

Computational simulation of laminar heat convection of nanofluids in a circular tube and squared duct

Diego Andrés Vasco-Calle ^a, Daming Chen ^b & Jorge Acevedo-Cabello ^c

^a Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile. diego.vascoc@usach.cl

^b Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile. daming.chen@usach.cl

^c Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile. jorge.acevedo.c@usach.cl

Received: March 30th, 2015. Received in revised form: October 1st, 2015. Accepted: January 30th, 2016.

Abstract

Nanofluids are colloidal suspensions of nanometer-sized particles (metals, metallic oxides or carbon nanotubes) in a base fluid (polar or non-polar). Nanofluids have interesting properties that make them useful especially in the design of compact heat transfer equipment. Laminar convective heat transfer of nanofluids (water, Al₂O₃) in a square and circular ducts has been studied numerically using the software ANSYS/FLUENT 12.1. Results for the Nusselt number, skin coefficient friction, temperature and velocity profiles are presented for four nanoparticle volume fractions ($\varphi = 0 - 20\%$) and Reynolds numbers (Re = 800, 1300 and 2000). For the studied Re numbers, Nu is decreased by 12% and 10%, when φ is increased from 0% to 10% and from 10% to 20%, respectively. Regard to the skin friction factor, the obtained value is increased around a 30% when φ is increased 10%.

Keywords: nanofluids; CFD; laminar-forced convection

Simulación computacional de convección de calor laminar de nanofluidos en tubo circular y ducto cuadrado

Resumen

Los nanofluidos son soluciones coloidales de partículas de tamaño nanométrico (metales, óxidos metálicos o nanotubos de carbono) en un fluido base (polar o apolar). Los nanofluidos poseen propiedades interesantes que los hacen útiles especialmente en el diseño de equipos de transferencia de calor más compactos. En el presente trabajo se estudia el proceso de convección laminar de un nanofluido (agua, Al₂O₃) al interior de un ducto cuadrado y un tubo circular mediante el software ANSYS/FLUENT 12.1. Se presentan resultados para el número de Nusselt, el factor de fricción, perfiles de temperatura y velocidad para cuatro concentraciones volumétricas de nanopartículas ($\varphi = 0 - 20\%$) y números de Reynolds (Re=800, 1300 y 2000). Para los Re estudiados, Nu disminuye un 12% y 10% cuando φ aumenta de 0% a 10% y de 10% a 20%, respectivamente. En el caso del coeficiente de fricción, el valor obtenido aumenta alrededor de un 30% cuando φ es aumentado un 10%.

Palabras clave: nanofluidos; CFD; convección forzada laminar

1. Introducción

Los nanofluidos son soluciones coloidales de partículas de tamaño nanométrico (metales, óxidos metálicos o nanotubos de carbono) en un fluido base como agua, etilenglicol, oleofinas y parafinas. Los nanofluidos poseen propiedades térmicas interesantes que los hacen útiles en varias aplicaciones de transferencia de calor, tales como enfriamiento de motores automotrices, refrigeración

doméstica, equipos HVAC, intercambiadores de calor y almacenamiento de energía térmica. Hoy, los estudios con nanofluidos se enfocan principalmente al diseño de intercambiadores más compactos y eficientes.

Existen principalmente dos técnicas para sintetizar nanofluidos; el método de dos pasos [1] y el método de un solo paso, descrito por Zhu et al. [2]. La dispersión de una pequeña cantidad de nanopartículas en un fluido base incrementa notablemente su conductividad térmica. Masuda

et al. [3] han demostrado que nanofluidos con nanopartículas de CuO y Al₂O₃ aumentan su conductividad térmica en un 20% y un 30%, respectivamente. Wu et al. [4], realizaron pruebas para verificar el aumento de la tasa de transferencia de calor en nanofluidos con varios tipos de nanopartículas (Cu, Al, C/Cu) en un material de cambio de fase (parafina). Los experimentos realizados arrojaron mejores resultados con nanopartículas de cobre (1 wt%), estabilizadas con en el fluido base mediante un dispersante. En esta investigación, se observó que los tiempos de calentamiento y enfriamiento son reducidos en un 30.3% y 28.2%, respectivamente.

La densidad efectiva y la capacidad calorífica efectiva de un nanofluido pueden calcularse mediante el principio físico de la regla de mezclado [5]. Sin embargo, no hay una teoría general para predecir la conductividad térmica de nanofluidos, la cual depende de las conductividades térmicas del fluido base y las nanopartículas, la concentración volumétrica, el área superficial y la forma de las nanopartículas [6]. Sin embargo, se han propuesto varias correlaciones empíricas para el cálculo la conductividad térmica aparente de mezclas bifásicas [7]. La información experimental para la viscosidad efectiva de nanofluidos es limitada [8, 9] cuando las propiedades reológicas de algunos fluidos son modificadas al adicionarse nanopartículas.

Las simulaciones numéricas de transferencia de calor con nanofluidos son realizadas mediante dos métodos [10]. El primer método considera que la suposición de un medio continuo es válida para fluidos con partículas nanométricas suspendidas [11]. La otra alternativa implementa un modelo bifásico para la descripción de las fases líquida y sólida [12].

En el presente trabajo se realiza una simulación computacional de flujo de calor convectivo en un ducto cuadrado y un tubo circular de un nanofluido (agua, Al₂O₃), considerado un medio continuo, mediante el software ANSYS/FLUENT 12.1. El modelo físico corresponde al montaje experimental estudiado por Zeinali Heris et al. [13], Wang y Mujumdar [10], considerando temperaturas diferentes para la pared (T = 10°C) y el fluido a la entrada (T = 0°C), intervalo de temperatura en el cual las propiedades del agua se suponen variables con la temperatura de acuerdo a las ecuaciones constitutivas propuestas por Zografos et al. [14]. Se analiza el efecto del número de Reynolds (Re = 800, 1300 y 2000) y la concentración de nanopartículas (0%, 5%, 10% y 20%) en el número de Nusselt, el coeficiente de fricción y la distribución de temperaturas a lo largo del ducto y el tubo.

2. Modelo físico y matemático

El modelo físico simulado computacionalmente corresponde a un plano longitudinal de un ducto de sección de cuadrada y un plano axisimétrico de un tubo circular del mismo diámetro hidráulico (D_H = 1 cm) y 1 m de longitud. Estas dimensiones corresponden al estudio experimental realizado por Zeinali Heris et al. [13], para el caso de transferencia de calor del mismo nanofluido estudiado en el presente trabajo, pero a un intervalo de concentraciones volumétricas más bajo (φ = 0% – 2.5%). Las paredes de la superficie del ducto se consideran isotérmicas y el agua

ingresa a una temperatura constante.

El cálculo del número de Reynolds está basado en el diámetro hidráulico, la velocidad de entrada y las propiedades del nanofluido obtenidas a la temperatura pelicular. El modelo matemático para el flujo, considerado incompresible y Newtoniano, está comprendido por las ecuaciones de continuidad, eq. (1), Navier-Stokes, eq. (2) y energía, eq. (3), complementado por condiciones de borde de primera clase para la temperatura en la pared y a la entrada, (T_w = 10°C) y (T_{in} = 0°C), respectivamente; y condiciones de no deslizamiento en las paredes del ducto (V_w = 0), además de condición de simetría en el plano medio y axisimetría en el caso del ducto circular.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla \mu_{nf} \nabla \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \rho_{nf} \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\nabla k_{nf} \nabla T + (\mathbf{v} \cdot \rho_{nf} c_{p,nf} \nabla) T = 0 \quad (3)$$

Las propiedades termofísicas del agua (viscosidad, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica) se consideran variables con la temperatura en el intervalo de 0°C a 10°C. Las ecuaciones constitutivas implementadas están disponibles en el estudio experimental realizado por Zografos et al. [14]. La viscosidad es descrita por el modelo:

$$\mu(T) = \frac{0.03828}{T - 253.33} \quad (4)$$

mientras la densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica son descritas por polinomios de tercer orden:

$$\rho(T) = 1022.4 - 0.1105T + 9.63 \times 10^{-4} T^2 - 3.011 \times 10^{-6} T^3 \quad (5)$$

$$k(T) = -0.633 + 0.0072T - 1.14 \times 10^{-5} T^2 + 4.24 \times 10^{-9} T^3 \quad (6)$$

$$C_p(T) = -3755.9 + 67.95T - 0.1915T^2 + 0.0001785T^3 \quad (7)$$

Las propiedades termofísicas del fluido base son modificadas por la adición de nanopartículas de Al₂O₃. La viscosidad es calculada a partir del modelo propuesto por Brinkman [15]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu(T)}{(1 - \varphi)^{2.51}} \quad (8)$$

la conductividad térmica del nanofluido es descrita mediante el modelo de Maxwell [16]:

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k(T) - 2\varphi(k(T) - k_s)}{k_s + 2k(T) + \varphi(k(T) - k_s)} k(T) \quad (9)$$

mientras la densidad y la capacidad calorífica se obtienen mediante las ecuaciones (10) y (11), respectivamente:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho(T) + \phi\rho_s \quad (10)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi\rho_s C_{p,s} + (1 - \phi)\rho(T)C_p(T)}{\phi\rho_s + (1 - \phi)\rho(T)} \quad (11)$$

donde las propiedades de las nanopartículas de Al₂O₃ están denotadas con el subíndice s y están dadas por:

$$\rho_s = 383.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; k_s = 400 \frac{\text{W}}{\text{mK}}; C_{p,s} = 8954.0 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (12)$$

La conductividad térmica y la capacitancia térmica del nanofluido en función de la concentración de nanopartículas y la temperatura están representadas esquemáticamente en las Figs 1 y 2, respectivamente. La conductividad térmica del fluido aumenta aproximadamente un 35% al aumentar en un 10% la concentración de nanopartículas.

La capacitancia térmica, definida como el producto de la densidad con la capacidad calorífica, disminuye al aumentar la concentración de nanopartículas (aproximadamente un 2%), lo que es explicado por la disminución de la capacidad calorífica producto de la adición de las nanopartículas de Al₂O₃.

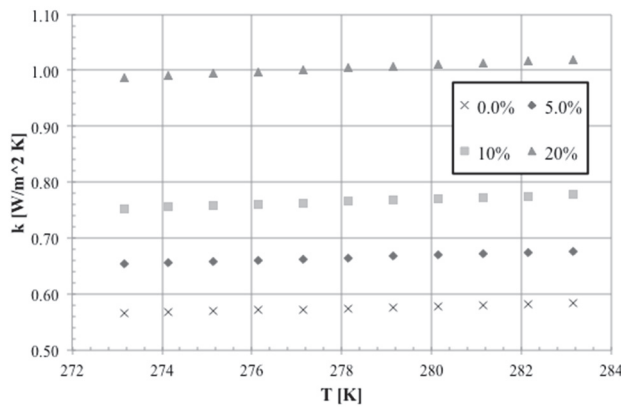


Figura 1. Conductividad térmica del nanofluido (agua y Al₂O₃) en función de la temperatura y concentración volumétrica de partículas como parámetros.

Fuente: Propia

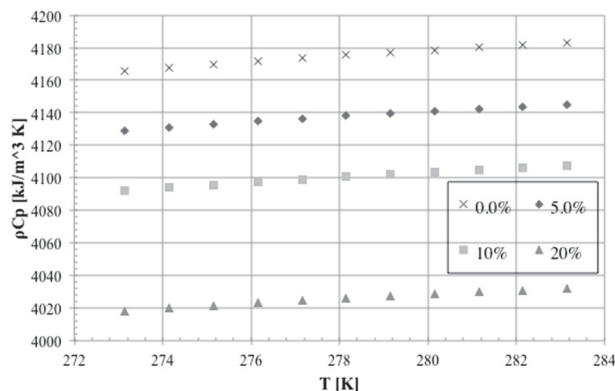


Figura 2. Capacitancia térmica del nanofluido (agua y Al₂O₃) en función de la temperatura y concentración volumétrica de partículas como parámetros.

Fuente: Propia.

3. Implementación computacional

Las simulaciones han sido realizadas mediante el software comercial basado en el método de los volúmenes finitos ANSYS/FLUENT 12.1. Todos los parámetros computacionales implementados son los disponibles por defecto en el software, excepto los criterios de convergencia para la velocidad (1×10^{-4}) y la temperatura (1×10^{-7}). Las mallas utilizadas en las simulaciones son estructuradas, de volúmenes finitos rectangulares, más concentrados cerca a las paredes isotérmicas del ducto.

3.1. Validación

La implementación del software, los modelos físicos y matemáticos son validados mediante comparación de los números de Nusselt obtenidos numéricamente con valores predichos usando el modelo empírico de Sieder y Tate [17].

$$\overline{Nu}_{nf} = 1.86 \left(Re_{nf} Pr_{nf} \frac{D_h}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{wnf}} \right)^{0.14} \quad (13)$$

donde el subíndice *nf* se refiere a propiedades evaluadas a la temperatura de entrada ($T=0^\circ\text{C}$), mientras que *wnf* se refiere a la viscosidad del nanofluido a la temperatura de la pared ($T=10^\circ\text{C}$). En la Tabla 1 se presentan los resultados de la validación, observándose porcentajes de error menores al 7%. De acuerdo a los menores porcentajes de errores obtenidos en la validación, se seleccionaron los números de Reynolds de 800, 1300 y 2000 para realizar las simulaciones respectivas.

3.2. Análisis del tamaño de malla

La selección del número de volúmenes de control apropiado para garantizar que los resultados son independientes del tamaño de la malla, se basa en el estudio especificado en la Tabla 2, donde los valores entre paréntesis representan los errores relativos al tamaño de malla anterior. De acuerdo a los errores relativos consecutivos entre los resultados obtenidos para el número de Nusselt y el coeficiente de fricción, se selecciona una malla con 256,000 volúmenes finitos para realizar todas las simulaciones.

Tabla 1.

Comparación de los números de Nusselt obtenidos numéricamente y calculado a partir del modelo de Sieder y Tate [17].

Pe ^{1/3}	Nu (numérico)	Nu (Sieder & Tate)	Error %
15	6.24	6.68	6.56
17	7.25	7.55	3.97
18	7.76	7.98	2.76
20	8.79	8.83	0.45
23	10.34	10.09	2.48

Fuente: Propia.

Tabla 2.

Estudio del tamaño de malla realizado para el caso con Re=2000 y $\phi = 10\%$.

Malla	Nu (Error %)	Cr (Error %)
160k	8.46	0.0006140
192k	8.64 (2.12)	0.0006692 (8.99)
256k	8.80 (1.93)	0.0007756 (15.90)
288k	8.85 (0.48)	0.0007915 (2.05)

Fuente: Propia.

4. Resultados y Análisis

En la situación física planteada, se estudia el efecto del número de Reynolds ($Re = 800, 1300, 2000$) y el efecto de la concentración volumétrica de las nanopartículas ($\phi = 0\%, 5\%, 10\%, 20\%$) en la transferencia de calor (número de Nusselt y perfiles de temperatura) y mecánica de fluidos (coeficientes de fricción). En las Figs. 3 y 4, se presentan los perfiles de temperatura obtenidos en varias posiciones a lo largo del ducto y el tubo, respectivamente, para cada concentración volumétrica de nanopartículas analizada y un número de Reynolds de 800. Las figuras se presentan solo la sección de los ductos donde se observa un mayor efecto de la concentración de nanopartículas y la posición longitudinal en la distribución de temperaturas. En ambas situaciones se observa como un aumento en la concentración de nanopartículas mejora la transferencia de calor entre las paredes del ducto y el nanofluido, lo que se evidencia en la tendencia del perfil de temperatura a un perfil parabólico desarrollado.

Otra característica común en las Figs 3 y 4 es el efecto más importante sobre la forma del perfil de temperaturas al aumentar la concentración de nanopartículas hasta una concentración del 20%.

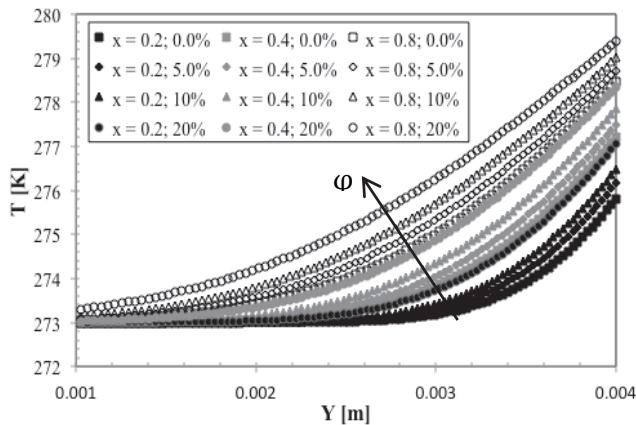


Figura 3. Perfil de temperatura para un flujo laminar ($Re=800$) a lo largo de un ducto de un nanofluido con diferentes concentraciones de nanopartículas ϕ . Fuente: Propia.

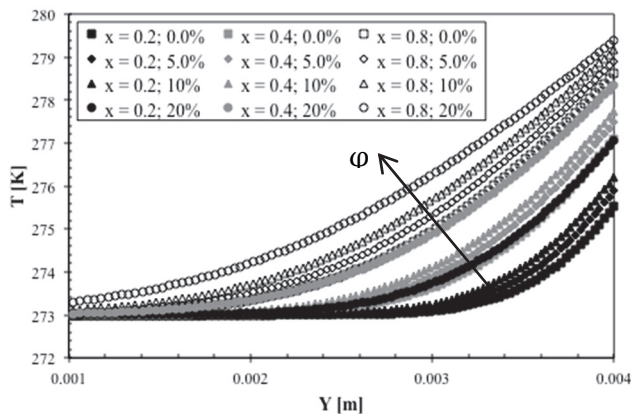


Figura 4. Perfil de temperatura para un flujo laminar ($Re=800$) a lo largo de un tubo de un nanofluido con diferentes concentraciones de nanopartículas ϕ . Fuente: Propia.

En las Figs. 5 y 6, se observan los perfiles de temperatura obtenidos en varias posiciones a lo largo del ducto, para cada concentración volumétrica de nanopartículas analizada y números de Reynolds de 1300 y 2000. Al aumentar el número de Reynolds aumenta la longitud (L_e) que le toma al flujo alcanzar la condición de fluido-dinámicamente desarrollado ($Re = 1300: L_e \approx 0.65m$ y $Re = 2000: L_e \approx 1.0m$). La condición de flujo térmicamente desarrollado se alcanza en una posición mayor. Por este motivo, el efecto de la concentración de nanopartículas en la distribución de temperaturas es menos evidente que para el caso estudiado de $Re=800$.

El número de Nusselt calculado numéricamente se relaciona el coeficiente convectivo y la conductividad térmica del nanofluido de acuerdo a la ecuación:

$$\overline{Nu}_{nf} = \frac{\bar{h}D_h}{k_{nf}} \quad (14)$$

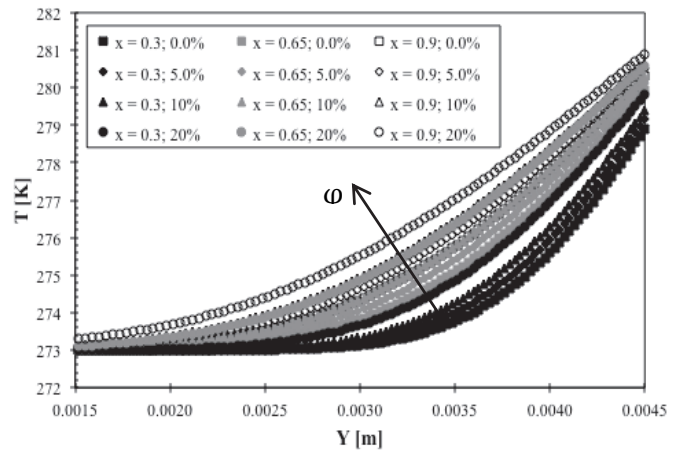


Figura 5. Perfil de temperatura para un flujo laminar ($Re=1300$) a lo largo de un ducto de un nanofluido con diferentes concentraciones de nanopartículas ϕ . Fuente: Propia.

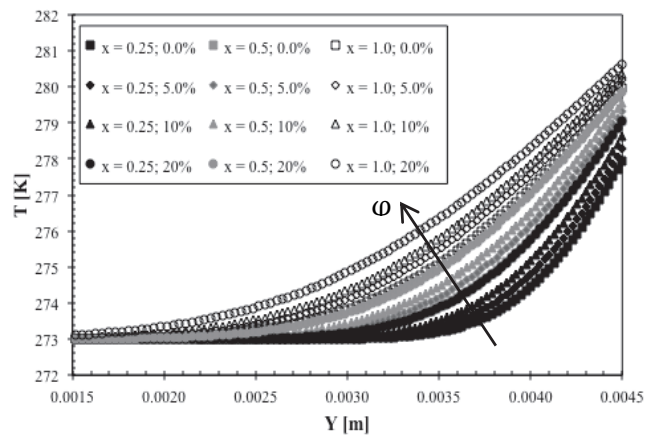


Figura 6. Perfil de temperatura para un flujo laminar ($Re=2000$) a lo largo de un ducto de un nanofluido con diferentes concentraciones de nanopartículas ϕ . Fuente: Propia.

En las Tablas 3 a 5, para cada número de Reynolds, se observa que el número de Nusselt disminuye alrededor del 12% y un 10% cuando la concentración de nanopartículas aumenta de 0% a 10% y de 10% a 20%, respectivamente. Esto se explica por la preponderancia que adquiere la conducción de calor por efecto del aumento de la conductividad térmica del fluido. Sin embargo, el efecto convectivo también aumenta, como lo muestran los valores obtenidos para el coeficiente de transferencia de calor, por efecto del aumento de la concentración de nanopartículas.

Para cada número de Reynolds analizado, un aumento de un 5% y un 10% en la concentración de nanopartículas implica un incremento del coeficiente convectivo de un 8.5% y 17.5%, respectivamente.

Respecto al coeficiente de fricción, los resultados reportados en las Tablas 3 a 5 muestran que existe un aumento diferenciado en cada caso cuando la concentración de nanopartículas aumenta un 10%. Para Re=800, un incremento de ϕ del 0% al 10% y del 10% al 20% implica un aumento del coeficiente de fricción, y por lo tanto del esfuerzo del corte en la pared, del 23% y el 35%, respectivamente. En los otros dos casos, Re=1300 y Re=2000, estos aumentos diferenciados son del 25% y 32% y del 20% y el 38%, respectivamente.

5. Conclusiones

En el presente trabajo fue analizado computacionalmente el efecto de la concentración de nanopartículas ($\phi = 0-20\%$) y el número de Reynolds (Re=800; 1300; 2000), en la transferencia de calor de un flujo laminar de un nanofluido (agua, Al₂O₃) al interior de un tubo y un ducto de sección cuadrada.

Tabla 3.
Número de Nusselt, coeficientes de transferencia y de fricción para Re=800. En paréntesis, los valores obtenidos para un tubo circular.

ϕ (%)	Nu	$\bar{h} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	C_f
0.0	7.08	407.13 (519.86)	0.00025391
0.5	6.65	442.52 (564.77)	0.00028400
10.0	6.23	477.10 (613.04)	0.00031358
20.0	5.60	562.25 (705.88)	0.00042573

Fuente: Propia.

Tabla 4.
Número de Nusselt, coeficientes de transferencia y de fricción para Re=1300. En paréntesis, los valores obtenidos para un tubo circular.

ϕ (%)	Nu	$\bar{h} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	C_f
0.0	8.55	491.67 (640.53)	0.00041709
0.5	8.04	535.01 (696.99)	0.00046550
10.0	7.56	578.96 (755.21)	0.00052115
20.0	6.75	677.72 (878.66)	0.00068729

Fuente: Propia.

Tabla 5.
Número de Nusselt, coeficientes de transferencia y de fricción para Re=2000.

ϕ (%)	Nu	$\bar{h} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	C_f
0.0	10.08	579.65	0.00064641
0.5	9.44	628.17	0.00071073
10.0	8.80	673.92	0.00077565
20.0	7.98	801.21	0.00107081

Fuente: Propia.

Para cada número de Reynolds estudiado se observa una disminución del número de Nusselt al aumentar la concentración de nanopartículas. Este resultado indica la importancia que adquiere la conducción de calor por efecto del aumento de la conductividad térmica del fluido.

Por efecto de la adición de nanopartículas, la convección también se incrementa. Para cada número de Reynolds analizado, un aumento de un 5% y un 10% en la concentración de nanopartículas implica un incremento del coeficiente convectivo de un 8.5% y 17.5%, respectivamente.

El coeficiente de fricción aumenta de forma diferencial cuando la concentración de nanopartículas aumenta un 10%. En el caso Re=800, un incremento de ϕ del 0% al 10% y del 10% al 20% implica un aumento del coeficiente de fricción del 23% y el 35%, respectivamente. Mientras para Re=1300 y Re=2000, estos aumentos diferenciados son del 25% y 32% y del 20% y el 38%, respectivamente. El coeficiente de fricción aumenta de forma diferencial cuando la concentración de nanopartículas aumenta un 10%. En el caso Re=800, un incremento de ϕ del 0% al 10% y del 10% al 20% implica un aumento del coeficiente de fricción del 23% y el 35%, respectivamente.

Agradecimientos

D.A. Vasco y D. Chen agradecen el apoyo suministrado por el proyecto FONDECYT 11130168.

D.A. Vasco y J. Acevedo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Santiago de Chile.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

Bibliografía

- [1] Teng, T.-P., Thermal conductivity and phase-change properties of aqueous alumina nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 67(1), pp. 369-375, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.12.004
- [2] Zhu, H.T., Lin, Y.S. and Yin, Y.S., A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), pp. 100-103, 2004. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.04.026
- [3] Masuda, H., Ebata, A. and Teramae, K., Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles. *Netsu Bussei*, 7(4), pp. 227-133, 1993.
- [4] Wu, S., Zhu, D., Zhang, X. and Huang, J., Preparation and melting / freezing characteristics of Cu / paraffin nanofluids as phase-change material (PCM). *Energy Fuels*, 24(17), pp. 1894-1898, 2010. DOI: 10.1021/ef9013967
- [5] Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R.A., Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(1-2), pp. 240-250, 2006. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009
- [6] Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., A review on nanofluids - Part II: Experiments and applications. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(4), pp. 631-648, 2008b. DOI: 10.1590/S0104-66322008000400002
- [7] Corsione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52(1), pp. 789-793, 2011. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.072
- [8] Abu-Nada, E., Masoud, Z. and Hijazi, A., Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*,

- 35(5), pp. 657-665, 2008. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.11.004
- [9] Xuan, Y. and Li, Q., Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), pp. 58-64, 2000. DOI: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3
- [10] Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., A review on nanofluids - Part I: theoretical and numerical investigations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(4), pp. 613-630, 2008a. DOI: 10.1590/S0104-66322008000400001
- [11] Khanafer, K. and Vafai, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19-20), pp. 4410-4428, 2011. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048
- [12] Murshed, S.M.S., Leong, K.C. and Yang, C., Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review. *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18), pp. 2109-2125, 2008. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.005
- [13] Zeinali-Heris, S., Nassan, T.H., Noie, S., Sardarabadi, H. and Sardarabadi, M., Laminar convective heat transfer of Al₂O₃ / water nanofluid through square cross-sectional duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 44(1), pp. 375-382, 2013. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.07.006
- [14] Zografos, A.I., Martin, W.A. and Sunderland, J., Equations of properties as a function of temperature for seven fluids. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 61(2), pp. 177-187, 1987. DOI: 10.1016/0045-7825(87)90003-X
- [15] Brinkman, H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), pp. 571-571, 1952. DOI: 10.1063/1.1700493
- [16] Maxwell, J., A treatise on electricity and magnetism. Third Edition. Oxford: Clarendon Press, 1891.
- [17] Sieder, E.N. and Tate, G.E., Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Industrial & Engineering Chemistry*, 12(28), pp. 1429-1435, 1936. DOI: 10.1021/ie50324a027

D.A. Vasco-Calle, recibió el título de Ing. Químico en 2004, el título de MSc. en Ciencias Químicas en 2007 y el grado de Dr. en Ingeniería de Procesos en 2013. Actualmente es profesor del área de termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile. Sus intereses en investigación incluyen: materiales de cambio de fase, nanofluidos, CFD y computación de alto rendimiento. ORCID: 0000-0001-7456-4683

D. Chen, recibió el título de Ing. y MSc. en Ingeniería Civil Mecánica en 2014. Actualmente es instructor de laboratorio y profesor de cátedra de en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile, Chile. Sus intereses en investigación incluyen: CFD, microfluidos y nanofluidos y modelamiento de materiales hiperelásticos en aplicaciones biológicas. ORCID: 0000-0001-9008-5412

J.L. Acevedo-Cabello, recibió el título de Ing. Civil en Mecánica en 2004 y el grado de Dr. en Ciencia e Ingeniería de los Materiales en 2013. Actualmente es profesor del área de sólidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile, Chile. Las líneas de investigación que actualmente desarrolla son: transferencia de calor con cambio de fase, optimización de procesos y vida útil de los materiales. ORCID: 0000-0003-0106-3794



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68