

Modelo numérico de un colector solar plano. Validación y análisis de los mecanismos de transferencia de calor

J.F. Cerón, J. Pérez-García, J.P. Solano, A. García, R. Herrero
Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.
Campus Muralla del Mar, 30202 Cartagena (España)
Teléfono: 626411223
Email: juan.ceron@upct.es

Resumen. *Se ha desarrollado y validado un modelo numérico global 3D que permite estudiar el funcionamiento de captadores solares térmicos destinados a la producción de agua caliente sanitaria. El modelo simula de forma acoplada los distintos mecanismos de transferencia de calor que tienen lugar en el interior del equipo: las pérdidas externas, la convección natural en la cavidad de aire, la conducción a través del conjunto tubo-absorbedor, así como la convección mixta en el interior de los conductos. Esta herramienta permitirá analizar la influencia sobre la curva de eficiencia térmica de posibles cambios en la operación o el diseño del colector, identificando aquéllos con mayor potencial.*

1. Introducción

Los colectores solares son un tipo de intercambiador en los que la energía solar se transfiere hacia un fluido calo-portador a través de diferentes mecanismos de transmisión de calor. El principal objetivo de este trabajo ha sido desarrollar y validar un modelo numérico capaz de simular de manera acoplada todos los procesos de transmisión de calor que tienen lugar en el interior de un captador solar plano.

Los mecanismos de transmisión de calor a tener en cuenta son:

- La absorción, transmisión y reflexión de la radiación solar incidente por parte de las diferentes superficies que componen el equipo, además del intercambio de energía radiante emitida tanto por el absorbedor, como por las superficies que lo rodean.
- El fenómeno de convección natural en el interior de la cavidad de aire delimitada por el absorbedor y la cubierta de vidrio. La diferencia de temperaturas entre ambas superficies produce un gradiente de densidades que da lugar al movimiento ascendente y descendente del fluido. Este problema ha sido estudiado por diferentes autores, tanto de forma experimental, [1], donde se investiga el efecto de la inclinación sobre la transferencia de calor en cavidades con elevada relación de aspecto; como de forma numérica, [2], donde se analizan diversos modelos de turbulencia RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes equations) apropiados para modelar flujos de convección natural en cavidades con elevada relación de aspecto.
- La convección mixta en el interior de los conductos. En conductos con bajos caudales

sometidos a un elevado flujo de calor, los efectos de flotación son significativos en comparación con los fenómenos de convección forzada [3].

Todos estos procesos conforman un problema complejo que ha sido abordado por diferentes autores desde el punto de vista de la CFD (Computational Fluid Dynamics). Por ejemplo, Selmi et al. [4], estudiaron mediante simulación numérica un captador solar plano, formado por un solo tubo, el absorbedor, la cubierta de vidrio y el espacio de aire entre ellas. El modelo aunque validado experimentalmente, no profundiza en los mecanismos de transmisión de calor que intervienen en el proceso. Otro ejemplo más reciente, es el de Martinopoulos et al. [5] donde validan un modelo numérico que simula un colector fabricado con un polímero en el que la energía es directamente absorbida por el fluido calo-portador.

2. Descripción del problema y modelo numérico

El modelo numérico desarrollado consiste en un colector solar plano formado por tres tubos por cuyo interior circula agua, como fluido calo-portador. Los tubos están soldados a una lámina de aluminio (absorbedor), y entre éste, y la cubierta de vidrio existe una cavidad de aire a presión atmosférica. Las paredes laterales de esta cavidad y la parte inferior de los tubos están recubiertas por un aislante térmico (Fig.1).

El dominio computacional consta de 3 regiones: la zona periférica (aislante), discretizada con una malla de elementos tetraédricos, no estructurada; una segunda zona, formada por el conjunto tubo-absorbedor, con una malla estructurada más densa en la región de entrada del fluido, y por último, una tercera zona, la cavidad de aire, con una malla estructurada no uniforme, refinando los contornos

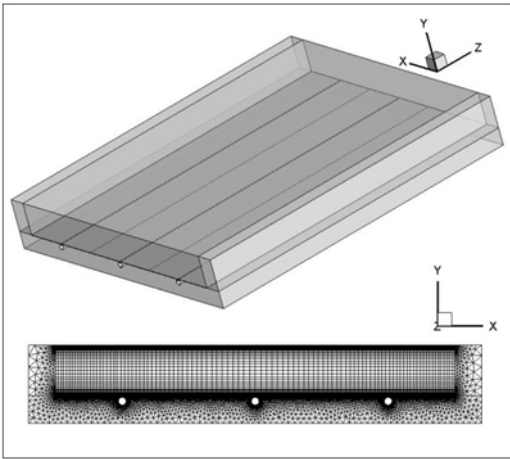


Figura 1: Geometría y malla del modelo.

para que la capa límite pueda ser resuelta adecuadamente, considerando que el flujo de convección natural es turbulento.

El problema ha sido resuelto mediante simulación numérica utilizando el código de propósito general FLUENT basado en el método de los volúmenes finitos. Las ecuaciones de conservación han sido discretizadas utilizando un esquema Upwind de 2º orden y el acoplamiento entre la presión y la velocidad en las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad ha sido resuelto con el algoritmo SIMPLE. Los modelos utilizados para resolver cada uno de los mecanismos de transmisión de calor han sido:

- Modelo de radiación: consta de dos partes, por un lado se utiliza la herramienta “Solar Ray Tracing” (SRT) para tener en cuenta la radiación solar introducida en el colector, y por otro el modelo “Surface to Surface” (S2S) para el intercambio de energía radiante emitida para las superficies que forman la cavidad de aire. El modelo SRT en función de las propiedades de transmisividad y absorptividad de las diferentes superficies irradiadas (grises), tanto opacas como semi-transparentes introduce una condición de generación de energía sobre ellas. Mientras que el modelo S2S, según los factores de forma y la emisividad de las superficies anteriores, tiene en cuenta la energía radiante que emiten.
- Convección natural en la cavidad de aire: los efectos de flotabilidad en el interior de la cavidad se tienen en cuenta mediante la aproximación de Boussinesq. Para modelar este flujo se ha utilizado el modelo de turbulencia RANS $k-\epsilon$ para bajos números de Reynolds, apropiado para flujos transicionales donde se resuelve la subcapa viscosa con una malla muy fina en los contornos.
- Convección mixta en los conductos: el efecto combinado de convección forzada en

régimen laminar, junto con la convección natural provocada por un gradiente de temperaturas acimutal da lugar a la aparición de recirculaciones en dirección circunferencial superpuestas sobre la componente axial de la velocidad. Para modelar este flujo, las propiedades del fluido se definen en función de la temperatura. Al tratarse de gastos máxicos que dan lugar a números de Reynolds bajos, se ha optado por inhibir los términos de producción de energía cinética turbulenta y viscosidad turbulenta del modelo de turbulencia para esta región del dominio computacional.

- Pérdidas al exterior: sobre la cubierta de vidrio, y para tener en cuenta las pérdidas por convección al ambiente, se ha utilizado una correlación experimental de convección forzada como condición de contorno. Se han considerado también las pérdidas por radiación fijando una emisividad externa. El resto de superficies permanecen a la temperatura ambiente.

3. Resultados

Previamente a validar el modelo del colector solar completo, se resolvió numéricamente el caso simple de flujo de calor en un tubo horizontal. El objetivo básico de estas simulaciones era validar la técnica de mallado elegida para el conducto y la metodología de procesado de resultados para el cálculo del número de Nusselt local Nu_z ¹. Para ello se han comparado los resultados numéricos obtenidos con correlaciones experimentales de de Petukhov y A. Polyakov [6].

En la Fig. 2 se han representado los resultados del número de Nusselt local frente a la distancia adimensional ($z^*=zL \cdot Re \cdot Pr$), para el caso simple y para el modelo completo. Como puede observarse, la concordancia de las simulaciones, para el caso del tubo con flujo de calor uniforme con respecto a las correlaciones experimentales para convección mixta en un único conducto es satisfactoria. En el caso del captador completo (tubo con absorbedor), cuando la capa límite térmica se ha desarrollado, el número de Nusselt es ligeramente superior. Esto coincide con lo expuesto por [3], donde se comprobaba cómo al añadir el absorbedor, este actúa como aleta, mejorando la transferencia de calor.

$$^1 Nu_z = \frac{q_p d}{k(T_p - T_f)}$$

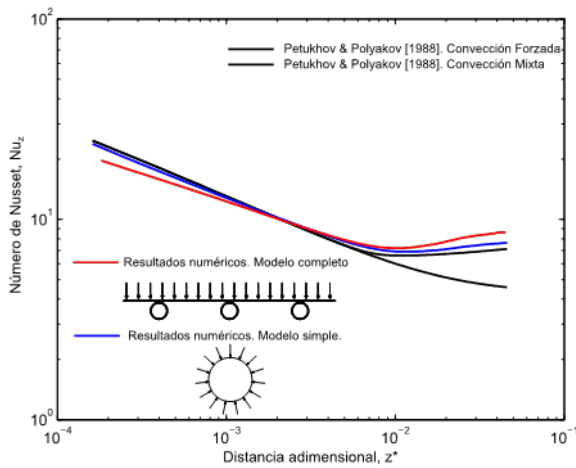


Figura 2: Número de Nusselt frente a la distancia adimensional. Modelo completo y simple.

En las simulaciones realizadas con el modelo global se ha fijado una radiación incidente de 1000 W/m^2 (800 de radiación directa y 200 de difusa). Los parámetros ópticos fijados en las superficies irradiadas (transmisividad, absorptividad y emisividad) coinciden con los del captador estudiado en el banco de ensayos experimental. La temperatura ambiente exterior permanece a 25°C y la velocidad del viento a 3 m/s .

Se han realizado simulaciones para un gasto másico de 0.04 kg/s y un rango de temperatura de entrada entre 20°C y 60°C . En la Fig. 3 se ha representado la eficiencia térmica global del equipo ($\eta = Q/(G \cdot A_A)$) frente a la temperatura reducida ($T^* = (T_{avg} - T_{amb})/G$). Donde G (W/m^2) es la radiación incidente, Q (W) es la energía aprovechada, A_A (m^2) es el área de apertura del captador y T_{avg} y T_{amb} son la temperatura media del fluido y la ambiente, respectivamente. Los resultados numéricos se han comparado con los obtenidos en el banco de ensayos experimental. Como se puede observar, existe un buen ajuste entre el factor óptico (ordenada en el origen) experimental y numérico. Este valor prácticamente solo depende del producto absorptancia-transmitancia, lo que sugiere que las condiciones de contorno para el modelo de radiación están bien fijadas. Por otra parte, para valores mayores de la temperatura reducida, los resultados difieren algo más de los datos experimentales. La causa de estas discrepancias puede estar en el modelo de turbulencia elegido para simular la convección natural en el interior de la cavidad, y también por las condiciones de contorno fijadas en las paredes externas del modelo.

4. Conclusiones

El modelo numérico desarrollado permite predecir la curva de eficiencia global del captador y es útil para evaluar el efecto de posibles mejoras futuras para incrementar la eficiencia. Además, la información disponible acerca de los mecanismos de transferencia de calor permitirá identificar aquellos aspectos con

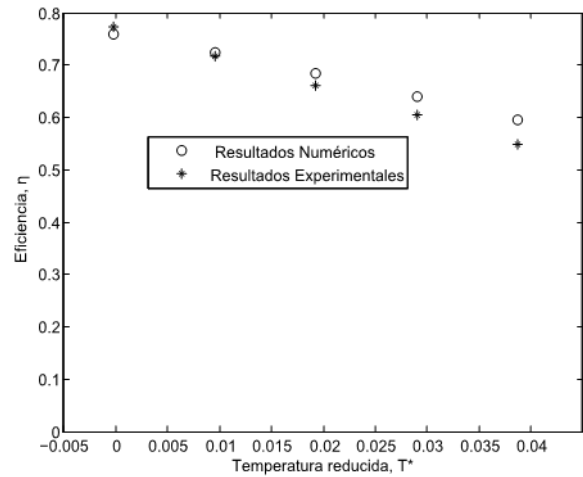


Figura 3: Eficiencia del modelo global. Comparación con resultados experimentales

mayor potencial de mejora, y se podrá utilizar para: obtener correlaciones del número de Nusselt en el interior de los conductos, profundizar en el patrón de flujo en el interior de la cavidad de aire o analizar el campo de temperaturas del absorbedor, de gran importancia en el rendimiento del equipo. El modelo numérico desarrollado puede continuar mejorándose utilizando modelos de turbulencia más sofisticados o revisando las condiciones de contorno utilizadas para modelar las pérdidas.

Referencias

- [1] D. Cooper, T. Craft, K. Estefi y H. Iacovides, "Experimental investigation of buoyant flows in inclined differentially heated cavities," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 6321-6339, 2012.
- [2] K. Hsieh y F. Lien, "Numerical modeling of buoyancy-driven turbulent flows in enclosures," *Heat and Fluid Flow*, pp. 659-670, 2004.
- [3] M. Ouzzane y N. Galanis, "Numerical Analysis of Mixed Convection in Inclined Tubes with External Longitudinal Fins," *Solar Energy*, 71 pp. 199-201, 2001.
- [4] M. Selmi, M. J. Al-Khawaja and A. Marafia, "Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector," *Renewable Energy*, pp. 383-387, 2008.
- [5] G. Martinopoulos, D. Missirlis, G. Tsilingiridis, K. Yakinthos y N. Kyriakis, "CFD modeling of a polymer solar collector," *Renewable Energy*, pp. 1-10, 2010.
- [6] B. Petukhov and A. Polyakov, *Heat Transfer in Turbulent Mixed Convection*, New York: Academic Press, 1988.