

INFLUENCIA DE LA CORRUGACIÓN EN TUBOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

CORCOLES TENDERO, Juan I.⁽¹⁾⁽²⁾; BELMONTE TOLEDO, Juan F.⁽¹⁾⁽²⁾; MOLINA NAVARRO, Antonio⁽¹⁾⁽²⁾; ALMENDROS-IBAÑEZ, José A.⁽¹⁾⁽²⁾

juanignacio.corcoles@uclm.es

⁽¹⁾ Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete

⁽²⁾ Instituto de Investigación en Energías Renovables, Sección de Solar y Eficiencia Energética, Albacete

RESUMEN

La mejora de la eficiencia de transferencia de calor es un aspecto fundamental en el diseño y manejo de los intercambiadores de calor. Este aspecto adquiere mayor relevancia en numerosas aplicaciones industriales que utilizan fluidos con viscosidad elevada, como el caso de aceites y fluidos de tipo alimentario, donde el coeficiente de transferencia de calor se reduce debido al predominio de flujo laminar [2]. En estas condiciones, se han desarrollado diversos métodos para mejorar el proceso de transferencia de calor, como es el caso de la corrugación de los tubos en intercambiadores de calor, aspecto que contribuye a la formación de un régimen de transición o turbulento, aumentando el coeficiente de transferencia de calor [3,5]. En consecuencia, los tubos corrugados permiten, en comparación con los equipos que utilizan tubos lisos, reducir el espacio físico destinado a cada uno de ellos.

En el presente trabajo se analiza el efecto de la corrugación sobre la transferencia de calor, así como la pérdida de carga en tubos de intercambiadores de calor. Para ello, se utilizarán herramientas de dinámica de fluidos computacional, analizando la influencia de distintos grados de corrugación sobre los parámetros indicados.

Palabras clave: intercambiador de calor, tubo corrugado, simulación numérica

1. Introducción

La mejora de la eficiencia de transferencia de calor es un aspecto fundamental en el diseño y manejo de los intercambiadores de calor, principalmente en aquellas aplicaciones industriales que utilizan fluidos con viscosidad elevada, tales como aceites y fluidos de tipo alimentario. En estos casos, debido al predominio de flujo laminar, la utilización de tubos lisos disminuye el proceso de transferencia de calor siendo necesario nuevos diseños de intercambiadores para mejorar su eficiencia de funcionamiento.

Diversos métodos se han desarrollado para la mejora del proceso de transferencia de calor, destacando la corrugación de los tubos en intercambiadores de calor, de reciente aplicación en los últimos años. Suriyan *et al.* [1] determinaron que los tubos corrugados contribuyen a la formación de un régimen de transición o turbulento, aspecto que mejora el coeficiente de transferencia de calor sin que suponga un aumento significativo en la caída de presión. Asimismo, los tubos corrugados permiten, en comparación con los equipos que utilizan tubos lisos, reducir el espacio físico destinado a cada uno de ellos.

Varios estudios han analizado el efecto del uso de tubos corrugados sobre la transferencia de calor y pérdida de presión, basados principalmente en ensayos experimentales. Rainieri y Pagliarini [2] analizaron el efecto de la corrugación transversal y helicoidal de tubos sobre el proceso de transferencia de calor para un número de Reynolds comprendido entre 90 y 800. Estos autores mostraron que se producía un movimiento en espiral del flujo en los tubos de tipo helicoidal pero sin mejora significativa en la transferencia de calor. Vicente *et al.* [3,4] realizando ensayos experimentales en régimen laminar, de transición y turbulento, para tubos corrugados en espiral, mostraron que el número de Nusselt se incrementaba en un 250% en régimen turbulento. Rozzi *et al.* [5] compararon el efecto de tubos lisos y corrugados utilizando fluidos no newtonianos en régimen laminar y de transición. Estos autores mostraron una mejora en el coeficiente de transferencia de calor de los tubos corrugados en el caso de flujo laminar, para un número de Reynolds superior a 800.

Como complemento al análisis experimental, las técnicas numéricas de simulación de flujo se plantean como una herramienta de utilidad para el estudio de la transferencia de calor en tubos de intercambiadores de calor, siendo considerada novedosa, con pocos estudios aplicados en el ámbito mencionado. Estas herramientas suponen un avance importante en la caracterización del comportamiento de un fluido, como herramienta adicional a la toma de datos experimentales, permitiendo una elaboración de resultados previo al diseño y puesta en marcha de estas instalaciones. En esta línea, cabe reseñar el trabajo desarrollado por Agra *et al.* [6], analizando tubos lisos, corrugados y helicoidales en régimen turbulento, con número de Reynolds comprendido entre 12000 y 54000. Estos autores mostraron que los tubos corrugados tenían mayor coeficiente de transferencia de calor que los tubos lisos, pero menor que los tubos helicoidales. Mohammed *et al.* [7] analizando tubos corrugados transversales, con número de Reynolds entre 5000 y 60000, obtuvieron el máximo número de Nusselt para la mayor profundidad de corrugación y la menor separación de corrugación.

En el presente trabajo se analiza el efecto de la corrugación sobre la transferencia de calor, así como la pérdida de carga en tubos de intercambiadores de calor. Para ello, se utilizarán herramientas de dinámica de fluidos computacional, analizando la influencia de distintos grados de corrugación sobre los parámetros indicados y utilizando distinto número de Reynolds para régimen laminar. Este trabajo pretende ser de utilidad para el diseño de intercambiadores de calor, con el fin de contrastar los principales resultados obtenidos con ensayos experimentales.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el efecto del corrugado, para flujo laminar, sobre el proceso de transferencia de calor y la pérdida de carga generada, en comparación con tubos lisos.

3. Método de trabajo

Las simulaciones numéricas realizadas en este trabajo se han llevado a cabo con Fluent 15.0 [8]. Se han analizado tres casos de tubos simples, dos de ellos con superficie corrugada de tipo transversal y uno de ellos con superficie lisa (Fig. 1). Todos los tubos analizados tienen una longitud de 40 m y un diámetro interno (D) de 10 mm (Tabla 1).

En el caso del tubo corrugado, se han establecido dos tipos de corrugación, ambas con una separación (S) entre corrugaciones de 15 mm y con profundidad de corrugación (P) de 1.6 mm y 1 mm, respectivamente. Para definir las características de la corrugación, se han definido tres parámetros adimensionales como los definidos por Vicente *et al.* [4], referidos a la profundidad de corrugación adimensional (P/D), la separación adimensional (S/D) o el índice de severidad ($\Theta = P^2/(S D)$). La geometría de corrugación se ha modelado como un elemento semitórico cuyo radio se corresponde con la profundidad de corrugación establecida.

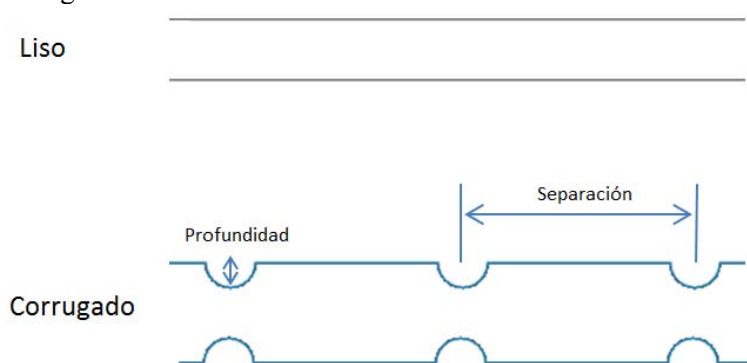


Figura 1: Geometría de los tubos

Tabla 1: Dimensiones de los tubos

Tubo	Longitud (m)	Diámetro (D, mm)	Separación (S, mm)	Profundidad (P, mm)	P/D	S/D	$\Theta \times 10^3$
Liso	40	10	-	-	-	-	-
Corrugado 1	40	10	15	1.6	0.16	1.5	17.07
Corrugado 2	40	10	15	1	0.10	1.5	6.67

En relación al proceso de simulación, en los tres casos de estudio se ha considerado un modelo estacionario en dos dimensiones. Asimismo, el campo de flujo se ha considerado de tipo axisimétrico respecto a un plano horizontal paralelo al eje de abscisas, considerando así que el fluido entra con velocidad uniforme en la dirección axial. En relación al proceso de mallado, se ha empleado un número aproximado de 160000 celdas para el tubo liso no corrugado y alrededor de 200000 para el caso de los tubos corrugados.

En todos los casos de estudio se ha utilizado como fluido de trabajo Therminol 66 (Tabla 2), un aceite sintético para transmisión de calor a altas temperaturas. Todas las simulaciones se han realizado bajo condiciones de régimen laminar, con valores del número de Reynolds comprendido entre 250 y 950. En relación al resto de condiciones de contorno, se ha considerado que el fluido entra al tubo con una temperatura de 100 °C, y con un flujo de calor constante (100 W/m²) en las paredes del tubo.

Tabla 2: Propiedades del Therminol a 100 °C

Densidad (ρ , kg m ⁻³)	955,95
Calor específico (p , J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	1836
Conductividad térmica (k , W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,1135
Viscosidad dinámica (μ , kg m ⁻¹ s ⁻¹)	0,0036

4. Resultados

En la Fig. 2 se representan los contornos de temperatura de los tubos analizados en una sección próxima a la salida del conducto, donde el perfil de temperatura se encuentra totalmente desarrollado. En cada uno de los casos analizados, el flujo se ha considerado térmicamente desarrollado cuando se alcanzaron distancias desde la entrada de 8 m (Re = 250), 16 m (Re = 530) y 27 m (Re = 927). En todos los casos de estudio, debido a la condición de flujo de calor constante en pared, la temperatura del fluido se incrementa a la salida del tubo en comparación con la temperatura inicial de entrada. Asimismo, para los tres números de Reynolds analizados, se observa como en el tubo liso se presentan las diferencias de temperatura más alta entre la superficie de la pared y la zona central del tubo. Para el caso de los tubos corrugados, la distribución de temperatura en la sección transversal del tubo es más homogénea en comparación con el tubo liso, con menores diferencias entre la temperatura en la zona de pared y la zona central.

En relación al número de Reynolds, en todos los tubos analizados, se observa como la mayor diferencia de temperaturas entre la zona de entrada y la zona próxima a la salida se alcanza para el número de Reynolds de 250, reduciéndose esas diferencias para el caso del Reynolds más elevado (927).

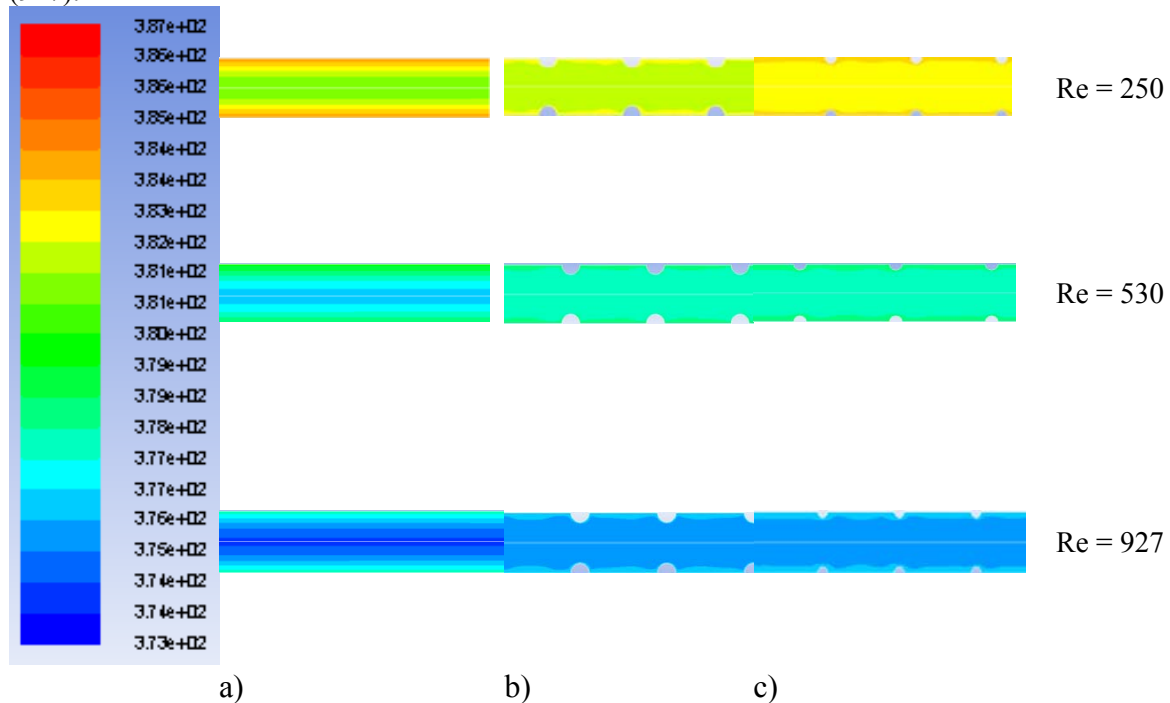


Figura 2: Contorno de temperatura (K) en zona próxima a la salida para el tubo liso (a), corrugado 1 (b) y corrugado 2 (c).

En las Figs. 3 a 5 se muestra la evolución del perfil de temperatura del fluido dependiendo de la posición a lo largo de la longitud del tubo. Para cada uno de los números de Reynolds analizados se observa una tendencia similar, con un perfil de temperatura parabólico para el caso del tubo liso no corrugado, característico del flujo laminar. Asimismo, la temperatura aumenta a lo largo de la longitud del tubo en todos los casos. Para los tubos corrugados, el perfil de temperatura es más plano que en el tubo liso, que es el típico perfil para flujo turbulento en tubos lisos. El efecto de la corrugación está relacionado con la formación de remolinos en el tubo corrugado, con el consiguiente aumento del proceso de mezcla del flujo.

Para cada uno de los números de Reynolds analizados, la temperatura media del fluido en la sección de salida no presenta diferencias entre los tubos lisos y corrugados, debido a que la condición de contorno en la pared es un flujo de calor constante. De hecho, un balance de energía global entre la entrada y la salida del tubo con una entrada de calor constante impone una temperatura media de salida fija, independientemente del tubo empleado.

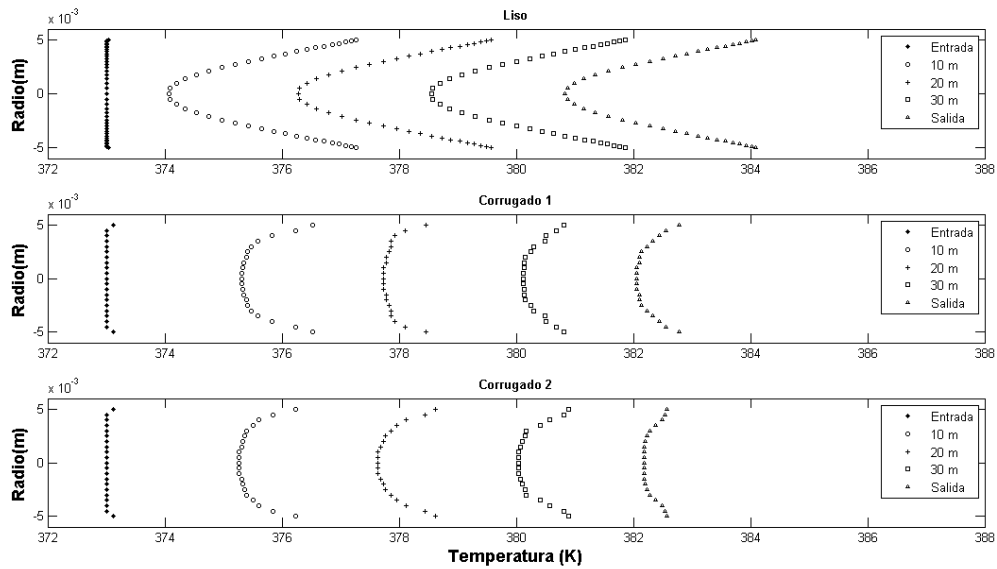


Figura. 3: Perfil de temperatura para Reynolds 250 según posición longitudinal en los tubos analizados

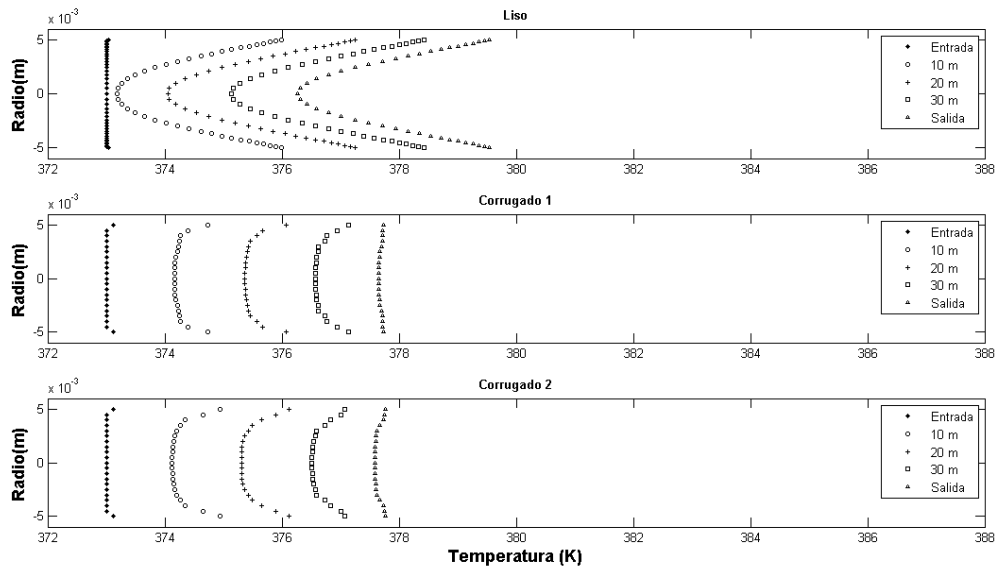


Figura. 4: Perfil de temperatura para Reynolds 530 según posición longitudinal en los tubos analizados

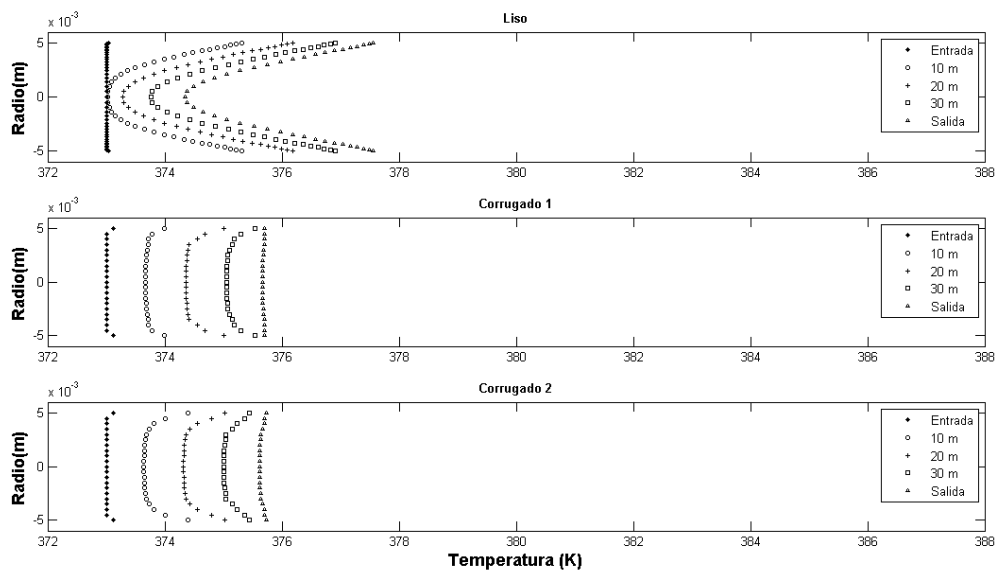


Figura. 5: Perfil de temperatura para Reynolds 927 según posición longitudinal en los tubos analizados

La pérdida de carga en los tubos analizados ha sido otro de los aspectos a tener en cuenta para analizar el efecto de la corrugación. En todos los casos, la pérdida de carga entre la sección de entrada y salida del tubo es menor para el tubo liso, siendo la más elevada para el caso del tubo corrugado tipo 1. Asimismo, las pérdidas de carga son mayores a medida que aumenta el número de Reynolds, alcanzando para $Re = 927$ valores comprendidos entre 16000 Pa (tubo liso) y 95000 Pa (corrugado 1). En relación al factor de fricción de Fanning (Fig. 6), para cada uno de los Re analizados éste parámetro muestra incrementos considerables (comprendidos entre un 250 % y 500 %) para el tubo con mayor

índice de severidad (corrugado tipo 1). Esta tendencia es similar a los resultados obtenidos por Vicente *et al.* [4], donde obtuvieron incrementos del factor de fricción menores (entre el 5 y 25 %), si bien el índice de severidad utilizado en el presente trabajo es mucho mayor que los empleados en el trabajo mencionado.

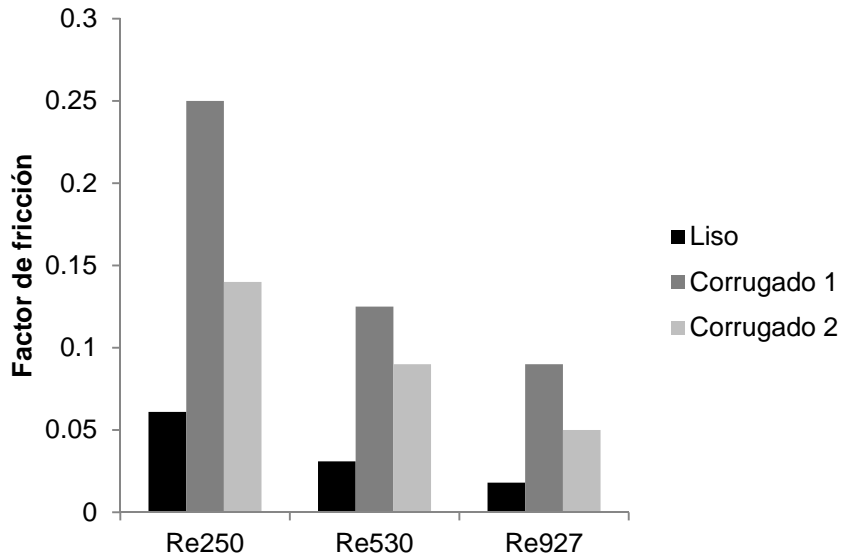


Figura. 6: Factor de fricción de Fanning para cada caso de estudio

En relación al coeficiente de transferencia de calor, en todos los casos analizados los tubos corrugados presentan valores más elevados que para el tubo liso. Este aspecto queda reflejado en la Fig. 7, con la representación del número de Nusselt en función del número de Reynolds. Para el caso del tubo liso, este parámetro se mantiene constante para los diferentes números de Reynolds analizados, con valores próximos a 4,36, que es valor teórico del número de Nusselt para una condición de flujo de calor constante [9]. En el caso de los tubos corrugados, el número de Nusselt aumenta conforme se incrementa el número de Reynolds, alcanzando los valores más elevados de este parámetro para el tubo con mayor profundidad de corrugación (corrugado 1), con valores comprendidos entre 63 y 314, para número de Reynolds 250 y 927, respectivamente.

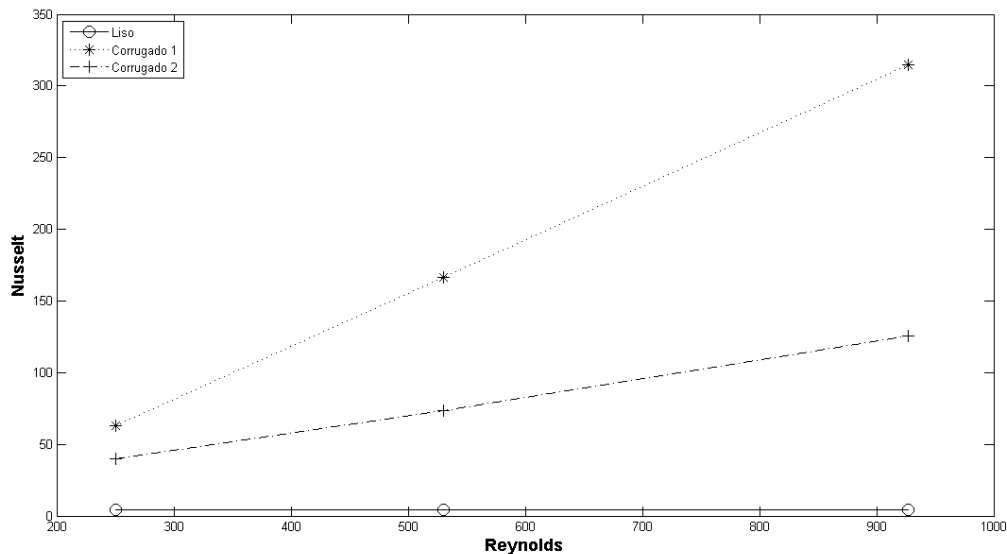


Figura. 7: Número de Nusselt para la sección de salida en cada caso de estudio

5. Conclusiones

En los diferentes casos analizados, el perfil de temperatura para una sección transversal del tubo es más plano para el caso de los tubos corrugados, aspecto relacionado con el incremento del proceso de mezcla del flujo y la formación de remolinos debido a la corrugación.

La pérdida de carga en los tubos corrugados se incrementa en comparación con los tubos lisos. A pesar de ello, cabe destacar que el número de Nusselt aumenta también con el proceso de corrugación, siendo este parámetro más elevado para el tubo con mayor profundidad de corrugado.

Las simulaciones realizadas en este trabajo son de utilidad para analizar el comportamiento del fluido en tubos con distinto grado de corrugación, como paso previo al diseño de intercambiadores de calor para mejorar el proceso de transferencia de calor.

Es necesario que los resultados obtenidos con este trabajo sean contrastados con medidas experimentales de los tubos indicados, con el fin de comparar el grado de idoneidad de los resultados a partir de medidas reales en laboratorio, y que pueda servir como base para nuevos diseños.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad de España por la financiación del proyecto “Planta piloto destinada a la caracterización de fluidos singulares en intercambiadores de calor de tubo corrugado” (UNCM13-1E-1832).

7. Referencias

- [1] SURIYAN, L., DALKILIC, A., WONGWISES, S. *Correlations for evaporation heat transfer coefficient and two-phase friction factor for R-134a flowing through horizontal corrugated tubes*. International Communications in Heat Mass Transfer, 2011, vol. 38, pp. 1406-1413.
- [2] RAINIERI, S., PAGLIARINI, G. *Convective heat transfers to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, vol. 45, pp. 4525-4536.
- [3] VICENTE, P.G., GARCIA, A., VIEDMA, A. *Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, vol. 47, pp. 671-681.
- [4] VICENTE, P.G., GARCIA, A., VIEDMA, A. *Mixed convection heat transfer and isothermal pressure drop in corrugated tubes for laminar and transition flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, vol. 31, pp. 651-662.
- [5] ROZZI, S., MASSINI, R., PACIELLO, G., PAGLIARINI, G., RAINIERI, S., TRIFIRÒ, A. *Heat treatment of fluids floods in a shell and tube heat exchanger: Comparison between smooth and helically corrugated wall tubes*. Journal of Food Engineering, 2007, vol. 79, pp. 249-254.
- [6] AGRA, Ö, DEMIR, H., ATAYILMAZ, Ş. Ö, KANTAS, F. DALKILIC, A.S. *Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in enhanced tubes*. International Communications in Heat Mass Transfer, 2011, vol. 38, pp. 1384-1391.
- [7] MOHAMMED, H.A., ABDALRAZZAQ, K.A., SHERIFF, J.M. *Influence of geometrical parameters and forced convective heat transfer in transversely corrugated circular tubes*. International Communications in Heat Mass Transfer, 2013, vol. 44, pp. 116-126.
- [8] ANSYS Fluent, Inc., 2014. USA.
- [9] SHAH, R.K., LONDON, A.L. *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*. 1978. 492 p (Ed. Academic Press).