

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA CORRELACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE COLECTORES SOLARES PLANOS

Ponce Rocha Jaime David (1), Martínez Rodríguez Guillermo (2)

1 [Programa de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jaimedp95@gmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [guimarod@ugto.mx]

Resumen

Un colector solar es un tipo de intercambiador de calor el cual transforma la energía radiante proveniente del sol en calor, el cual es transferido de una superficie de absorción hacia el fluido térmico. Una de las principales problemáticas es la presencia de flujos variables de energía, es decir la radiación solar. En este escrito se abordan de manera detallada casos particulares de operación y en base a ello se determina una correlación de transferencia de calor, la cual es de utilidad para obtener información del diseño térmico del equipo y a su vez brindar una aproximación teórica de la cantidad de calor removido por el fluido.

Abstract

Solar collectors belong to a class of heat exchangers which transform the radiant energy from the sun into heat, which is in turn transferred from one absorption surface to the heat remover fluid. One of the main problems that arises is that the energy fluxes varies in time. In this paper we discuss in detail specific cases of operation and, based on that, we determine a correlation of heat transfer, which is useful for information design. In turn, the correlation provides a theoretical approach.

Palabras Clave

Colector de placa plana; Coeficiente de transferencia de calor; Eficiencia experimental; Intercambiador de calor; Correlación.

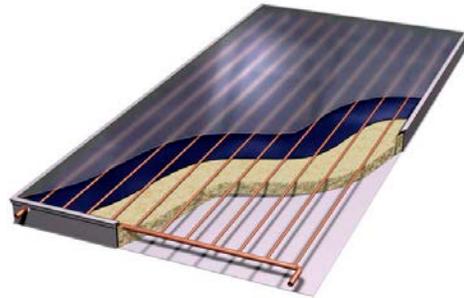
INTRODUCCIÓN

La incorporación de cualquier instalación termosolar debe sustentarse en un análisis que considere a la vez, los aspectos tecnológicos, medioambientales y económicos. El componente principal de una instalación de energía solar es el colector. En este elemento, también denominado

captador, tiene lugar la transferencia de calor al fluido térmico que circula dentro del colector. Uno de los principales parámetros de diseño es la determinación del coeficiente de transferencia de calor para el óptimo dimensionamiento. Por un lado, hay que evitar sobredimensionar el área del colector debido al alto costo inicial de las instalaciones solares. Por otra parte, si el área del colector es menor que la requerida, se consigue un ahorro de energía convencional tan reducido que la instalación solar no aporta los beneficios que se persiguen. Por todo ello resulta de vital importancia que los cálculos sean precisos, con objeto que la instalación proyectada cumpla con los requerimientos energéticos y económicos.

Colector solar de placa plana

Un colector solar es un tipo de intercambiador de calor donde el fluido de trabajo absorbe la energía de una superficie expuesta a la radiación solar. La temperatura de salida depende de la irradiancia total y de las pérdidas al ambiente, alcanzando temperaturas moderadas alrededor de 100 °C. Un colector solar de placa plana se compone de una placa metálica cuyo interior está aislado, una red de tubos por donde pasa el fluido calo-portador, una superficie absorbidora y una cubierta transparente generalmente, de vidrio o de algún material selectivo que reduzca las pérdidas de energía. El absorbedor está formado, por una lámina metálica, recubierto con: una fina película de pintura negra calórica, que resiste temperaturas de trabajo superiores a los 100 °C; o un tratamiento selectivo, basado en deposiciones electroquímicas o pinturas con óxidos metálicos que tienen una alta absorción de la radiación solar (onda corta) y una baja emisividad del calor (onda larga). En la IMAGEN 1 se muestran los componentes de un colector solar plano.



Coeficiente de transferencia de calor

El mecanismo de transferencia de calor por convección describe la transferencia de energía entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento debido a una diferencia de temperatura. La transferencia de calor por convección es un efecto de la combinación de conducción y fluido en movimiento. El tratamiento analítico del fenómeno de convección requiere la solución de un sistema de ecuaciones de conservación de masa, momento y energía para un cuerpo geométrico, así como las propiedades del fluido, el flujo y la temperatura del fluido; cuando las geometrías son complejas la solución analítica no es posible. La ley de enfriamiento de Newton, proporciona una alternativa simple como primera aproximación,

$$q = A h(T_s - T_f) \quad (1)$$

La ley de enfriamiento de Newton establece una relación algebraica entre el flujo de calor por convección (q), el área de la superficie (A), una diferencia de temperatura entre la superficie sólida (T_s) y el fluido (T_f) y el coeficiente de transferencia promedio de calor (h). En este contexto, el problema de convección se reduce a la estimación del coeficiente convectivo de calor.

El número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de la transferencia de calor desde una superficie en contacto el fluido térmico. El número de Nusselt está dado por

$$Nu = \frac{h L}{k} \quad (2)$$

Donde h es el coeficiente de transmisión de calor, L es una longitud característica y k es la conductividad térmica.

Existe una dependencia del proceso de transferencia de calor con el campo de velocidades y, por lo tanto, con el número de Reynolds. Las velocidades relativas de difusión de calor y de la cantidad de movimiento están relacionadas con el número de Prandtl. Ambos parámetros están relacionados por medio de una función exponencial generalizada de la forma

IMAGEN 3. Curva de rendimiento térmico

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (3)$$

- Estimación del coeficiente convectivo de calor

Una correlación empírica es una base de datos obtenidos de manera experimental más que de alguna teoría. La correlación empírica requiere sólo datos de confirmación con independencia del fundamento teórico, y en ciertas ocasiones, se manejan como aproximaciones a otras correlaciones existentes. Una ecuación empírica es simplemente una declaración matemática de una o más correlaciones empíricas, esta fórmula puede predecir resultados observados derivados de experimentos a partir de ciertos principios. La razón es que no siempre es posible tener soluciones analíticas y se tiene que recurrir a métodos experimentales que aumenten la comprensión física de los procesos de transferencia de calor.

Sieder y Tate propusieron una relación empírica para la transferencia de calor laminar en tubos [2].

$$Nu = 1.86 (Re Pr)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad (4)$$

Hausen presenta la relación empírica para flujo laminar completamente desarrollado en tubos cuyas paredes tienen temperatura constante [3].

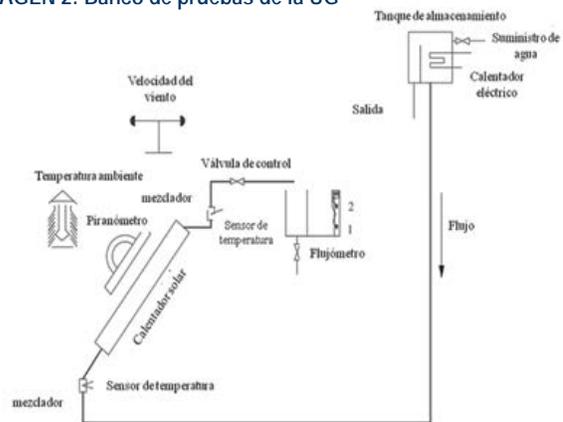
$$Nu = 0.116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3} \quad (5)$$

La idea de realizar una nueva correlación es con el fin de tener una exclusiva para estudiar el comportamiento térmico de los colectores solares planos, ya que para poder hacer el estudio hasta ahora se toman en cuenta correlaciones de tubos lisos bajo condiciones experimentales controladas. La correlación obtenida, exclusivamente para colectores solares planos, permitirá su posterior utilización para optimizar, integrar y diseñar los colectores solares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos (ensayos y mediciones) fueron proporcionados por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Guanajuato, que cuenta con una estación meteorológica y un banco de pruebas para realizar ensayos a estos dispositivos, localizado geográficamente en la ciudad de Guanajuato, a una latitud de 21°01'0"N, longitud 101°15'24"O, a una elevación media del nivel del mar de 2000 msnm, huso horario del centro, UTC-6 y en verano UTC-5. Un diagrama se muestra en la IMAGEN 2.

IMAGEN 2: Banco de pruebas de la UG



El procedimiento de ensayo general para determinar el rendimiento térmico de un colector se realiza en condiciones de régimen cuasi-

estacionario, según el método ASHRAE 93-2003 [4], donde necesariamente, las pruebas al aire libre, se llevan a cabo en las horas centrales del día en los días claros cuando la radiación directa es máxima y por lo general es casi perpendicular al colector. Además de la radiación solar, también se registran la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Por lo tanto, se obtiene información sobre el rendimiento térmico y las condiciones de operación. Estos datos permiten la caracterización térmica de un colector solar. La curva de eficiencia muestra la máxima eficiencia, el calor útil y el calor perdido (incluye pérdidas térmicas y pérdidas ópticas).

$$Q_u = A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (6)$$

La ecuación (6) describe el funcionamiento térmico de un colector operando en condiciones de estado estacionario, donde $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$ son los dos parámetros que describen cómo opera un colector solar. $F_R(\tau\alpha)$ indica la cantidad de energía que es absorbida (eficiencia óptica) y $F_R U_L$ indica la cantidad de energía que se pierde (coeficiente global de pérdidas de calor en $W/m^2 K$) y su valor puede ser obtenido experimentalmente. Estos dos parámetros constituyen un modelo térmico simple del colector solar.

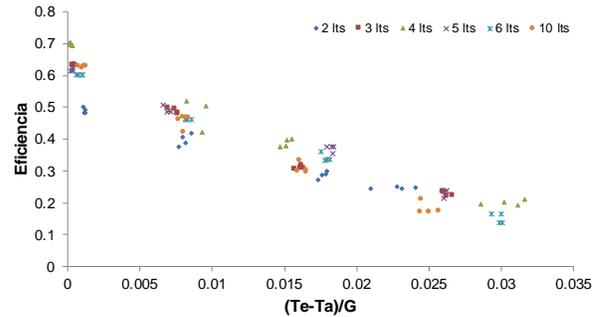
A partir de los datos obtenidos se hizo un análisis para realizar comparaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

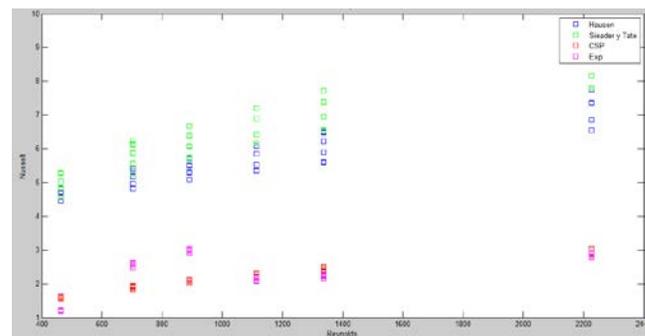
Las pruebas experimentales fueron realizadas a un colector solar de placa plana, con 6 tubos de cobre aletados de 1/2 pulgada, la cubierta de vidrio es común, la cubierta absorbidora está recubierta por pintura negra.

Entre las consideraciones que deben ser tomadas en cuenta están las condiciones de operación del colector, así como las características térmicas del mismo.

En la IMAGEN 3 se puede observar la curva de rendimiento térmico del colector solar que se presenta al variar el flujo del fluido, se obtuvieron 96 mediciones.



En la IMAGEN 4 se muestra la comparación de la determinación del Nusselt con la correlación empírica propuesta por: Sieder y Tate (verde), Hause (azul), la obtenida experimentalmente (fucsia) y la correlación determinada (rojo). Se observa que conforme aumenta el número de Reynolds el número de Nusselt también se incrementa, esta tendencia se observa con las correlaciones propuestas.



En la Tabla 1 se presenta un comparativo del cálculo del número de Nusselt obtenido a partir de diferentes correlaciones y también se muestra el error que presentan con respecto a los datos experimentales. El error que presentan las predicciones de Sieder & Tate y de Hausen es mayor a 100%. La correlación obtenida de manera experimental proporciona errores menores al 30% con respecto a los datos medidos.

CONCLUSIONES

A partir de datos experimentales se obtuvo una correlación para colectores solares planos, la cual

Tabla 1. Determinación del Número de Nusselt y el error en la predicción

Flujo másico (kg/s)	Numero de Reynolds	Número de Nusselt Experimental	Número de Nusselt Hausen	% Error de cálculo Hausen	Número de Nusselt Sieder & Tate	% Error de cálculo ST	Número de Nusselt CSP	% Error de cálculo CSP
0.0346	462.7374	1.1969	4.5867	283.2097	4.8412	304.4681	1.5853	32.4489
0.0346	462.7374	1.1757	4.4572	279.1146	4.5680	288.5428	1.5526	32.0585
0.0346	462.7374	1.2133	4.6853	286.1452	5.0361	315.0578	1.6079	32.5217
0.0346	462.7374	1.2320	4.8131	290.6676	5.2755	328.2001	1.6350	32.7077
0.0526	703.3496	2.4759	4.8088	94.2278	5.2677	112.7617	1.8318	26.0151
0.0526	703.3496	2.5160	4.9687	97.4850	5.5501	120.5941	1.8664	25.8161
0.0526	703.3496	2.5655	5.1678	101.4314	5.8801	129.1966	1.9056	25.7241
0.0526	703.3496	2.6135	5.3890	106.2017	6.2245	138.1711	1.9449	25.5805
0.0667	891.1607	2.9020	5.0788	75.0127	5.7353	97.6342	2.0145	30.5820
0.0667	891.1607	2.9543	5.2932	79.1721	6.0779	105.7339	2.0569	30.3750
0.0667	891.1607	3.0059	5.5031	83.0797	6.3947	112.7409	2.0948	30.3102
0.0667	891.1607	3.0457	5.6869	86.7217	6.6598	118.6647	2.1256	30.2102
0.0833	1113.9409	2.0742	5.3467	157.7662	6.1602	196.9860	2.1965	5.8958
0.0833	1113.9409	2.1013	5.5238	162.8711	6.4251	205.7608	2.2300	6.1224
0.0833	1113.9409	2.1509	5.8530	172.1186	6.8911	220.3822	2.2868	6.3176
0.0833	1113.9409	2.1814	6.0807	178.7529	7.1974	229.9478	2.3228	6.4822
0.1000	1336.7344	2.1390	5.6043	162.0015	6.5420	205.8352	2.3589	10.2779
0.1000	1336.7344	2.1788	5.8920	170.4190	6.9444	218.7203	2.4100	10.6103
0.1000	1336.7344	2.2258	6.2300	179.9000	7.3925	232.1294	2.4647	10.7361
0.1000	1336.7344	2.2571	6.4897	187.5175	7.7224	242.1327	2.5037	10.9237
0.1667	2227.8908	2.7762	6.5511	135.9736	7.7989	180.9201	2.8881	4.0318
0.1667	2227.8908	2.8140	6.8437	143.2016	8.1562	189.8418	2.9350	4.2984
0.1667	2227.8908	2.8842	7.3675	155.4447	8.7713	204.1191	3.0126	4.4536

nos brinda una buena aproximación comparada con los resultados experimentales. De igual manera se observó que el comportamiento de dicha correlación es parecido a las correlaciones publicadas para flujo laminar en un tubo liso; sin embargo, el valor obtenido del número de Nusselt difiere bastante como era de esperarse, ya que el fenómeno físico presenta particularidades, como lo es la superficie aletada.

A la Universidad de Guanajuato por seguir contribuyendo en mi formación profesional y personal, y por la beca proporcionada durante la realización de este trabajo. Al laboratorio de Energía Solar por las facilidades para desarrollar este proyecto.

REFERENCIAS

[1] Recuperado de <http://www.archiexpo.es/prod/thermorossi/product-886-306600.html>

AGRADECIMIENTOS

- [2] E. N. Sieder, y C. E. Tate. (1936). Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. Ind. Eng. Chem., vol. (28), pp. 1429, 1936.
- [3] H. Husen. (1943). Darstellung des Wärmeüberganges in Rohren durch verallgemeinerte Potenzbeziehungen. VDIZ, no. 4, pp. 91.
- [4] Duffie J. A. & Beckman W. A. (1991). Flat-Plate Collectors. Solar Engineering of Thermal Processes (pp. 236-319). USA: Wiley-Interscience Publication (Second Edition).
- [5] Holman J. P., (1999). Transferencia de calor (1ra edición) (pp 219-235). Mexico, DF: Compañía editorial continental S.A de C.V.