DOI: 10.21134/1cbyt110

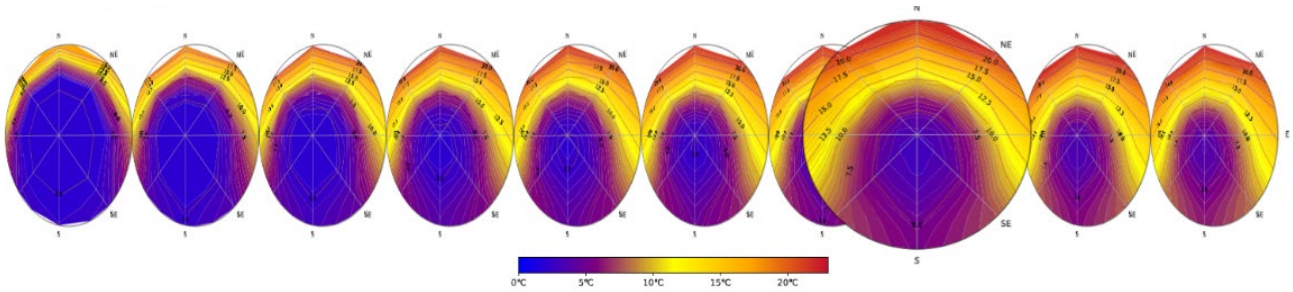
CYTEF XII Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frio
Universidad Miguel Hernández de Elche
26-06 28-06/2024
UNIVERSITAS Miguel Hernández

ANÁLISIS DEL FLUJO TÉRMICO EN TUBERÍAS CON ENFRIAMIENTO ASIMÉTRICO MEDIANTE *HEATT®*

Mariano Alarcón[1]*, Juan Pedro Luna-Abad[2] y Manuel Seco-Nicolás[1]

1: Grupo de Ingeniería para la Sostenibilidad. Dpto. de Electromagnetismo y Electrónica, Facultad de Química. Universidad de Murcia. 30100 Murcia.
e-mail: mariano@um.es
2: Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, ETSI Naval y Oceánica, Paseo Alfonso XIII 43. 30203 Cartagena.

Resumen: *Los flujos térmicos en condiciones de contorno asimétrico son frecuentes en todo tipo de conducciones en condiciones reales, dando lugar a distribuciones de temperaturas también asimétricas en el seno del fluido. Ejemplos de esto en instalaciones frigoríficas serían conducciones de frigorífero defectuosamente aisladas a temperaturas negativas, con producción de hielo en una de sus caras, etc. En el presente trabajo se estudia la distribución de temperaturas en el seno de tuberías de líquidos de uso en instalaciones frigoríficas (frigorígenos, frigoríferos u otros productos) sometidas a condiciones térmicas asimétricas en condiciones de flujo laminar. Estas condiciones pueden producirse en instalaciones frigoríficas típicamente en condiciones fuera de diseño, bien por aislamiento defectuoso, formación de hielo o suciedad en una de sus caras o exposición a fuentes de calor asimétricas, entre otras. Para ello se hace uso de la herramienta informática de libre uso HEATT®, basada en el Método de Simulación por Redes, que resuelve el problema del flujo en tres dimensiones y proporciona el mapa térmico en diferentes secciones de la tubería, lo que permite determinar la porción de tubería cuyas condiciones se alejan de las de operación, así como la temperatura media del fluido en cada sección; este tipo de información no es accesible con la consideración bidimensional.*



Palabras clave: calentamiento asimétrico, flujo laminar, defectos en instalaciones frigoríficas, HEATT, mapas térmicos.

1. INTRODUCCIÓN

En el actual contexto internacional de emergencia climática y su consiguiente transición energética, la eficiencia y optimización energética de las instalaciones se ha convertido en una tarea urgente, tal y como reflejan Directivas del Parlamento Europeo [1], [2]. Los mecanismos de convección forzada laminar en fluidos tienen lugar en tuberías, intercambiadores de calor y otros elementos de las instalaciones frigoríficas [3]. En ellas, los fluidos sufren típicamente cambios de temperatura súbitos al entrar en distintos equipos que componen la planta en funcionamiento ordinario o por avería. Un modelo clásico de estudio de este tipo de procesos es el llamado Problema de Graetz (GP) [4], [5], del que Seco-Nicolás et al. resolvieron utilizando el Método de Simulación por Redes una configuración del problema teniendo en cuenta en el modelo la propia tubería y conducción axial del calor en el fluido (Problema de Graetz Extendido Conjugado), así como asimetría radial de la condición de contorno de temperatura, lo que implica el modelado 3D y solución numérica [6]. Sobre la base del anterior modelo se ha construido la plataforma informática HEATT®, que corresponde al acrónimo "Herramienta de Evaluación y Análisis Térmico de Tuberías", abierta y gratuita, operativa desde 2022 [7], [8]. La plataforma permite el cálculo en línea de flujos de convección laminar forzada en el interior de tuberías sometidas a condiciones térmicas externas asimétricas. Esta aplicación pretende cerrar la brecha entre el software simple para cálculos de conductos y las plataformas computacionales potentes y costosas. En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento de diferentes fluidos en condiciones de frontera térmicamente asimétricas, que pueden producirse en instalaciones frigoríficas bien por aislamiento defectuoso, formación de hielo en una de sus caras, exposición a fuentes de calor asimétricas, etc.

2. MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO Y NUMÉRICO

Considérese un fluido isotrópico con flujo completamente desarrollado de perfil parabólico y velocidad media, u_m, que se consideran invariables (Fig. 1a), que entra en un conducto suficientemente largo, estando tubo y fluido a la temperatura T_1. En $z = 0$ la mitad superior de la superficie exterior del tubo aumenta/disminuye abruptamente a una temperatura constante T_2, mientras que su mitad inferior está aislada térmicamente (Fig. 1c); estas condiciones se mantienen a lo largo de todo el conducto ($z>0$). A lo largo del tubo el calor se transfiere radialmente desde la parte superior al fondo del tubo por conducción, mientras que el fluido recibe/cede calor por convección desde/al el tubo; la conducción también ocurre tanto en el tubo como en el fluido en dirección axial. Estas condiciones, salvo la asimetría radial, son muy similares a las descritas por el problema bidimensional planteado por Graetz. La condición de contorno asimétrica requiere un modelo tridimensional para evaluar correctamente el sistema [9]. Sea un fluido en régimen estacionario de convección laminar forzada y de propiedades térmicas (densidad, ρ_f, calor específico, c_f, y conductividad térmica, k_f, constantes en sus valores correspondientes a la temperatura media del fluido. No se ha considerado la generación de calor. Con respecto a las hipótesis de comportamiento del fluido, los efectos de flotabilidad son insignificantes cuando el fluido fluye en un régimen laminar de convección forzada [10]. Este régimen, siguiendo el mapa desarrollado por Metais y Eckert (1964), citado por Suryanarayana [10], se puede encontrar cuando el número de Reynolds, Re, tiene valores medios-bajos (1E+02<Re<1E+03 para tubos horizontales y 5E+02<Re<2E+03 para tubos verticales) y el número de Rayleigh, Ra, permanece bajo (Ra<1E+03); también se debe cumplir 0.01<Pr*D/L<1. El flujo laminar forzado de líquidos puede suceder en elementos y condiciones operativas de plantas de frío, como baterías, serpentines y otras tuberías de pequeño diámetro, en general, que operen a baja velocidad del fluido. El sistema considerado está compuesto por el fluido y una tubería de sección circular. El modelo físico-matemático deriva directamente de la aplicación de las ecuaciones básicas de conducción de calor en sólidos y fluidos en régimen estacionario [11], [12], utilizando coordenadas cilíndricas, en las que z es la dirección axial, r la radial y el ángulo azimutal φ la tercera dimensión (Fig. 1). El conjunto está formado por un tubo recto redondo e indeformable, de radio R y espesor e_p constante. Tanto fluido como tubería se consideran isotrópicos y con propiedades térmicas invariantes. En estas condiciones las ecuaciones tridimensionales globales que gobiernan el sistema acoplado son [13], [14]:

Ecuación del sólido (subíndice s):

$$\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(rk_s\frac{\partial T_s}{\partial r}\right)\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(k_s\frac{\partial T_s}{\partial \varphi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_s\frac{\partial T_s}{\partial z}\right)=0 \qquad (1)$$

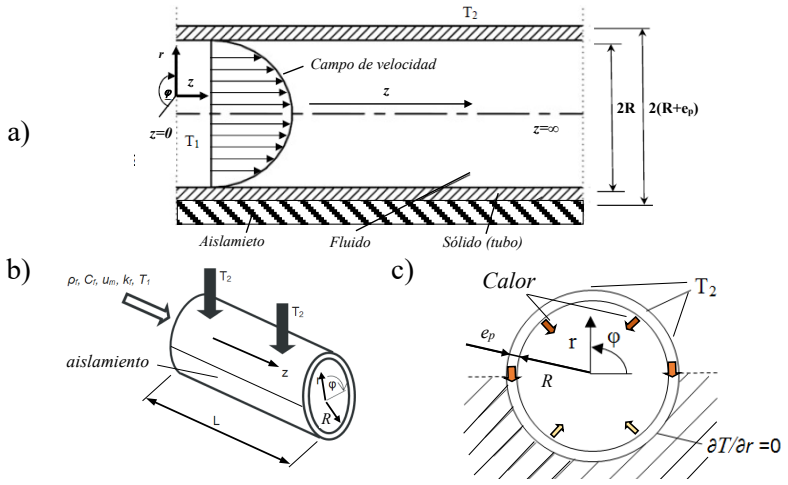


Fig. 1 Geometría del problema del conducto 3D; a) esquema del modelo de simulación; b) Sección transversal; c) Sección axial-transversal 2D α

Ecuación del fluido (subíndice f):

$$\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r k_f \frac{\partial T_f}{\partial r}\right)\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z}\right) = (\rho u_z c)_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \quad (2)$$

La principal diferencia entre (1) y (2) es el término del lado derecho, que en la segunda considera transferencia de calor en dirección axial dentro del fluido, característico del flujo laminar [13].

Condiciones de contorno dimensionales:

At $z = 0$, $r < R + e_p$ $\quad T_f = T_s = T_1$ (3)

At $z = +\infty$ $\quad \partial T_f/\partial r = \partial T_s/\partial r = 0$ (4)

At $r = R$ $\quad T_f = T_s$, $(k_s/k_f)\partial T_s/\partial r = \partial T_f/\partial r$ (5)

At $r = R + e_p$, $\varphi \in [0, \pi]$ $\quad T_s = T_2$ (6)

At $r = R + e_p$, $\varphi \in (\pi, 2\pi)$ $\quad \partial T_s/\partial r = 0$ (7)

La condición de contorno asimétrica consiste (6) en una temperatura exterior, T_2, que puede ser mayor o menor que la inicial del fluido, T_1, y actúa sobre la mitad superior del tubo, mientras que la mitad inferior (7) se encuentra térmicamente aislada. Esta situación puede darse en la práctica en instalaciones frigoríficas por deterioro del aislamiento en determinados tramos de tuberías, o formación asimétrica de suciedad o hielo, considerados idealmente como aislantes, debido a la proyección de aire sobre baterías desnudas a temperatura negativa, exposición a una fuente de calor u otras causas.

3. RESULTADOS

Se ha simulado el comportamiento de distintos fluidos en diferentes condiciones operativas que podrían tener en instalaciones frigoríficas o plantas de proceso: mezcla de etilenglicol-agua con concentraciones 40-60% en masa (EG-ag), salmuera de NaCl de 50 g/L (S), zumo de naranja (ZN) y leche (Le). Como es sabido, las mezclas EG-ag y las salmueras son utilizadas como frigorífero a bajas temperaturas (<0ºC), mientras que el ZN y la leche se han simulado en condiciones habituales en procesos.

La Tabla 1 contiene las propiedades térmicas de fluido y el resto de párametros utilizados en la simulación. Para los parámetros térmicos se ha tomado la media en el intervalo considerado. El fluido se encuentra inicialmente a una temperatura T_1, mientras que la tubería está sometida en su mitad superior a una temperatura exterior T_2 y aislada en la inferior. Se ha considerado tubería de Cu para el caso EG-ag y acero inoxidable para el resto de casos. La parte baja de la tabla contiene los números adimensionales que determinan el

cumplimiento de las condiciones para régimen laminar forzado expuestas en §2. En los casos del EG-ag y salmuera se ha supuesto entrada del fluido a la tubería a 260 K, mientras que en los alimentos se ha considerado 275 K, estando en todos los casos la temperatura exterior a 298 K.

Tabla 1. Propiedades y condiciones de simulación de los distintos fluidos

	EG-ag 40-60	Salmuera	Zumo naranja	Leche
Densidad, ρ (kg m^{-3})	1063,29	1045	1035	1031
Calor específico, c (J $kg^{-1}K^{-1}$)	3391,14	4130	3915	3892,98
Conductividad térmica, k_f ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0,403	0,595	0,58	0,569
Viscosidad dinámica, μ (Pa s)	1,00E-02	1,25E-03	1,88E-03	2,10E-03
Velocidad media, u (m s^{-1})	0,8	0,015	0,1	0,1
Temperatura inicial, T_1 (K)	260 K	260 K	275	275
Temperatura exterior, T_2 (K)	288 K	288 K	288	288
Material del tubo	Cu	A. Inox	A. Inox	A. Inox
Diámetro interior, D (m)	0,016	0,03	0,12	0,12
Espesor del tubo (mm)	1	2	2	2
Longitud del tubo, L (m)	5	5	5	5
Re (100 < Re < 2000)	1,36E+03	1,38E+02	6,62E+02	6,87E+02
Pr D/L (0,01 < Pr*D/L < 1)	0,2247	0,0159	0,0255	0,0335
Ra (Ra < 1000)	690,82	600,96	545,99	899,96

La Figura 2 recoge los mapas térmicos coloreados de las secciones transversales cada L/10 a lo largo de una tubería de 5 m en los distintos casos; se ha resaltado la sección a 4 m (8L/10). Los colores azules y liláceos indican las bajas temperaturas, mientras que los colores anaranjados y rojos indican altas temperaturas, pudiéndose apreciar la evolución de las temperaturas a lo largo de la tubería. Las secciones correspondientes a los distintos ángulos azimutales se designan con las letras de las coordenadas cardinales: N (norte) es el plano vertical superior, E (este) el horizontal y S (sur) el plano vertical inferior. La zona O-E (mitad superior) es la que se encuentra a la temperatura exterior T_2, mientras que la mitad inferior está térmicamente aislada.

En todos los casos a la entrada (sección L/10) prácticamente todo el fluido se encuentra a la temperatura inicial, salvo la parte más cercana a la pared superior del tubo (orientaciones N, NE y NO). A medida que avanza el fluido por la tubería las relativamente altas temperaturas exteriores tienden a ocupar mayor parte de la sección transversal. En este proceso tiene mucha importancia, además obviamente del salto térmico, tanto la conductividad térmica del fluido como el espesor del tubo, que transmite por conducción a la mitad inferior las altas temperaturas de la mitad superior. Como se puede ver al final del tubo una parte significativa del fluido queda a temperaturas muy superior a la inicial lo que afecta a la capacidad de transporte de calor o a las condiciones de proceso del propio fluido a enfriar.

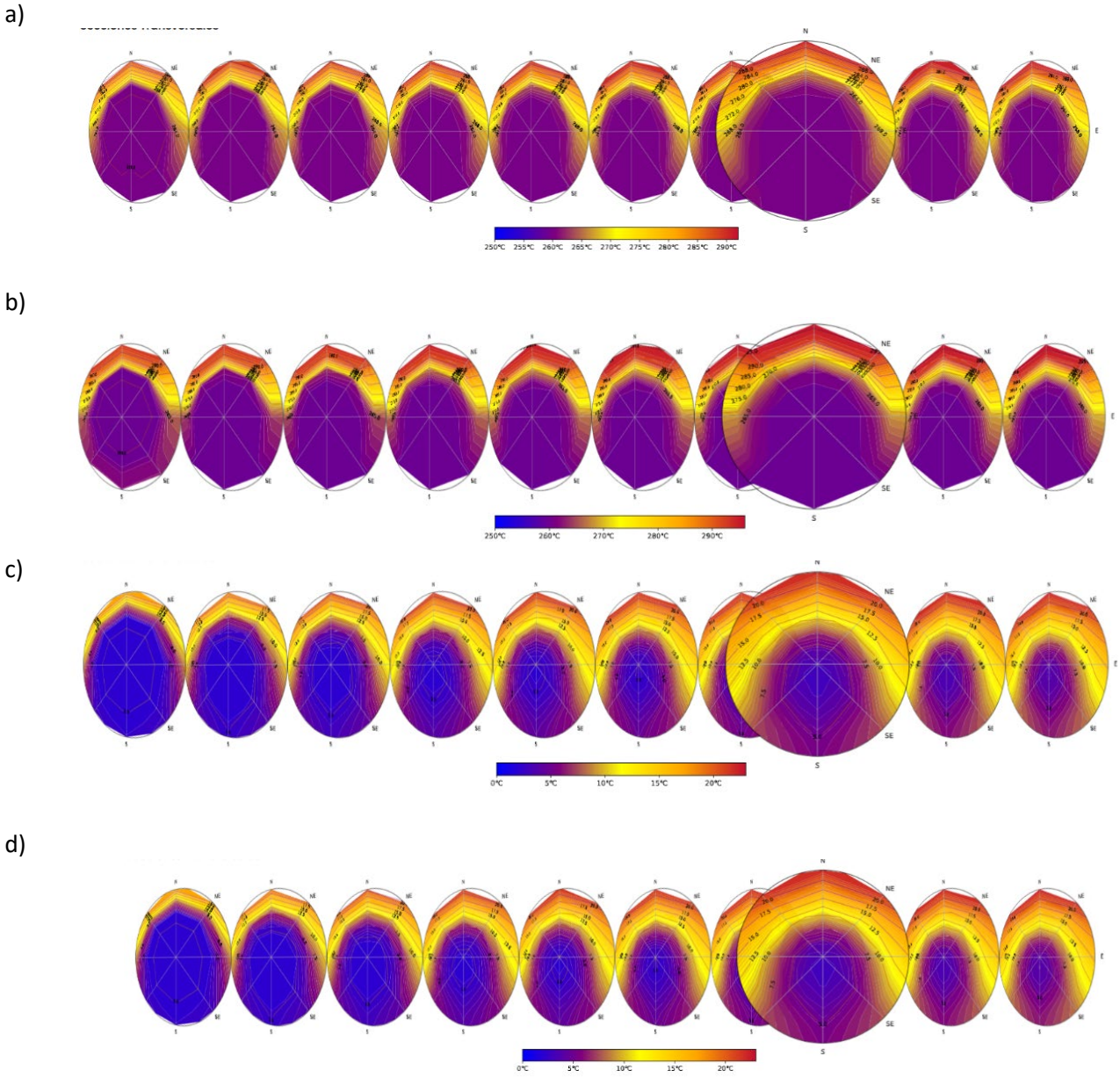


Figura 2. Mapas térmicos del fluido a lo largo de la tubería en procesos de calentamiento externo para distintos casos: a) EG-agua al 40%; b) Salmuera de NaCl (50 g/L); c) Zumo de naranja; d) Leche. Tubería de Cu en a y de acero inoxidable en los otros tres casos.

4. CONCLUSIONES

Por medio de la aplicación gratuita online HEATT se ha realizado la simulación del flujo laminar forzado térmicamente asimétrico en cuatro aplicaciones en instalaciones frigoríficas: dos fluidos frigoríferos, mezcla de etilen glicol-agua y salmuera, y dos alimentos, zumo de naranja y leche. Estas condiciones pueden ocurrir por deterioros en el aislamiento, suciedad u otras condiciones operativas. Dependiendo principalmente de la conductividad térmica del fluido y el espesor del tubo buena parte del fluido pierde su temperatura inicial a lo largo de la tubería, lo que implica pérdida real de la capacidad de transporte o condiciones reales de mantenimiento de la cadena de frío de los alimentos. La aplicación HEATT muestra así su capacidad para el análisis térmico de fluidos en condiciones de excitación térmica asimétrica, bien por fallos en las instalaciones o condiciones de operación.

REFERENCIAS

[1] The European Parliament and the Council of the European Union, *Directive (EU) 2018/2002 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency*. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 2018. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2018.328.01.0210.01.ENG

[2] Council of the European Union and the European Council, "European Green Deal. Fit for 55." [Online]. Available: https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/

[3] E. Torrella, *La producción de frío*, 2015th ed. Valencia (Spain): Editorial Universitat Politécnica de Valencia, 2015.

[4] Leo. Graetz, "Ueber die Wärmeleitungsfähigkeit von Flüssigkeiten," *Ann Phys*, vol. 254, pp. 79–94, 1882.

[5] Ş. Bilir, "Numerical solution of graetz problem with axial conduction," *Numeri Heat Transf A Appl*, vol. 21, no. 4, pp. 493–500, Jun. 1992, doi: 10.1080/10407789208944889.

[6] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón, and J. P. Luna-Abad, "3D numerical simulation of laminar forced-convection flow subjected to asymmetric thermal conditions. An application to solar thermal collectors," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 230–245, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.02.022.

[7] M. Alarcón, M. Seco-Nicolás, J. P. Luna-Abad, and A. P. Ramallo-González, "HEATT." [Online]. Available: https://heatt.inf.um.es/en/

[8] M. Alarcón, M. Seco Nicolás, J. P. Luna-Abad, and A. P. Ramallo-González, "Forced Laminar Flow in Pipes Subjected to Asymmetric External Conditions: The HEATT© Platform for Online Simulations.," in *Pipeline Engineering - Design, Failure, and Management*, S. Rushd, M. Ismail, and K. F. Adane, Eds., London (UK): IntechOpen, 2022, p. 20. doi: 10.5772/intechopen.107215.

[9] M. Seco-Nicolás, M. A. García, A. P. Ramallo González, and J. P. Luna-Abad, "HEATT©. A free software for thermal design of liquid flows inside pipes," *Results in Engineering*, p. 100983, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.100983.

[10] N. V. Suryanarayana, "Forced Convection - Internal Flows," in *The CRC Handbook of Thermal Engineering*, F. Kreith, Ed., Boca Ratón, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2000, pp. 3-47 3-55.

[11] Ş. Bılır, "Laminar flow heat transfer in pipes including two-dimensional wall and fluid axial conduction," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 38, no. 9, pp. 1619–1625, Jun. 1995, doi: 10.1016/0017-9310(94)00269-2.

[12] J. Zueco, F. Alhama, and C. F. González Fernández, "Analysis of laminar forced convection with Network Simulation in thermal entrance region of ducts," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, no. 5, pp. 443–451, May 2004, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2003.10.007.

[13] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6th. 2007. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022.

[14] Y.A. Çengel, *Heat and Mass Transfer*, Third ed. México: McGraw-Hill, 2007.