

Construcción y pruebas preliminares de un prototipo experimental para evaluar la transferencia de calor en un tubo de sección transversal cuadrada en un intercambiador de calor

Construction and preliminary tests of an experimental prototype to evaluate heat transfer in a square cross-section tube in a heat exchanger

VALDIVIEZO-DE LOS SANTOS, Esteban†, SILVA-AGUILAR, Oscar, COLORADO-GARRIDO, Dario* y ALAFFITA-HERNANDEZ, F. Alejandro

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería. Av. Universidad km 7.5, C. P. 96535 Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos, Veracruz

Universidad Veracruzana, Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Av. Universidad km 7.5, Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos, Veracruz. C. P. 96535

ID 1^{er} Autor: Noel Esteban, Valdiviezo-De los Santos

ID 1^{er} Coautor: Oscar, Silva-Aguilar / ORC ID: 0000-0002-5109-3193, CVU CONACYT ID: 338659

ID 2^{do} Coautor: Dario, Colorado-Garrido / ORC ID: 0000-0003-4157-1005, Researcher ID Thomson: 56013715700

ID 3^{er} Coautor: F. Alejandro, Alaffita-Hernández / ORC ID: 0000-0002-9462-0160, Researcher ID Thomson: 57103583500

DOI: 10.35429/JOES.2019.18.6.16.22

Recibido 09 Febrero, 2019; Aceptado 28 Marzo, 2019

Resumen

La aportación de esta investigación es determinar el cambio en el flujo de calor ocasionado por la torsión axial en un tubo de sección transversal cuadrada. El tubo estudiado es parte de un prototipo de intercambiador de calor diseñado y construido por el grupo de investigación en "Ingeniería y simulación de procesos energéticos" de la Universidad Veracruzana, región Coatzacoalcos, Veracruz. El prototipo experimental se diseñó y construyó con tubería PVC y la sección de prueba con tubos de aluminio. El equipo transfiere calor desde 5 a 60 kJ de energía, con flujos volumétricos de agua de 3 a 20 l/min. El tubo sin torsión axial (0°) es comparado con otros tres tubos con 180°, 360° y 540° de torsión. Los resultados reportados en este estudio muestran las pruebas experimentales preliminares en donde se configuran cuatro niveles de flujo de agua, se utilizaron instrumentos de medición de flujo y temperatura. Los resultados muestran un incremento en la transferencia de calor en el equipo a medida que se aumenta el grado de torsión axial en los tubos de sección cuadrada.

Flujo de calor, Mejoras pasivas, Prototipo

Abstract

The contribution of this research is to determine the change in the heat flow by the axial torsion in a tube of square cross section. The tube studied is part of a prototype heat exchanger designed and built by the research group in "Engineering and simulation of energy processes" of the Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos region, Veracruz. The experimental prototype was designed and constructed with PVC pipe and the test section with aluminum tubes. The heat transfer of equipment was from 5 to 60 kJ with volumetric flows from 3 to 20 l/min and water as a working fluid. The tube without axial torsion (0°) is compared with three other tubes with 180°, 360° and 540° torsion. The experimental results reported in this study show the preliminary experimental tests where four levels of water flow are configured, using flow and temperature measurement instruments. The preliminary experimental results reveal an increase in the heat transfer in the equipment as the degree of axial torsion in the square section tubes is increased.

Heat flux, Passive improvements, Prototype

Citación: VALDIVIEZO-DE LOS SANTOS, Esteban, SILVA-AGUILAR, Oscar, COLORADO-GARRIDO, Dario y ALAFFITA-HERNANDEZ, F. Alejandro. Construcción y pruebas preliminares de un prototipo experimental para evaluar la transferencia de calor en un tubo de sección transversal cuadrada en un intercambiador de calor. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-18: 16-22

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: torlia@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer Autor

Introducción

El presente trabajo describe el diseño, construcción y pruebas preliminares de un prototipo experimental para cuantificar la transferencia de calor en tubos de sección transversal cuadrada en un intercambiador de calor. Los intercambiadores de calor son los sistemas térmicos más utilizados, se usan en procesos industriales, doméstico, comercial, procesos químicos, centrales eléctricas, etc. Diversos autores han reportado prototipos construidos para evaluar la transferencia de calor bajo diferentes características.

Al respecto, (Patiño et al. 2016) construyeron diversos prototipos, uno de estos utilizando tubos de PVC como tubería del sistema y cobre como su sección de prueba utilizados para un calentador solar de colector plano, usaron electroválvulas hidráulicas para el control de flujo. García et al. (2016) presentaron la construcción de un prototipo de cocina solar, el cual fue elaborado de tubos internos con cubierta de aleación de nitrato de aluminio, con un recipiente de lámina de acero inoxidable de grado alimenticio.

Actualmente incrementar la transferencia de calor en un intercambiador de calor ha llevado a proponer diseños novedosos. Con dicho fin, las técnicas propuestas son las activas y las pasivas, se han hecho trabajos en donde se menciona los métodos antes mencionados. Ambas técnicas modifican el tratamiento del flujo(fluido), en el caso de “método activo” se requiere de una fuente de energía externa para aumentar la transferencia de calor, en casos específicos los sistemas trabajan a temperaturas altas o son expuestos a calor excesivo, esto puede afectar su funcionamiento y la vida útil (Alam y Kim; 2017). Para garantizar el rendimiento de los sistemas, estos son enfriados externamente para eliminar el exceso de calor, ya que se generan puntos calientes del sistema y de esta manera disipar el calor.

Por otro lado, la técnica de “método pasivo” no requiere de un suministro energía externa, este método es muy popular en las industrias debido a su diseño simple, más compacto y confiable (Dewan et al. 2004).

Los procesos industriales requieren de una nueva generación de equipos que tengan un mejor rendimiento y excluyan las desventajas de las construcciones utilizadas actualmente (Wang Q. et al; 2014). Valdez et al. (2019) presentan el estudio donde se evaluó el efecto de torsión en el tubo interno de un intercambiador de calor de doble tubo con fluidos monofásicos, los autores reportan un incremento en la transferencia de calor de hasta un 28.8%.

La modificación de la superficie junto con promotores de la turbulencia es de las grandes ventajas de este método, hay diferentes promotores de la turbulencia en forma de: aspereza artificial (Prasad. 2013, Prasad et al. 2015), interrupción del flujo (Muszynski T. and Koziel S.M. 2016), aletas (Alam Tabish y Man-Hoe Kim. 2017), cintas retorcidas (Promvong et al. 2007, Yadav. 2009), costillas (Hans et al. 2010), obstáculos (Akpınar y Koçyiğit. 2010, Bekele et al. 2014).

En el trabajo de Gupte y Date (1989) evaluaron de manera semi empíricamente los coeficientes de transferencia de calor por un flujo de remolino en un anillo, como consecuencia de estos diferentes promotores generan un incremento en la transferencia de calor. De igual forma se puede mejorar la transferencia de calor con un aumento del área de transferencia de calor usando una superficie extendida. Dewan et al. (2004) especifican como los métodos pasivos aportan una mejora en el aumento en la transferencia de calor respecto a los métodos activos.

En la presente investigación se diseñó, construyo y se realizaron pruebas preliminares de un intercambiador de calor de contacto indirecto. El sistema consta de las siguientes secciones:

1. Tanque de alimentación,
2. Arreglo de tuberías y bomba en paralelo para controlar el flujo volumétrico,
3. Sección de prueba y
4. Estanque.

En la sección de prueba se evalúa un tubo de sección transversal cuadrada de material aluminio y 1 m de longitud en posición horizontal. El prototipo está diseñado para evaluar diferentes geometrías de tubo. La presente investigación se organizó de acuerdo con lo siguiente:

En la sección 2 se describen los componentes del prototipo experimental y los materiales de construcción, en la sección 3 se presenta la selección de los instrumentos de medición de caudal y temperatura, en la sección 4 se describe el procedimiento de operación del prototipo; así como los resultados de las pruebas preliminares y finalmente las conclusiones.

Materiales y descripción del prototipo

En la Figura 1 se muestra el prototipo del intercambiador de calor, su estructura consta de tubería de PVC, conexiones Te, codos de 45°, 90°, tuercas unión y válvulas. Antes de iniciar las pruebas preliminares todas las uniones fueron verificadas de que no se tenga alguna fuga en el sistema.

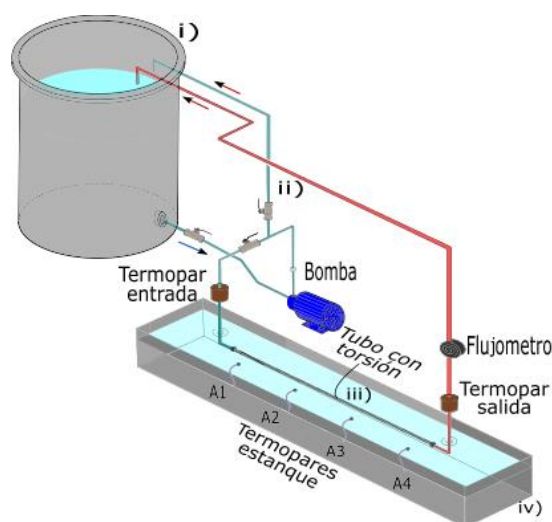


Figura 1 Diagrama esquemático del prototipo

Se utilizó una bomba ½ hp de potencia la cual se colocó a la salida del tanque. En la succión de la bomba, se tiene una válvula de bola la cual se mantiene abierta en todo momento y dos válvulas iguales se colocaron en la descarga de la bomba para tener control en la variación de flujo volumétrico. Las especificaciones se encuentran en la Tabla 1.

Material	Cantidad
Tubo ASTM D 1785 SCH 40, ½ pulgada PVC PR 600 @ 23°C	7 m
T ASTM D 1785 SCH 40, ½ pulgada PVC PR 600 @ 23°C	1
Codos de 90° ASTM D 1785 SCH 40, ½ pulgada PVC PR 600 @ 23°C	10
Codos de 45° ASTM D 1785 SCH 40, ½ pulgada PVC PR 600 @ 23°C	2
Válvulas PCP SCH 80 PVC 235 PSI @ 23°C	3
Bomba Adir periférica de ½ hp	1

Tabla 1 Material, accesorios y equipo utilizado en el prototipo

Se propuso una mejora pasiva a los tubos de sección cuadrada al aplicar en frío esfuerzos tangenciales superiores al límite elástico para obtener una torsión axial permanente Figura 2.

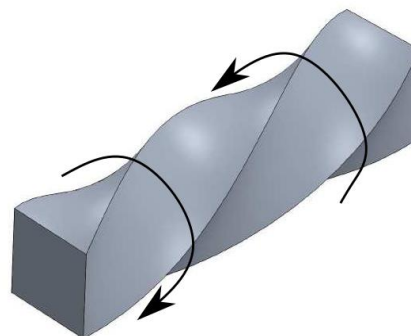


Figura 2 Torsión axial

En la sección de prueba de intercambio de calor la variación angular de la sección transversal entre los extremos fue de 0, 180, 360 y 540°. En los extremos se instalaron conectores cónicos de sello metal-metal, Figura 3.

Se hicieron pruebas de hermeticidad para verificar la ausencia de fisuras en tubos y fugas en las conexiones.



Figura 3 Tubos de aluminio

La Tabla 2 muestra las características y propiedades de los tubos de sección transversal cuadrada:

Tubo	
Material (composición)	Aluminio-magnesio-silicio
Longitud de arista exterior	12.7 mm
Espesor de pared	1 mm
Longitud del tubo	1m
Conductividad térmica	209 $\frac{W}{m \cdot K}$

Tabla 2 Características del tubo de prueba

VARIABLES DE OPERACIÓN E INSTRUMENTOS

Se colocaron 4 termopares en el estanque y 2 termopares uno a la entrada y otro a la salida de nuestra sección de prueba para tener indicadores de medida sobre el comportamiento del intercambiador de calor, los termopares utilizados son tipo T.

La Tabla 3 muestra los rangos a los que trabaja cada instrumento y los valores de incertidumbre.

Instrumento	Termopar T	Medidor de flujo
Cantidad	6	1
Rango de trabajo	-250 a 350 °C	1 a 60 l/min
Error	± 0.5 °C puntual	± 2% en escala completa

Tabla 3 Rango e incertidumbres de los instrumentos de medición

Se instaló un medidor de flujo en la salida de la sección de prueba en la **Figura 4** de marca Digiten FL-608 el cual su rango de trabajo es de 1-60 l/min.



Figura 4 Medidor de flujo

Se utilizó para la lectura de datos un Agilent 34972A ilustrado en la Figura 5, el adquirente tiene tarjetas con entradas análogas para poder conectar los termopares y el medidor de flujo.



Figura 5 Agilent 34972^a

Para la calibración de los instrumentos los termopares tipo T junto con el medidor de flujo se sometieron a pruebas de calibración, con ayuda del Agilent y el programa Agilent BenchLink Data Logger 3 el cual ayuda a indicar en cada canal que variable se conecta, en nuestro caso: temperatura y flujo másico.

Los termopares se calibraron mediante inmersión simultánea en un fluido a temperatura constante hasta obtener uniformidad en las mediciones de temperatura, con el medidor de flujo se contrastaron los resultados de la medición analógica, con los valores de caudal obtenidos en reiteradas mediciones experimentales.

$$\dot{V} = \frac{f}{5.5} \frac{l}{min} \quad (2)$$

La ecuación (2) rige al medidor de flujo de acuerdo con el fabricante, donde \dot{V} es el flujo volumétrico, f es frecuencia en Hz (el medidor sirve por medio del efecto Hall) y teniendo un factor de conversión propuesto por el fabricante. En la Figura 6 se le denomina válvula 1 (válvula para la sección de prueba) y válvula 2 (válvula para retorno). La variación de apertura de las válvulas permitió obtener diferentes flujos volumétricos y en consecuencia diferentes valores de Reynolds.

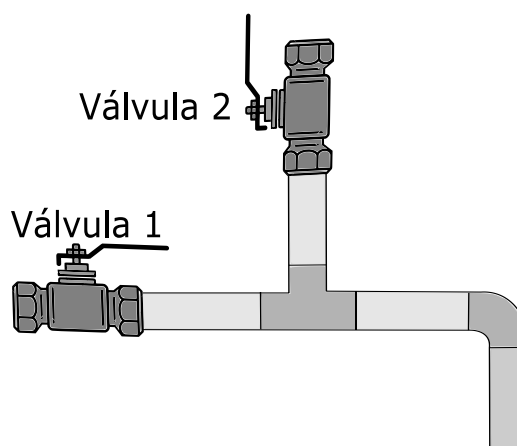


Figura 6 Válvulas a la salida de la bomba de la bomba extraída de la Figura 1

PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE Y PRUEBAS PRELIMINARIAS

El Agilent se conecta mediante un puerto USB a una computadora, con el programa Agilent BenchLink Data Logger 3 antes mencionado para obtener lecturas de los instrumentos de medición.

Para el arranque de las pruebas se sigue el siguiente procedimiento:

1. Primero se calentó el agua en el estanque, verificando que la temperatura sea lo más uniforme posible en todo el volumen, esto se verificaba con el programa Agilent BenchLink Data Logger 3. El objetivo de este primero paso es alcanzar un estado de estabilidad térmica en el estanque.
2. Se configura el equipo para los niveles de flujo volumétrico deseado, utilizando siguiente procedimiento:
 - a. La primera posición de las válvulas indica como parcialmente abierta la válvula 1 y totalmente abierta la válvula 2 para el primer nivel de flujo.
 - b. Para la segunda posición de las válvulas es totalmente abiertas ambas válvulas para el segundo nivel de flujo.
 - c. Para la tercera posición de las válvulas es totalmente abierta la válvula 1 y parcialmente abierta la válvula 2 para el tercer nivel de flujo.
 - d. Finalmente, se toma la posición totalmente abierta la válvula 1 y totalmente cerrada la válvula 2 para el máximo nivel de flujo posible.
3. La sección de prueba permite cambiar el tubo de sección cuadrada, se fue experimentando con cada tubo fabricado, para 3 niveles de torsión en tubo: 0° (tubo sin torsión), 180°, 360° y 540°.
4. El tiempo de experimentación y registro de datos para cada prueba es de 8 minutos, por cada nivel de flujo volumétrico.

El Gráfico 1 da como referencia el orden al que fue sometidas todas las pruebas, la cual va de forma ascendente, del flujo menor al flujo mayor de forma escalonada, de acuerdo con lo descrito en el paso 2.

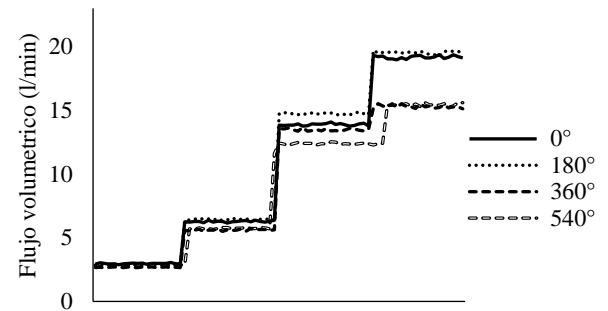


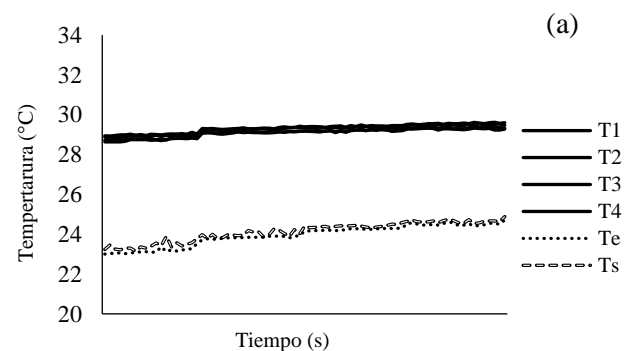
Gráfico 1 Flujo volumétrico utilizado para las pruebas preliminares

En el Gráfico 2 se muestra la temperatura registrada por los termopares, donde T1, T2, T3, T4 indicando a los termopares que están en el estanque, Te a la temperatura de entrada y Ts la temperatura de salida. El calor transmitido en las pruebas parte de la fórmula (3) la cual está indicando en la Gráfica 3.

$$\dot{Q} = \dot{V}\rho C_p \Delta T \quad (3)$$

Donde \dot{Q} es el flujo de calor en W, \dot{V} el flujo volumétrico en m^3 , ρ la densidad media del fluido en kg/m^3 , C_p el calor específico medio en $\text{J}/\text{kg K}$ y ΔT la diferencia de temperaturas en $^{\circ}\text{C}$, entre la entrada y salida del tubo evaluado.

Como se puede observar en la Gráfica 3, la transferencia de calor aumenta a medida que el caudal y los grados de torsión aumentan. Para una prueba, seleccionando un grado de torsión en el tubo, la transferencia de calor se aumenta a medida que el flujo volumétrico se aumenta usando la configuración de válvulas descritas en la sección 4 *Procedimiento de arranque y pruebas preliminares*.



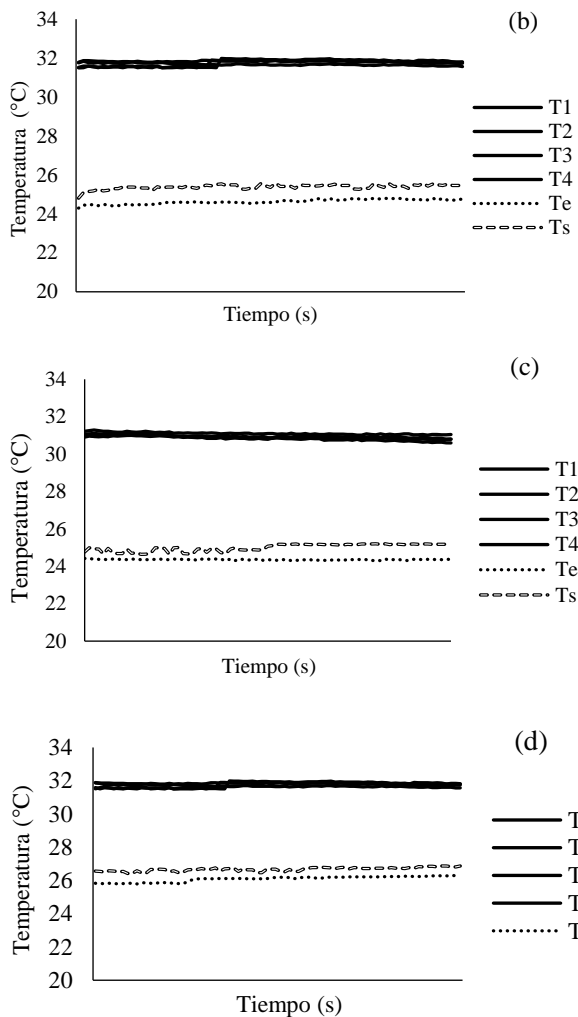


Gráfico 2 Variación de temperatura a caudal constante de tubos con torsión: (a) 0°, (b) 180°, (c) 360° y (d) 540°

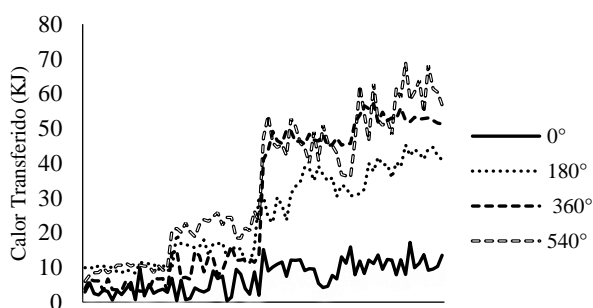


Gráfico 3 Calor transferido con variación de flujo volumétrico y torsión

Conclusiones

Un prototipo experimental para evaluar la transferencia de calor en tubos de Aluminio-magnesio-silicio de sección transversal cuadrada con diferentes niveles de torsión axial ha sido exitosamente diseñado, construido y evaluado preliminarmente.

Las pruebas preliminares reportadas en este trabajo revelan que existe un incremento en la transferencia de calor del tubo al estanque cuando usamos un tubo con torsión de 180°, 360° y 540° en comparación con un tubo sin torsión 0°. Además, la configuración de válvulas planificada en el diseño del prototipo nos permite trabajar con 4 niveles de flujo volumétrico, con la finalidad de medir su influencia en la transferencia de calor.

Las pruebas experimentales deben de prolongarse con la finalidad de que el sistema alcance un estado de estabilidad termodinámica, tanto en el estanque como en el flujo interior de la sección de prueba, con la finalidad de cuantificar en una mejor medida los resultados. El presente prototipo tiene la finalidad de ayudar a ingenieros, docentes y estudiantes a evaluar la transferencia de calor en secciones de prueba con tubos de diferentes geometrías.

Referencias

Akpinar EK, Koçyiğit F. Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Appl Energy* 2010; 87:34 38–50

Alam Tabish, Kim Man-Hoe* (2017) A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 2018; 813–839

Bekele A, Mishra M, Dutta S. Performance characteristics of solar air heater with surface mounted obstacles. *Energy Convers Manag* 2014; 85:603–11.

Dewan A, Mahanta P, Sumithra Raju K and Suresh Kumar P 2004 Review of passive heat transfer augmentation techniques. *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part A: J. Power and Energy*.

García-Carrera, Diana, Lupian-Ugalde, Valeria, Marroquin-De Jesus, Ángel y Hernández-Rivera, Jaime. Caracterización de una cocina solar dúplex de tubos evacuados. *Revista de Prototipos Tecnológicos* 2016; 6: 52-60.

Gupte, N. S. and Date, A. W. Friction and heat transfer characteristics of helical turbulent air flow in annuli. *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 1989, 111:337–344.

Hans VS, Saini RP, Saini JS. Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with multiple v-ribs. *Sol Energy* 2010; 84: 898–911.

Muszynski T., Koziel S.M., Parametric study of fluid flow and heat transfer over louvered fins of air heat pump evaporator, *Arch. Thermodyn.* (3) 2016; 37:45–62

Patiño-Jiménez, Felipe, Ramírez-Coutiño, Víctor y Lujan-Martínez, Miriam. Sistema de Destilación Solar para Agua Contaminada. *Revista de Prototipos Tecnológicos* 2016; 6: 76-81.

Prasad BN, Kumar A, Singh KDP. Optimization of thermo hydraulic performance in three sides artificially roughened solar air heaters. *Sol Energy* 2015; 111:313–9.

Prasad BN. Thermal performance of artificially roughened solar air heaters. *Sol Energy* 2013; 91:59–67.

Promvonge P, Khanoknaiyakarn C, Kwankaomeng S, Thianpong C. Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet. *Int Commun Heat Mass Transf* 2011; 38:749–56.

Promvonge P, Eiamsa-ard S. Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert. *Int Commun Heat Mass Transf* 2007; 34: 849–59.

Valdez M, Ardila JG, Colorado D, Escobedo-Trujillo BA, Computational model to evaluate the effect of passive techniques in tube-in-tube helical heat exchanger, *Energies* 2019, 12, 1912.

Wang Q., M. Zeng, T. Ma, X. Du, J. Yang, Recent development and application of several high-efficiency surface heat exchangers for energy conversion and utilization, *Appl. Energy* 2014; 135:748–777.

Yadav AS. Effect of half length twisted-tape turbulators on heat transfer and pressure drop characteristics inside a double pipe U-bend heat. *Jordan J Mech Ind Eng* 2009; 3:17–22.