

### 5.1. Adequate value estimate by mean of genetic algorithms

In order to solve the Eq. (12), was used a computational tool called genetic algorithms (GAs). GAs was a stochastic optimization algorithm which employs a population of chromosomes and each of them represents a possible solution. By considering genetic operators, each successive incremental improvement in a chromosome becomes the basis for the next generation. The process continues until the desired number of generations has been completed or the pre-defined fitness value has been reached [20].

This algorithm was programmed to solve and find an unknown value, its purpose was to find the maximum value of the objective function minimized to zero, and thus, from random number the algorithm traces a tendency of behavior between the optimized input values with respect to the value of  $T_{out}$ . The efficiency of a GAs was greatly dependent on its tuning parameters; the combinations to control parameters used for running GAs were shown in Table 5.

ANNi model was applied to three experimental tests random used to determine optimal conditions of  $T_{feed}$  with respect to a desired value  $T_{out}$ , as shown in Table 6. ANNi showed a tendency to which, according to an optimal value  $T_{feed}$  a maximum value  $T_{out}$  was achieved.

Once resolved the Eq. 12 for the three experimental tests by AGs, we shown in Fig. 8 the maximum value of  $T_{out}$  which was in May, reaching a value to the collector output of 49°C, followed by June with 44.5°C and January with 32.6°C, with entries optimal in the feeding tank of 19°C, 20°C and 13°C, respectively. These conditions predicted by the model ANNi were logical, since in the month of May was where most room temperature occurs in the area and therefore more solar radiation occurs, on the other hand, in January the temperature was lower by the winter. Consequently, in the hot seasons (spring and summer) the value of  $T_{out}$  will be high, but in the winter seasons (autumn and winter), the value of  $T_{out}$  will be low.

Now, use low temperatures in the feed tank (less than 20°C) favor the experimental equipment, this demonstrates the ability of PTC to heat water starting from low temperatures.

Table 5  
Parameters used for running GAs

Algorithms	Parameters	Value
Gas	Population creation	Random
	Number of generations	100
	Scaling function	Rank
	Selection function	Roulette
	Reproduction crossover probability	0.2
	Mutation function	Uniform
	Mutation rate	0.2
	Crossover function	Scattered

Table 6  
Experimental tests to apply the model ANNi-GAs

Inputs	1° Test	2° Test	3° Test
Month	May	June	January
Day	28	20	22
Hour	55193	50400	42648
Temp. input	43.66	40.76	34.06
Temp. ambient	63.43	26.04	39.97
Temp. surface	48.17	46.70	32.06
Temp. reflectance	75.33	69.27	33.51
Temp. feed	Variable to optimize		
Temp. storage	24.35	24.32	19.62
Output	Find maximum value		
Temp. output	Find maximum value		

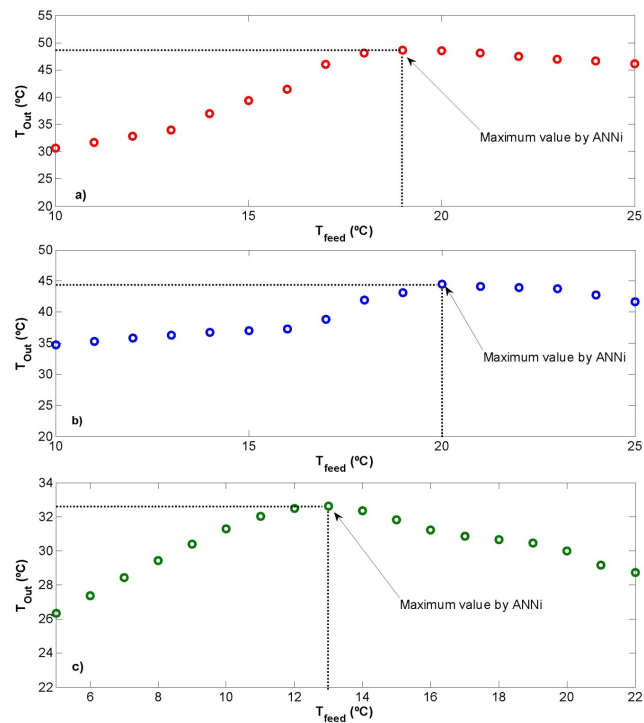


Fig. 8. Optimal conditions from  $T_{feed}$  in the PTC with respect to the  $T_{out}$  simulated by ANNi, for the month of a) May, b) June and c) January.



Table 7  
Comparison between the PTC with respect to other types of collectors

Reference of experimental equipment	Collector type	Advantage	Disadvantage
Kaushika and Reddy [21]	Parabolic dish	High efficiency, with the highest temperature at a single point. Conversion efficiency of steam of 70–80% at 450°C	The tracking system used is expensive, the total cost of the collector is 38000 Rupees (\$ 568.48 USD)
Sobhansarbandi and Atikol [22]	Flat plate (FPC) and Compound parabolic concentrating (CPC)	The outlet fluid temperature of the Flat-Plate collector is between 25–75°C, whereas for CPC collector this <b>range</b> is between 25–95°C. The simulations suggest that a 2 m <sup>2</sup> CPC collector can perform satisfactorily to match the job of 8 m <sup>2</sup> Flat-Plate collectors.	Both equipment are modeled on mathematical equations to simulate winter weather conditions. Both models do not provide an economic analysis of the materials used, which appears to be costly by implementing the use of a controller.
Hsieh [23]	Compound parabolic concentrator (CPC)	Good efficiency (about 56%). Exit temperatures of 50 to 140°C <b>Good efficiency (about 56%).</b> <b>Exit temperatures of 50 to 140°C.</b> The efficiency curve for the CPC has a far smaller slope than that of a flat-plate collector, which make the CPC particularly suited for high temperature applications	The model does not compare its results obtained with respect to experimental equipment, testing under the conditions of the model. In the model, an economic analysis of the materials is not contemplated, therefore, the equipment could be expensive
Bansal and Uhlemann [24]	Solar collector porous for heating air	Efficiencies up to 60% Long life, which makes it profitable	The performance of the porous collectors is considerably reduced if the pore size is not properly optimized. Back insulation, if not enough, lowers the thermal performance significantly.
Present work	Parabolic trough collector (PTC)	The copper tube turns out to be a very economical material with good conductivity. Total cost is \$ 292 USD [10]. The properties of the thermal stainless steel with the mirror polish achieved a better efficiency throughout the day, as it directly affects the increase awareness of the direct and diffuse light. ANNi model was used to optimize input variables according to experimental data of PTC, in order to achieve control the variables of equipment and in turn improve the outlet temperature	By using alternative materials, the outlet temperature was low (with a maximum value of 50°C). The collector efficiency was low (with collection performance of 37% and better usable thermal energy of 50.5 kW). The ANN model and ANNi are limited to predict and optimize others variables of PTC studied, it is necessary to acquire data from other types of solar collectors to get a general methodology

Finally, in Table 7 provides a comparison between advantages and disadvantages of PTC studied and his simulation-optimization methodology with respect to other types of collectors.

## 7. Conclusions

A parabolic trough collector with low-cost components was presented as a possible option for use in residential areas, with a good stability during operation and a good characteristic in the materials that allow you to last several years, with a minimum of maintenance.

The PTC was modeled to predict the  $T_{out}$  by an ANN model, with a structure of 9 neurons in the input layer, 9

neurons in the hidden layer, and 1 neuron in the output layer. This model was trained with a wide **range** of experimental data, using as input variables: the feeding tank temperature ( $T_{feed}$ ), the storage tank temperature of the water hot ( $T_{sto}$ ), the water inlet temperature to the solar collector ( $T_{in}$ ), month ( $m$ ), day ( $d$ ), total time ( $t$ ), ambient temperature ( $T_{amb}$ ), surface temperature to glass solar collector ( $T_{surf}$ ) and the temperature of reflector surface ( $T_{ref}$ ). The results of ANN model showed a good relationship with the experimental data satisfactorily passing significance tests (relationship Fisher  $F$  and Student  $t$ ) and a lower value of RMSE of 0.8055 and 0.57 during training.

Consequently, using the weights and bias from ANN model, a strategy was developed to optimize input variables

for increase the value of  $T_{out}$ . Once raised the ANNi model, the objective function resulting is resolved by genetic algorithms, showing an increase in  $T_{out}$  of 49°C for May, finding the optimal conditions in the feeding tank temperature of 19°C, condition suitable for regions where a high ambient temperature was reached.

With this optimized parameter, allow the PTC operates efficiently. To adjust the feed temperature of the tank was necessary to regulate the valve that recirculates water from the storage tank (hot-water) and the feed tank (cold-water).

Finally, this maximum temperature reached by the PTC, using the methodology of ANNi, can satisfy basic needs of residential areas, as with this output temperature of hot water, could be made activities as: take a shower, preheat food, heating tanks with water or for pools.

The combinations of computational methods described in this paper were an alternative that allows us to control the process on-line (ANN), and also optimize any of the input variables (ANNi). The GAs application was useful for the search of an unknown value starting from a random population and in turn finds a maximum value.

### List of Symbols

$In$	— Input variables
$b1$	— Bia in the input layer
$b2$	— Bia in the output layer
$n_s$	— Output argument of network
$W_i$	— Weights in the input layer
$W_o$	— Weights in the output layer
$x_{i, Norm}$	— Normalized input parameter
$x_{i, real}$	— Experimental input variable
$x_{min}$	— Input variable with the experimental minimum value
$x_{max}$	— Input variable with the experimental maximum value
$RMSE$	— Root Mean Square Error
$MAE$	— Mean Absolute Error
$R^2$	— Coefficient of determination
$P_{sim}$	— Simulated data of variable $T_{out}$
$P_{exp}$	— Experimental data of variable $T_{out}$
$F_{exp}$	— Mean experimental data of variable $T_{out}$
$F$	— Test <b>F Fisher</b>
$T$	— <b>Student's t test</b>
$S_x^2$	— Variance of the experimental data of variable $T_{out}$
$S_y^2$	— Variance of the simulated data of variable $T_{out}$
$\bar{x}$	— Mean experimental data of variable $T_{out}$
$\bar{y}$	— Mean simulated data of variable $T_{out}$
$S$	— Combined standard deviation of the two samples
$n_x$	— Number of experimental data
$n_y$	— Number of simulated data
$k$	— Number of neurons in the input layer
$s$	— Number of neurons in the hidden layer

### References

- [1] M.S. Hossain, R. Saidura, H. Fayaz, N.A. Rahim, M.R. Islam, J.U. Ahamed, M.M. Rahman, Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15 (2011) 3801–3812.
- [2] V.K. Jebasingh, G.M.J. Herbert, A review of solar parabolic trough collector, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 54 (2016) 1085–1091.
- [3] S.A. Kalogirou, Prediction of flat-plate collector performance

- parameters using artificial neural networks, *Sol. Energy*, 80 (2006) 248–259.
- [4] A. Sözen, T. Menlik, S. Ünvar, Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach, *Expert Syst. Appl.*, 35 (2008) 1533–1539.
- [5] M. Carner, E. Gedik, A. Keçebas, Investigation on thermal performance calculation of two type solar air collectors using artificial neural network, *Expert Syst. Appl.*, 38 (2011) 1668–1674.
- [6] S. Fischer, P. Frey, H. Drück, A comparison between state-of-the-art and neural network modeling of solar collectors, *Sol. Energy*, 86 (2012) 3268–3277.
- [7] M. Laidi, S. Hanini, Optimal solar COP prediction of a solar-assisted adsorption refrigeration system working with activated carbon/methanol as working pairs using direct and inverse artificial neural network, *Inter. J. Refrig.*, 36 (2013) 247–257.
- [8] N. Hattab, M. Motelica-Heino, Application of an inverse neural network model for the identification of optimal amendment to reduce copper toxicity in phyto remediated contaminated soils, *J. Geochem. Explor.*, 136 (2014) 14–23.
- [9] L.I. Morales, R.A. Conde-Gutiérrez, J.A. Hernández, A. Huicochea, D. Juárez-Romero, J. Siqueiros, Optimization of an absorption heat transformer with two-duplex components using inverse neural network and solved by genetic algorithm, *Appl. Therm. Eng.*, 85 (2015) 322–333.
- [10] E. Cardoso, S. Silva-Martinez, A. Alvarez, J.A. Hernández, Design and experimental analysis of low-cost heat water solar collectors, *Desal. Wat. Treat.*, 51(2013) 1302–1309.
- [11] E.D. Reyes-Téllez, Estimación de la temperatura de salida en un colector solar de bajo costo, Tesis de maestría, México, 2015, p. 115.
- [12] 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*, 124 (2014) 158–167.
- [13] C.I. Rocabrúno-Valdés, L.F. Ramírez-Verduzco, J.A. Hernández, Artificial neural network models to predict density, dynamic viscosity, and cetane number of biodiesel, *Fuel*, 147 (2015) 9–17.
- [14] M.T. Hagan, M.B. Menhaj, Training feed forward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Trans. Neural Netw.*, 5(6) (1994) 989–993.
- [15] M.T. Hagan, H.B. Demuth, M. Beale, editors, *Neural network design*, Boston, M.A. USA. PWS Publishing Co, 1997.
- [16] O. Çelik, A. Teke, H.B. Yıldırım, The optimized artificial neural network model with Levenberge Marquardt algorithm for global solar radiation estimation in Eastern Mediterranean Region of Turkey, *J. Clean Prod.*, 116 (2016) 1–12.
- [17] S.P. Verma, Estadística básica para el manejo de datos experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría), Universidad Nacional Autónoma de México, DF México, 2005.
- [18] S.P. Verma, Evaluation of polynomial regression models for the Student t and Fisher F critical values, the best interpolation equations from double and triple natural logarithm transformation of degrees of freedom up to 1000, and their applications to quality control in science and engineering, *Rev. Mex. Cienc. Geol.*, 26 (2009) 79–92.
- [19] 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.
- [20] F.B. Liu, A modified genetic algorithm for solving the inverse heat transfer problem of estimating plan heat source, *Inter. J. Heat. Mass Trans.*, 51 (2008) 3745–3752.
- [21] N.D. Kaushika, K.S. Reddy, Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system, *Energ. Convers. Manage.*, 41 (2000) 713–726.
- [22] S. Sobhansarbandi, U. Atikol, Performance of flat-plate and compound parabolic concentrating solar collectors in under-floor heating systems, *J. Sol. Energ.*, 137 (2015) 034501.
- [23] C.K. Hsieh, Thermal analysis of CPC collectors, *Sol. Energy*, 27 (1981) 19–29.
- [24] N.K. Bansal, R. Uhlemann, Development and testing of low cost solar energy collectors for heating air, *Sol. Energy*, 33 (1984) 197–208.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Instituto de  
Investigación en  
Ciencias  
Básicas y  
Aplicadas

## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 23 de mayo de 2019.

**DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS**  
**DR. ARMANDO HUICOHEA RODRÍGUEZ**  
**DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES**  
**DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE**  
**DRA. ARIANNA PARRALES BAHENA**  
**DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ**  
**DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ**  
**P R E S E N T E S**

Por este conducto me permito comunicarles que han sido designados miembros del COMITÉ REVISOR de la TESIS titulada “**Desarrollo experimental y modelado empírico del colector solar parabólico de bajo costo**” que presenta el alumno **EDGAR CARDOSO HERRERA**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS** con opción terminal en **TECNOLOGÍA QUÍMICA**.

**Se les recuerda que por reglamento se tiene un plazo de 20 días hábiles (a partir de la fecha de recepción del documento) para la revisión del manuscrito, por lo que le solicitamos no exceder el plazo señalado.**

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarles un cordial saludo.

Atentamente  
**Por una humanidad culta**  
*Una universidad de excelencia*



**DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO EN**  
**INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

RJRD\*RSU/nmc

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209  
Tel. (777) 329 70 00, ext. 6208 / raquel.sotelo@uaem.mx

Una universidad de excelencia

**UA  
EM**

RECTORÍA  
2017-2023



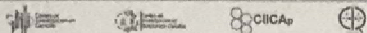


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS  
Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 23 de mayo de 2019.

**DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ**  
**COORDINADOR DE 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 **“Desarrollo experimental y modelado empírico del colector solar parabólico de bajo costo”** que presenta el alumno **EDGAR CARDOSO HERRERA**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS** con opción terminal en **TECNOLOGÍA QUÍMICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS	Aprobado	
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES	Aprobado	
DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE	Aprobado	
DRA. ARIANNA PARRALES BAHENA	Aprobado	
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ	APROBADO	
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.