



**Efecto de la variación del flujo
volumétrico y la temperatura del
fluido de trabajo en un
intercambiador de calor de tubos
concéntricos**

**Maryork Leandro Castellar Jaimes
Aumerle De Jesús Bernate Izquierdo**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Puerto Colombia, Colombia

2023

Efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos

**Maryork Leandro Castellar Jaimes
Aumerle De Jesús Bernate Izquierdo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:

PhD. José Daniel Hernández Vásquez

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2022

*A Dios, por ser nuestra guía y luz en el camino.
A nuestros padres, por su amor, apoyo incondicional y sacrificios para hacernos crecer como personas. A nuestros queridos docentes de la Universidad Antonio Nariño, por su valiosa orientación y conocimientos compartidos. Y a todas aquellas personas que han contribuido al éxito de este proyecto, por su colaboración, confianza y motivación en nuestro camino.*

"La ingeniería mecánica es la disciplina que tiene como fin mejorar el bienestar de la humanidad. No hay nada más gratificante que aplicar la creatividad, el conocimiento y la innovación para crear soluciones a los desafíos del mundo actual". - Neil Armstrong, ingeniero aeroespacial.

Los autores.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a Dios por habernos dado la fuerza, el conocimiento y la guía necesarios para completar nuestra tesis. También queremos agradecer al Ing. José Daniel Hernández por su valiosa orientación, comentarios perspicaces y paciencia inquebrantable en la supervisión de nuestro trabajo. Agradecemos su experiencia y disposición para compartir su conocimiento y experiencia con nosotros.

Queremos reconocer a la excelente facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Antonio Nariño, sede Puerto Colombia, por habernos proporcionado un ambiente académico desafiante y estimulante que nos ha ayudado a crecer y desarrollarnos tanto personal como profesionalmente.

Finalmente, queremos agradecer a todas las personas que han contribuido al éxito de esta tesis. Su apoyo, consejo y aliento han sido invaluable para nosotros, y no habríamos podido completar este trabajo sin su ayuda.

Los autores

Resumen

Este TIG (Thesis, Internship, or Graduate Project) se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de investigación aprobado por la Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad Antonio Nariño. El proyecto titulado: “Efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos”.

propone investigar el efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos (TD360) para el banco de pruebas de laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia (UAN).

Para llevar a cabo esta investigación, se realizarán pruebas en el intercambiador de calor (TD360) del banco de pruebas de laboratorio de la UAN, en el que se variará tanto el flujo volumétrico como la temperatura del fluido de trabajo. Se medirán las temperaturas de entrada y salida del fluido y se calculará la transferencia de calor en función de los parámetros de entrada.

El objetivo final es determinar cómo afectan estos parámetros al rendimiento del intercambiador de calor (TD360) y cómo se pueden optimizar para mejorar su eficiencia en el banco de pruebas de laboratorio de la UAN. En particular, se analizarán los efectos del flujo volumétrico y la temperatura del fluido en la tasa de transferencia de calor, la eficiencia térmica y la caída de presión en el intercambiador de calor (TD360).

Una vez realizadas las pruebas y obtenidos los datos en el banco de pruebas de laboratorio de la UAN, se analizarán y se presentarán en un informe técnico que incluirá conclusiones y recomendaciones para optimizar el rendimiento del intercambiador de calor (TD360) en este ambiente específico de pruebas. Este anteproyecto tiene como objetivo contribuir al conocimiento en el campo de la transferencia de calor y puede tener aplicaciones prácticas en el ámbito académico y de investigación en la UAN.

Palabras clave: Intercambiador de calor, tubos concéntricos, flujo volumétrico, temperatura del fluido, eficiencia térmica, banco de pruebas, laboratorio, TD360, transferencia de calor, optimización.

Abstract

This TIG (Thesis, Internship, or Graduate Project) is part of a research project approved by the Vice-rectorate of Science, Technology, and Innovation of Antonio Nariño University. The project, titled "Effect of the variation of volumetric flow and working fluid temperature in a concentric tube heat exchanger", aims to investigate the effect of the variation of volumetric flow and working fluid temperature in a concentric tube heat exchanger (TD360) for the laboratory test bench at Antonio Nariño University, Puerto Colombia campus (UAN).

To carry out this research, tests will be performed on the heat exchanger (TD360) at the UAN laboratory test bench, in which both the volumetric flow and working fluid temperature will be varied. The temperatures of the fluid's inlet and outlet will be measured, and the heat transfer will be calculated based on the input parameters.

The goal is to determine how these parameters affect the performance of the heat exchanger (TD360) and how they can be optimized to improve its efficiency in the UAN laboratory test bench. In particular, the effects of volumetric flow and fluid temperature on the heat transfer rate, thermal efficiency, and pressure drop in the heat exchanger (TD360) will be analyzed.

Once the tests are conducted and data are obtained in the UAN laboratory test bench, they will be analyzed and presented in a technical report that includes conclusions and recommendations for optimizing the performance of the heat exchanger (TD360) in this specific test environment. This preliminary project aims to contribute to the knowledge in the field of heat transfer and may have practical applications in the academic and research fields at UAN.

Keywords: Heat exchanger, concentric tubes, volumetric flow, fluid temperature, thermal efficiency, test bench, laboratory, TD360, heat transfer, optimization.

Contenido

1. Introducción	11
1.1 Formulación del problema.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Justificación	13
2. Fundamentos de transferencia de calor	15
2.1 Conducción.....	15
2.1.1 Conductividad térmica	16
2.1.2 Difusividad térmica	19
2.1.3 Eficiencia térmica.....	21
2.2 Convección.....	22
2.2.1 Ley de enfriamiento de Newton.....	25
2.2.2 Coeficiente total de transferencia de calor.....	26
2.2.3 Número de Nusselt	31
2.2.4 Número de Reynolds	33
2.3 Radiación.....	34
3. Tipos de intercambiadores de calor.....	36
3.1 Ecuaciones	42
3.1.1 Temperatura media (T).....	43
3.1.2 Capacidad térmica (C).....	43
3.1.3 Capacidad calorífica específica a presión constante (cP).....	44
3.1.4 Densidad (ρ)	46
3.1.5 Transferencia de calor, balance de energía y eficiencias.....	48
3.1.6 Coeficiente de balance de energía (CEB).....	49
3.1.7 Eficiencia media de temperatura.....	49
3.1.8 Diferencia Logarítmica de Temperatura Media (LMTD)	51
3.1.9 Coeficiente de Transferencia de Calor (U).....	51
3.2 Variación del flujo volumétrico	52
3.3 Variación de la temperatura	54
4. Metodología experimental	58
5. Resultados y discusión	65

5.1	Efecto de la variación del flujo volumétrico	65
5.1.1	Análisis de la variación del flujo volumétrico en paralelo	67
5.1.2	Análisis de la variación del flujo volumétrico en contraflujo	70
5.2	Efecto de la variación de la temperatura	72
5.2.1	Análisis de la variación de la temperatura en paralelo	73
5.2.2	Análisis de la variación de la temperatura en contraflujo	75
5.3	Guías de laboratorios en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador	77
6.	Conclusiones y recomendaciones	79
	Bibliografía	82
	Anexo A: Efecto de la variación del flujo volumétrico	85
	Anexo B: Efecto de la variación de la temperatura	87
	Anexo C: Guía de Laboratorio del intercambiador de calor de tubos concéntricos	89
	Anexo D: Notación	99

Lista de figuras

Figura 1.4-1 Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A [11]	18
Figura 1.4-2 Variación de la conductividad térmica	21
Figura 1.5-1 Transferencia de calor de una superficie	23
Figura 1.5-2 Enfriamiento de un huevo caliente por convección forzada y convección natural [27].	24
Figura 1.5-3 Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo [16].	28
Figura 1.5-4 Las dos áreas superficiales de transferencia de calor asociadas con un intercambiador de calor de doble tubo (para tubos delgados, $D_i \approx D_o$ y, como consecuencia, $A_i \approx A_o$ [17].	29
Figura 1.6-1 La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica [28]	36
Figura 1.6-1 Diferentes regímenes de flujo y perfiles asociados de temperaturas en un intercambiador de calor de doble tubo [29].	38
Figura 1.6-2 Esquemático intercambiador de calor compacto de placas con junta [30].	39
Figura 1.6-3 Diferentes configuraciones de flujo en intercambiadores de calor de flujo cruzado [27].	40
Figura 1.6-4 Esquema de un intercambiador de calor de coraza y tubos (un paso por la coraza y un paso por los tubos) [31].	41
Figura 1.6-5 Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los intercambiadores de calor de coraza y tubos [32].	42
Figura 1.7-1 Capacidad calorífica específica del agua a presión constante [22].	46
Figura 1.7-2 Densidad del agua [23].	47
Figura 1.8-1 Gráficos simples de temperatura [24].	54
Figura 1.9-1 Gráficos simples de temperatura [24].	57
Figura 1.9-1 Modulo de servicio TD360 [33].	59
Figura 1.9-2 Intercambiador de calor de tubos concéntricos TD360a [24].	61
Figura 1.10-1 Variación flujo, paralelo.	69
Figura 1.10-2 Balance de energía y eficiencia en función del caudal de flujo (Flujo paralelo).	69
Figura 1.10-3 Variación flujo, contraflujo.	71
Figura 1.10-4 Balance de energía y eficiencia en función del caudal de flujo (Contraflujo).	71
Figura 1.11-1 Variación temperatura, paralelo.	74
Figura 1.11-2 Balance de energía y eficiencia en función de la temperatura (Flujo paralelo)	75
Figura 1.11-3 Variación temperatura, Contraflujo.	76
Figura 1.11-4 Balance de energía y eficiencia en función de la temperatura (Contraflujo).	77

Lista de tablas

Tabla 1.4-1	Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.	17
Tabla 1.4-2	Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.	19
Tabla 1.5-1	Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.	26
Tabla 1.6-1	Emisividades de algunos materiales a 300 K.	35
Tabla 1.7-1	Capacidad calorífica específica del agua a presión constante.	45
Tabla 1.7-2	Densidad del agua.	47
Tabla 1.8-1	Tabla de resultados en blanco 1.	53
Tabla 1.9-1	Tabla de resultados en blanco 2.	55
Tabla 1.9-1	Características técnicas TD360.	59
Tabla 1.9-2	Características técnicas TD360a.	61
Tabla 1.10-1	Datos experimentales 1.	66
Tabla 1.10-2	Datos experimentales 2.	67
Tabla 1.11-1	Datos experimentales 3.	72
Tabla 1.11-2	Datos experimentales 4.	73
Tabla 1.12-1	Resultados datos experimentales 1.	85
Tabla 1.12-2	Resultados datos experimentales 2.	86
Tabla 1.12-1	Resultados datos experimentales 3.	87
Tabla 1.12-2	Resultados datos experimentales 4.	88
Tabla 1.12-1	Notación.	99

1. Introducción

Los intercambiadores de calor son dispositivos esenciales en la industria para transferir calor entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas. Su correcto diseño y funcionamiento es fundamental para asegurar la eficiencia energética y la productividad de procesos térmicos en una amplia variedad de aplicaciones industriales. En este sentido, el estudio del efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en intercambiadores de calor es un tema de gran interés en la ingeniería térmica [1], [2].

Según estudios previos en la literatura, se ha demostrado que el rendimiento de los intercambiadores de calor de tubos concéntricos está directamente relacionado con el flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo. En particular, el flujo volumétrico influye en la tasa de transferencia de calor, mientras que la temperatura del fluido de trabajo afecta la diferencia de temperaturas entre los fluidos en contacto y, por lo tanto, la transferencia de calor total [1]

Por ejemplo, en un estudio realizado por Gu et al [3], se analizó el efecto de la velocidad del flujo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos en un sistema de enfriamiento de agua de mar. Los resultados mostraron que un aumento en la velocidad del flujo condujo a un mayor coeficiente de transferencia de calor. De manera similar, en un estudio de Cao et al [4], se examinó el efecto de la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos en una unidad de producción de amoníaco. Los autores encontraron que un incremento en la temperatura del fluido de trabajo mejoró la eficiencia de transferencia de calor del intercambiador.

En este contexto, el presente anteproyecto se enfoca en el estudio del efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos TD360, específicamente en el banco de pruebas de laboratorio de la Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia (UAN). Este estudio se llevará a cabo utilizando herramientas y técnicas de medición y análisis adecuadas con el objetivo de obtener información relevante que permita optimizar el diseño y el uso de este tipo de equipos en diferentes aplicaciones industriales.

1.1 Formulación del problema

El diseño y operación eficiente de intercambiadores de calor es crucial para maximizar la eficiencia energética y la productividad de procesos térmicos en diversas aplicaciones industriales. En particular, el estudio del efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en intercambiadores de calor de tubos concéntricos es un tema de gran interés en la ingeniería térmica [3], [4]

Sin embargo, a pesar de la importancia de este tema, existe una falta de información y datos experimentales suficientes sobre el efecto combinado de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en intercambiadores de calor de tubos concéntricos (TD360). En particular, se necesita una mayor comprensión sobre cómo estos parámetros afectan la transferencia de calor y la eficiencia energética de estos equipos.

Además, aunque existen estudios previos que han investigado el efecto del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo por separado [5], es necesario un análisis más detallado y sistemático del efecto combinado de ambos parámetros en intercambiadores de calor de tubos concéntricos (TD360). Este análisis debe incluir la medición y el registro de datos experimentales precisos y confiables para diferentes condiciones de operación.

Por lo tanto, el objetivo principal de este anteproyecto es estudiar el efecto de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos (TD360) en la universidad Antonio Nariño (UAN), sede puerto Colombia. En particular, se busca determinar cómo estos parámetros influyen en la transferencia de calor y la eficiencia energética del equipo. Con esta información, se espera contribuir al diseño y operación más eficiente de intercambiadores de calor de este tipo en diversas aplicaciones industriales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar los efectos de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura del intercambiador de calor doble tubo, con el propósito de garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales.
- Evaluar el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, con el fin de conocer el impacto en la eficiencia térmica del equipo.
- Desarrollar las guías de laboratorio en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, para fines académicos en la UAN-Sede Puerto Colombia.

1.3 Justificación

Este proyecto es importante ya que el intercambiador de calor de tubo concéntrico es un equipo utilizado en diversas aplicaciones industriales, incluyendo la industria química y petroquímica. La eficiencia térmica del intercambiador es crucial para lograr un rendimiento óptimo en estas aplicaciones, por lo que es esencial cuantificar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura para garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales.

Además, evaluar el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador permitirá entender mejor cómo estos factores influyen en la eficiencia térmica del equipo, lo que ayudará a optimizar su funcionamiento y a mejorar la eficiencia energética en las aplicaciones industriales.

Finalmente, desarrollar guías de laboratorio para el estudio del efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador permitirá a los estudiantes de la UAN-Sede Puerto Colombia tener una mejor comprensión de los principios básicos del intercambio de calor y su aplicación en la industria. Estas guías de laboratorio serán una herramienta valiosa para la enseñanza y el aprendizaje de la ingeniería química y mecánica en la universidad, y contribuirán al desarrollo de futuros profesionales capacitados en el manejo y diseño de equipos de intercambio de calor.

2. Fundamentos de transferencia de calor

Fundamentado en los conceptos clásicos de transferencia de calor, La transferencia de calor es la transferencia de energía térmica entre sistemas que se encuentran a diferentes temperaturas, La transferencia de calor puede ocurrir de tres maneras: conducción, convección y radiación.

La transferencia de calor es un tema importante en muchos campos, incluyendo la ingeniería, la física, la química y la biología. El conocimiento de los fundamentos de la transferencia de calor es esencial para el diseño de sistemas de refrigeración y calefacción, la fabricación de materiales aislantes y la comprensión de los procesos de cocción y enfriamiento de alimentos.

2.1 Conducción

La conducción de calor es un proceso de transferencia de calor que ocurre en sólidos, líquidos y gases, y se produce como resultado de una diferencia de temperatura entre dos puntos. En la cuarta edición del libro "Transferencia de Calor y Masa" escrito por Yunus A. Cengel [6], La conducción de calor se define como la transferencia de calor a través de un medio sólido o fluido sin que se produzca un movimiento apreciable del medio en sí mismo.

El libro "Transferencia de Calor y Masa" de Cengel [6], describe la conducción de calor en términos de la ley de Fourier, que establece que la tasa de transferencia de calor a través de un medio sólido es proporcional a la diferencia de temperatura entre dos puntos en el medio, y a la conductividad térmica del material.

La ecuación (1) de conducción de calor de Fourier se muestra como:

$$\dot{Q} = -kA \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \right) = -kA \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

donde Q es la tasa de transferencia de calor, k es la conductividad térmica del material, A es el área transversal del material y $(\Delta T/\Delta x)$ es el gradiente de temperatura a través del material.

El signo negativo indica que el flujo de calor se mueve de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La conductividad térmica es una propiedad material que mide la capacidad de un material para conducir calor y depende del tipo de material, la temperatura y la presión.

2.1.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad fundamental de los materiales que describe su capacidad para conducir el calor a través de ellos [7]. Se define como la cantidad de calor que se transmite a través de un material de un metro de espesor y un metro cuadrado de área, cuando existe una diferencia de temperatura de un grado entre las dos caras del material, en un tiempo de un segundo. Se expresa en unidades de watts por metro-kelvin (W/mK) [8].

La conductividad térmica es importante en una amplia gama de aplicaciones, desde la refrigeración de dispositivos electrónicos hasta el diseño de sistemas de aislamiento térmico [9]. Los materiales con alta conductividad térmica, como los metales, son buenos conductores de calor y se utilizan para transferir el calor de manera eficiente. Por otro lado, los materiales con baja conductividad térmica, como los materiales aislantes, se utilizan para retardar la transferencia de calor.

La conductividad térmica también puede variar según la temperatura, la presión y otras condiciones ambientales, y su valor puede depender de la dirección en la que se mide. Por lo tanto, es importante tener en cuenta todas estas variables al seleccionar materiales para una aplicación específica.

La conductividad térmica es una propiedad que varía según el material en cuestión. Por ejemplo, los metales son generalmente buenos conductores térmicos debido a su estructura cristalina y la presencia de electrones libres que pueden transferir calor. El cobre, por ejemplo, tiene una conductividad térmica de aproximadamente 400 W/(mK), mientras que la plata tiene una conductividad térmica de aproximadamente 430 W/(mK) [7].

Por otro lado, los materiales aislantes, como la fibra de vidrio o la espuma de poliestireno, tienen una baja conductividad térmica debido a la presencia de aire atrapado en su estructura. La fibra de vidrio, por ejemplo, tiene una conductividad térmica de alrededor de 0.04 W/(mK), mientras que la espuma de poliestireno tiene una conductividad térmica de aproximadamente 0.03 W/(mK) [9].

En algunos materiales, la conductividad térmica puede variar con la temperatura. Por ejemplo, la conductividad térmica del cobre disminuye a medida que la temperatura aumenta debido a la interacción más fuerte entre los electrones y los iones del metal. En contraste, la conductividad térmica de la mayoría de los materiales aislantes aumenta con la temperatura debido a la expansión térmica y la disminución de la resistencia térmica en la estructura del material véase en la **Tabla 2.1-1** [10].

Tabla 2.1-1

Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.

Material	k , W/m · °C*
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026

Tabla 2.1-1

Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.

Uretano, espuma rígida

0.026

Nota. Multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h · ft · °F. Fuente: Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4ta ed.). McGraw-Hill. [10].

Es importante tener en cuenta estas variaciones en la conductividad térmica al seleccionar materiales para aplicaciones específicas. La elección de un material con la conductividad térmica adecuada puede ayudar a optimizar la transferencia de calor en un sistema.

En el libro se presentan varias aplicaciones prácticas de la conducción de calor, como la transferencia de calor en placas planas, cilindros y esferas, la conducción a través de materiales compuestos, la conducción en materiales anisótropos y la conducción en régimen transitorio.

La conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A que se muestra en la **Figura 1.4-1**, se produce debido a una diferencia de temperatura entre sus dos lados. El calor fluye a través de la pared desde el lado más caliente al lado más frío. El flujo de calor a través de la pared se puede calcular utilizando la ley de Fourier de la conducción de calor [11]

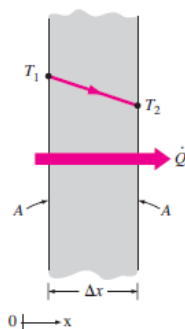


Figura 2.1-1 Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A [11]

2.1.2 Difusividad térmica

La capacidad calorífica de un material, frecuentemente utilizada en el análisis de la transferencia de calor, se representa como el producto ρc_p . Tanto el calor específico (c_p) como la capacidad calorífica (ρc_p) son indicadores de la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Sin embargo, se diferencia en que c_p se expresa por unidad de masa en $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, mientras que ρc_p se expresa por unidad de volumen en $\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ [11].

La difusividad térmica véase ecuación es una propiedad que determina la velocidad a la que se propaga el calor en un material [9]. Esta propiedad depende de diversos factores, como la temperatura, la densidad, la composición química y la estructura cristalina del material y sus unidades están dadas en m^2/s .

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

En general, los metales tienen una alta difusividad térmica, lo que significa que el calor se propaga rápidamente a través de ellos [12]. Por ejemplo, el cobre tiene una difusividad térmica de aproximadamente $400 \text{ mm}^2/\text{s}$, lo que lo convierte en un excelente conductor de calor. Por otro lado, los materiales aislantes, como la lana de vidrio o el poliestireno expandido, tienen una baja difusividad térmica, lo que significa que se propagan muy lentamente véase la Tabla 2.1-2 [13], la difusividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.

Tabla 2.1-2

Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.

Material	$a, m^2/s^*$
Plata	149×10^{-6}
Oro	127×10^{-6}
Cobre	113×10^{-6}
Aluminio	97.5×10^{-6}
Hierro	22.8×10^{-6}
Mercurio (l)	4.7×10^{-6}
Mármol	1.2×10^{-6}
Hielo	1.2×10^{-6}
Concreto	0.75×10^{-6}
Ladrillo	0.52×10^{-6}
Suelo macizo (seco)	0.52×10^{-6}
Vidrio	0.34×10^{-6}
Lana de vidrio	0.23×10^{-6}
Agua (l)	0.14×10^{-6}
Carne de res	0.14×10^{-6}
Madera (roble)	0.13×10^{-6}

Nota. Multiplíquese por 10.76 para convertir a ft²/s. Fuente: *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4ta ed.)*. McGraw-Hill [13].

En los líquidos, la difusividad térmica varía en función de la densidad y la viscosidad del líquido. Por ejemplo, el agua tiene una difusividad térmica mayor que la del aceite debido a su menor viscosidad. En los gases, la difusividad térmica varía en función de la presión y la temperatura. Por ejemplo, el aire tiene una difusividad térmica mayor a baja presión y temperatura.

En los sólidos, la difusividad térmica también depende de la estructura cristalina del material [12]. Por ejemplo, los materiales cristalinos como el diamante o el silicio tienen una alta difusividad térmica debido a la estructura ordenada de sus átomos. Los materiales amorfos, como el vidrio, tienen una difusividad térmica más baja debido a la falta de una estructura ordenada.

Es importante tener en cuenta que la difusividad térmica puede variar en función de las condiciones en las que se mida. Por ejemplo, la difusividad térmica del agua varía con la temperatura, lo que puede afectar la eficiencia de los sistemas de refrigeración y calefacción.

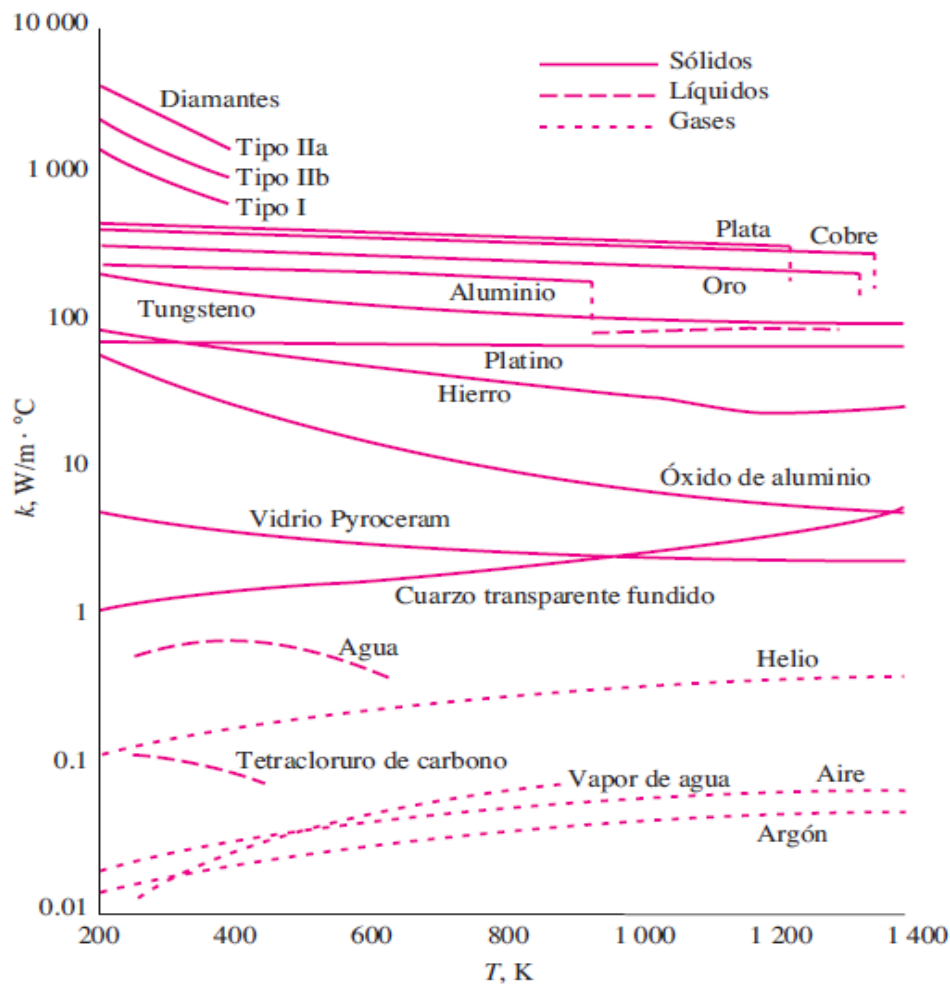


Figura 2.1-2 Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura [25].

2.1.3 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica en los intercambiadores de calor se refiere a la capacidad del intercambiador para transferir calor de manera efectiva entre dos fluidos en contacto. Representa la relación entre la cantidad de calor transferido y la máxima cantidad de calor teóricamente transferible entre los fluidos [8].

En términos generales, una alta eficiencia térmica indica que el intercambiador de calor es capaz de aprovechar de manera eficiente la diferencia de temperatura entre los fluidos para lograr una transferencia de calor óptima. Por otro lado, una

baja eficiencia térmica puede ser indicativa de pérdidas de calor no deseadas, como fugas o ineficiencias en el diseño del intercambiador.

La eficiencia térmica se calcula en función de las temperaturas y los flujos de los fluidos involucrados, así como de las propiedades térmicas de los fluidos, como la capacidad calorífica y la conductividad térmica. El cálculo de la eficiencia térmica implica considerar la transferencia de calor en ambos circuitos del intercambiador y tener en cuenta las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

En los intercambiadores de calor, la eficiencia térmica se puede calcular utilizando la ecuación general (3).

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{m_H * c_{pH} * \Delta T_H} * 100 \quad (3)$$

En el análisis y diseño de intercambiadores de calor, la eficiencia térmica es un parámetro fundamental para evaluar y comparar el rendimiento de diferentes configuraciones y optimizar el intercambiador en términos de eficiencia energética. Una mayor eficiencia térmica implica una mayor transferencia de calor para una misma diferencia de temperatura, lo que puede traducirse en un intercambiador más eficiente y económico.

2.2 Convección

El proceso de convección es un modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente en movimiento, que combina los efectos de la conducción y el movimiento de fluidos. La velocidad del fluido influye en la transferencia de calor por convección, siendo mayor a medida que el movimiento del fluido es más rápido. En ausencia de cualquier movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor es por conducción pura. Cuando el fluido está en movimiento, se produce una mayor transferencia de calor entre la superficie

sólida y el fluido, pero también se dificulta la determinación de las razones de esa transferencia. Como ejemplo, se puede considerar el enfriamiento de un bloque caliente mediante el soplado de aire frío sobre su superficie superior, donde la energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente al bloque por conducción como se muestra en la **Figura 1.5-1**.

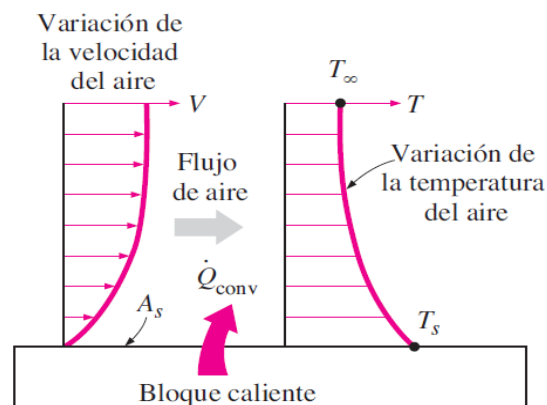


Figura 2.2-1 Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección [26].

La transferencia de energía térmica desde una superficie se lleva a cabo mediante dos procesos: conducción y convección. La conducción implica que la energía se transfiere a través del contacto directo entre las moléculas de la superficie y las del material que está en contacto con ella. Por otro lado, la convección se refiere al movimiento del fluido que aleja la energía térmica de la superficie calentada. La convección puede ser natural o forzada, dependiendo de si es causada por las fuerzas de empuje inducidas por las diferencias de densidad debido a la variación de la temperatura en el fluido o por medios externos como un ventilador o una bomba. Los procesos de transferencia de calor que involucran cambios de fase de un fluido también se consideran convección debido al movimiento inducido del fluido durante el proceso.

La convección forzada como se muestra en la Figura 1.5-2, es un proceso de transferencia de calor en el que un fluido es forzado a fluir sobre una superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. En este proceso, la energía térmica se transfiere desde la superficie caliente al fluido que

fluye, y luego se lleva lejos de la superficie. La convección forzada es comúnmente utilizada en sistemas de refrigeración, acondicionamiento de aire y calefacción, donde se utiliza un ventilador o una bomba para mover el aire o el líquido sobre una superficie calentada o enfriada para transferir energía térmica de un lugar a otro.

La convección natural como se muestra en la Figura 1.5-2, también conocida como convección libre, es un proceso de transferencia de calor que se produce debido a las diferencias de densidad que surgen en un fluido debido a la variación de la temperatura en ese fluido. Cuando una superficie se calienta, el aire cercano se calienta y se vuelve menos denso, lo que provoca que se eleve y sea reemplazado por aire más frío y denso que desciende. Este movimiento natural del fluido provoca la transferencia de energía térmica desde la superficie calentada hacia el aire circundante. La convección natural se produce sin la necesidad de medios externos como un ventilador o una bomba.

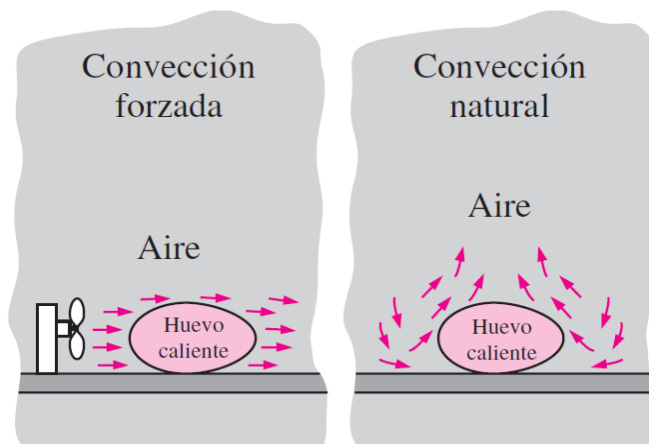


Figura 2.2-2 Enfriamiento de un huevo caliente por convección forzada y convección natural [27].

Aunque la convección puede ser un proceso bastante complejo, algo que podemos observar es que la velocidad a la que se transfiere el calor por

convección depende de la diferencia de temperatura. Esto se puede describir con la ley de Newton del enfriamiento véase ecuación (4)

2.2.1 Ley de enfriamiento de Newton

La ley de enfriamiento de Newton es una ley física que describe cómo cambia la temperatura de un objeto en función del tiempo cuando está en contacto con un medio ambiente con una temperatura diferente [8]. Esta ley establece que la tasa de pérdida de calor de un objeto es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno.

La ley de enfriamiento de Newton se puede expresar matemáticamente como:

$$\dot{Q}_T = hA(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Donde \dot{Q}_T es la tasa de pérdida de calor del objeto, h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ o $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$, A es el área de superficie del objeto, T_s es la temperatura del objeto y T_∞ es la temperatura del medio ambiente [8].

El coeficiente de transferencia de calor por convección, representado por h, no es una propiedad inherente del fluido en sí mismo. Es un parámetro que se establece a través de experimentación y su valor depende de varios factores que influyen en la convección, tales como la forma de la superficie, el tipo de movimiento del fluido, sus propiedades y su velocidad.

Por lo tanto, el valor de h no es algo fijo o universal, sino que puede variar dependiendo de las condiciones específicas en cada caso. Por ejemplo, si la superficie de transferencia de calor cambia o la velocidad del fluido se altera, entonces el valor de h también cambiará.

Para ayudar a tener una idea de los valores típicos de h, se han hecho estudios experimentales y se han creado tablas que los recopilan. Estas tablas, como la Tabla 2.2-1 [14], son una herramienta útil para los ingenieros y científicos que

trabajan con convección, ya que les permiten tener un punto de referencia para establecer sus cálculos y análisis.

Tabla 2.2-1

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tipo de convección	$h, W/m^2 \cdot ^\circ C^*$
Convección libre de gases	2-5
Convección libre de líquidos	10-1000
Convección forzada de gases	25-250
Convección forzada de líquidos	50-20000
Ebullición y condensación	2500-100000

*Nota. Multiplíquese por 0.176 para convertir a $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$. Fuente: *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4ta ed.)*. McGraw-Hill [14].*

Esta ecuación se utiliza comúnmente en la industria y la ingeniería para modelar la transferencia de calor entre un objeto y su entorno. También se puede utilizar para determinar el tiempo que tarda un objeto en enfriarse hasta una temperatura determinada.

La ley de enfriamiento de Newton lleva el nombre de Sir Isaac Newton, el famoso físico y matemático inglés que la formuló por primera vez en el siglo XVII [15]. La ley se ha demostrado útil en numerosas aplicaciones prácticas y ha sido fundamental en el desarrollo de tecnologías de enfriamiento y control de temperatura en diversos campos.

2.2.2 Coeficiente total de transferencia de calor

Según Cengel y Ghajar, en su libro "Transferencia de Calor y Masa" [8], el coeficiente total de transferencia de calor en un intercambiador de calor se refiere a la eficiencia con la que el calor se transfiere entre dos fluidos separados por una pared sólida. Este proceso implica la transferencia de calor desde el fluido caliente hacia la pared por convección, luego a través de la pared por conducción y finalmente de la pared hacia el fluido frío nuevamente por convección. Los efectos de la radiación suelen considerarse en los coeficientes de transferencia de calor por convección.

En el análisis de un intercambiador de calor, se utiliza una red de resistencias térmicas para representar este proceso de transferencia de calor. Esta red incluye dos resistencias asociadas a la convección y una resistencia asociada a la conducción, como se muestra en la Figura 1.5-3 [16]. En el caso de un intercambiador de calor de doble tubo, la resistencia térmica de la pared del tubo se calcula mediante la ecuación (5).

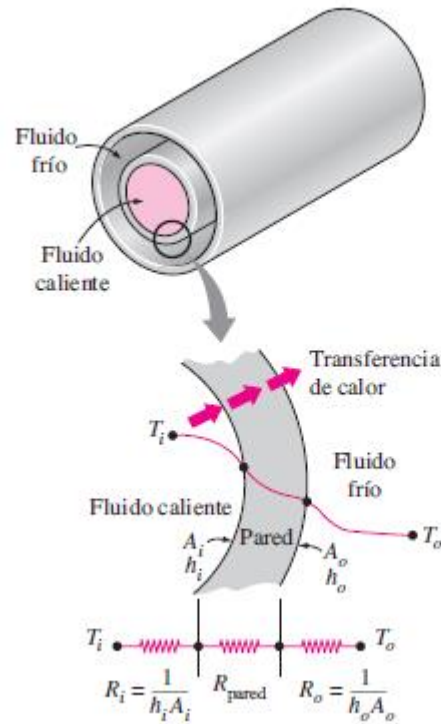


Figura 2.2-3 Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo [16].

$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (5)$$

en donde k es la conductividad térmica del material de la pared y L es la longitud del tubo. Entonces la resistencia térmica total véase ecuación (6).

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (6)$$

A_i representa el área de la superficie interior de la pared que separa los dos fluidos en el intercambiador de calor, mientras que A_o es el área de la superficie exterior

de esa misma pared. En otras palabras, A_i y A_o son las áreas superficiales de la pared de separación que están en contacto con los fluidos interior y exterior, respectivamente. En el caso en que un fluido fluye dentro de un tubo circular y el otro fluye fuera de este, se puede establecer que A_i es igual a $\pi D_i L$ y A_o es igual a $\pi D_o L$ véase Figura 1.5-4 [17].

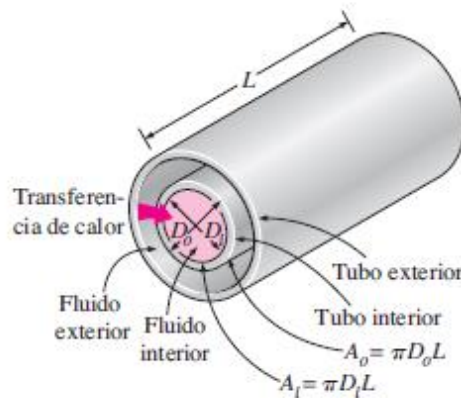


Figura 2.2-4 Las dos áreas superficiales de transferencia de calor asociadas con un intercambiador de calor de doble tubo (para tubos delgados, $D_i \approx D_o$ y, como consecuencia, $A_i \approx A_o$ [17].

En el análisis de los intercambiadores de calor, es conveniente combinar todas las resistencias térmicas presentes en la trayectoria del flujo de calor desde el fluido caliente hacia el fluido frío en una sola resistencia, la cual se representa como R. De esta manera, se puede expresar la relación de transferencia de calor entre los dos fluidos como en la ecuación (7), [8].

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} U A_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (7)$$

Donde U es el coeficiente total de transferencia de calor, con unidades de $W/m^2\text{°C}$, y representa la eficiencia general del intercambiador de calor, el área de superficie interior (A_i) multiplicada por el coeficiente de transferencia de calor interior (U_i), y el área de superficie exterior (A_o) multiplicada por el coeficiente de transferencia de calor exterior (U_o). Cancelando ΔT la ecuación (7) queda de la siguiente manera véase ecuación (8) [8].

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (8)$$

En el análisis de los intercambiadores de calor, se utilizan dos coeficientes de transferencia de calor totales, U_i y U_o , debido a que existen dos áreas superficiales para la transferencia de calor, A_i y A_o , que generalmente no son iguales entre sí. La relación entre estas áreas se expresa mediante $U_i A_i = U_o A_o$, pero $U_i \neq U_o$ a menos que $A_i = A_o$. Por lo tanto, el coeficiente total de transferencia de calor (U) de un intercambiador de calor solo tiene sentido si se especifica el área sobre la cual se basa [8].

Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material de este es alta, como suele ser el caso, la resistencia térmica de dicho tubo puede considerarse despreciable ($R_{pared} \approx 0$). Además, en esta situación, las superficies interior y exterior del tubo son semejantes ($A_i \approx A_o \approx A_s$) [8]. En consecuencia, la ecuación (8) para el coeficiente de transferencia de calor total se simplifica, véase la ecuación (9):

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (9)$$

En este caso, los coeficientes de transferencia de calor por separado, h_i y h_o , se determinan aplicando las relaciones de convección discutidas anteriormente [8].

2.2.3 Número de Nusselt

El número de Nusselt es utilizado en los estudios de convección para eliminar las dimensiones de las ecuaciones y combinar las variables en números adimensionales, reduciendo así el número total de variables. El coeficiente de transferencia de calor h se relaciona con el número de Nusselt, véase ecuación (10), [8].

$$Nu = \frac{hL_C}{k} \quad (10)$$

Donde k es la conductividad térmica del fluido y L_C es la longitud característica. Este número adimensional fue nombrado en honor a Wilhelm Nusselt y representa el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Cuando la capa de fluido tiene algún movimiento, la transferencia de calor a través de ella es por convección, mientras que cuando está inmóvil, la transferencia de calor es por conducción. En ambos casos, la velocidad de transferencia de calor por unidad de tiempo por unidad de área superficial véase ecuación (11), (12) y al dividir ambas ecuaciones se obtiene la ecuación

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (11)$$

$$\dot{q}_{conv} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (12)$$

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta TL} = \frac{hL}{k} = Nu \quad (13)$$

El número de Nusselt proporciona información sobre el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido debido a la convección en comparación con la conducción a través de la misma capa. Cuanto mayor sea el número de Nusselt, más eficiente es la convección. Un número de Nusselt igual a 1 indica transferencia de calor puramente por conducción a través de la capa de fluido [8].

La convección forzada tiene múltiples aplicaciones en nuestra vida diaria. Por ejemplo, los radiadores en nuestros hogares utilizan convección forzada al calentar el aire circundante y proporcionar calefacción. Asimismo, los sistemas de refrigeración de automóviles emplean convección forzada para disipar el calor del motor y mantenerlo a una temperatura adecuada. Además, los hornos de cocina utilizan ventiladores para distribuir el calor de manera uniforme y acelerar el proceso de cocción. Estos ejemplos ilustran cómo la convección forzada es utilizada para controlar la transferencia de calor en diferentes sistemas y mejorar su eficiencia.

Wilhelm Nusselt (1882-1957), ingeniero alemán nacido en Nuremberg, realizó importantes contribuciones en el campo de la transferencia de calor. En 1915, publicó su investigación pionera sobre las leyes básicas de la transferencia de calor, introduciendo los grupos adimensionales que ahora se conocen como parámetros principales en la teoría de similitud de transferencia de calor. Sus estudios abarcaron temas como la condensación de vapor en película, la combustión de carbón pulverizado y la analogía entre calor y transferencia de masa en la evaporación. Wilhelm Nusselt también realizó contribuciones matemáticas destacadas, incluyendo soluciones para la transferencia laminar de calor y la teoría de los regeneradores [18].

2.2.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro fundamental en el estudio de la dinámica de fluidos y determina la transición entre el flujo laminar y turbulento. Fue descubierto por Osborn Reynolds en la década de 1880 [19], y está relacionado con la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido. Véase ecuación (14) [8].

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_C}{\nu} = \frac{\rho VL_C}{\mu} \quad (14)$$

Donde Re es el número de Reynolds, V es la velocidad del flujo, L_C es la longitud característica de la configuración geométrica y $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática del fluido.

En el caso de flujos con números de Reynolds altos, las fuerzas de inercia son dominantes y las fuerzas viscosas no pueden contener las fluctuaciones aleatorias y rápidas del fluido. Esto resulta en un flujo turbulento. Por otro lado, en flujos con números de Reynolds bajos o moderados, las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para suprimir dichas fluctuaciones y mantener el flujo en una forma "alineada" y ordenada, lo que se conoce como flujo laminar [8].

El número crítico de Reynolds, $Re_{cr} = Vx_{cr}/\nu = 5 \times 10^5$, es el valor en el cual se produce la transición del flujo laminar al turbulento y varía según la configuración geométrica. Para el flujo sobre una placa plana. Sin embargo, es importante destacar que este valor puede verse afectado por el nivel de turbulencia en la corriente libre del fluido [8].

Osborne Reynolds (1842-1912), ingeniero y físico inglés reconocido por sus contribuciones en el campo de la hidráulica y la hidrodinámica. Sus estudios sobre

la condensación y transferencia de calor entre sólidos y fluidos revolucionaron el diseño de condensadores y calderas. Sus investigaciones sobre la transición de flujo laminar a turbulento, la teoría de la lubricación y su modelo matemático para el estudio de la turbulencia son destacados en su legado científico. Además, realizó importantes descubrimientos en la explicación del radiómetro y la determinación precisa del equivalente mecánico del calor. El número adimensional que lleva su nombre, el número de Reynolds proporciona un criterio para la similitud dinámica y el modelado correcto en experimentos de flujo de fluidos [19].

2.3 Radiación

La radiación es una forma de transferencia de energía que se produce cuando los átomos o moléculas emiten ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en sus configuraciones electrónicas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor y es la más rápida y no sufre atenuación en un vacío. La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura y es diferente de otras formas de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, las microondas y las ondas de radio, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura mayor que el cero absoluto emiten radiación térmica, lo que es importante en los estudios de transferencia de calor [20].

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados [20]. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$\dot{Q}_{emitida, \text{máx}} = \sigma A_S T_s^4 \quad (15)$$

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$, o bien, $0.1714 \times 10^{-8} \text{Btu/hft}^2 \text{R}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann [11]. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro y la radiación emitida por éste es la radiación del cuerpo negro **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_S T_s^4 \quad (16)$$

en donde ε es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$ [9]. En la Tabla 2.3-1 se dan las emisividades de algunas superficies [12].

Tabla 2.3-1

Emisividades de algunos materiales a 300 K.

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02

Tabla 2.3-1

Emisividades de algunos materiales a 300 K.

Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

Nota. Fuente: Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4ta ed.). McGraw-Hill [21].

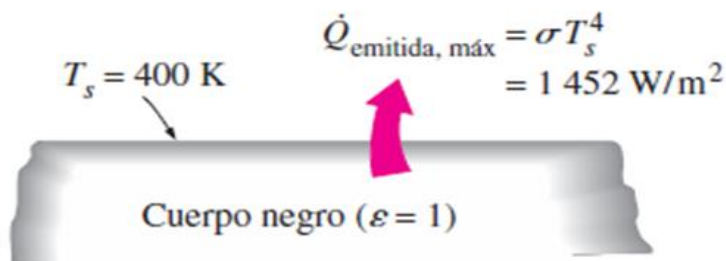


Figura 2.3-1 La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica [28]

3. Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten transferir calor entre dos fluidos que tienen diferentes temperaturas, sin que se mezclen entre sí. En

diversas aplicaciones, como sistemas de calefacción, aire acondicionado, procesos químicos y generación de energía, los intercambiadores de calor son ampliamente utilizados. A diferencia de las cámaras de mezclado, los intercambiadores de calor evitan la combinación de los fluidos involucrados.

En un intercambiador de calor, la transferencia de calor ocurre principalmente por convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. Para analizar el desempeño de los intercambiadores de calor, es conveniente utilizar un coeficiente de transferencia de calor total, denotado como U , que considera la contribución de todos estos efectos en la transferencia de calor. La magnitud de la diferencia de temperatura local entre los dos fluidos en un punto específico del intercambiador determina la tasa de transferencia de calor, y esta diferencia varía a lo largo del dispositivo [8].

Los intercambiadores de calor se presentan en diferentes tipos, y este capítulo comienza con su clasificación. Se aborda la determinación del coeficiente total de transferencia de calor en los intercambiadores y la utilización de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD) en algunas configuraciones. También se introduce el factor de corrección F , que tiene en cuenta las desviaciones de la diferencia media de temperatura en configuraciones más complejas. A continuación, se explora el método de efectividad-NTU, el cual permite analizar los intercambiadores de calor cuando no se conocen las temperaturas de salida de los fluidos. Por último, se examina el proceso de selección de los intercambiadores de calor [8].

Las diversas aplicaciones que involucran la transferencia de calor requieren diferentes componentes y configuraciones de equipos específicos para lograr dicha transferencia. En busca de adaptar los accesorios de transferencia de calor a las necesidades específicas y restricciones de cada caso, se han desarrollado numerosos diseños innovadores de intercambiadores de calor.

Un tipo de intercambiador de calor bastante sencillo es el intercambiador de calor de doble tubo o tubos concéntricos véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el cual consiste en dos tubos de diámetros diferentes dispuestos concéntricamente. En este tipo de intercambiador, uno de los fluidos fluye a través del tubo más pequeño, mientras que el otro fluye en el espacio anular entre los dos tubos [6].

Existen dos disposiciones posibles para el flujo en un intercambiador de calor de doble tubo: el flujo paralelo y el contraflujo. En el flujo paralelo, ambos fluidos, frío y caliente, ingresan al intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección. Por otro lado, en el contraflujo, los fluidos ingresan al intercambiador por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas.

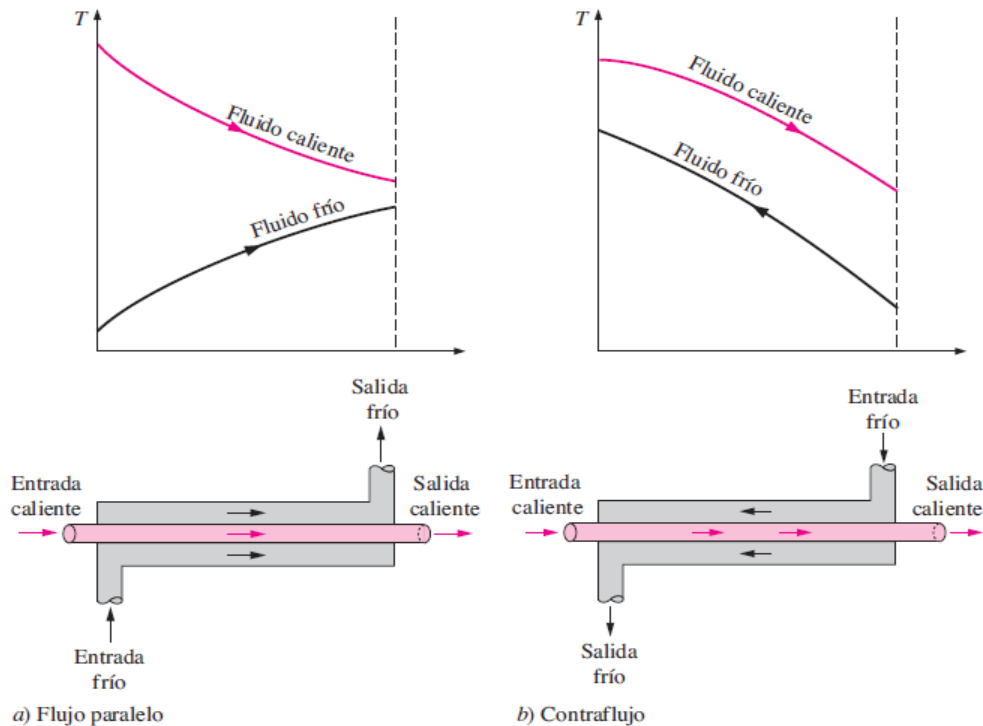


Figura 2.3-1 Diferentes regímenes de flujo y perfiles asociados de temperaturas en un intercambiador de calor de doble tubo [29].

Otro tipo de intercambiador de calor es el intercambiador compacto véase Figura 1.6-2, que ha sido diseñado para maximizar el área de transferencia de calor en relación con su volumen. La densidad de área, conocida como b , se utiliza para evaluar la eficiencia de estos intercambiadores. Se considera compacto a aquellos intercambiadores con $b > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (o $200 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$) [8].

Existen varios ejemplos de intercambiadores compactos, como los intercambiadores de calor utilizados en vehículos, que tienen una densidad de área de aproximadamente $1,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Otro ejemplo son los intercambiadores de calor de cerámica de vidrio utilizados en turbinas de gas, que tienen una densidad de área de alrededor de $6,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Además, el regenerador del motor Stirling presenta una densidad de área de aproximadamente $15,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, mientras que los pulmones humanos alcanzan una densidad de área de alrededor de $20,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Estos intercambiadores compactos están diseñados con pasajes estrechos que permiten el flujo laminar. Son ampliamente utilizados en

aplicaciones donde se requiere una alta transferencia de calor en un espacio reducido, como en dispositivos con restricciones de peso y volumen [8].

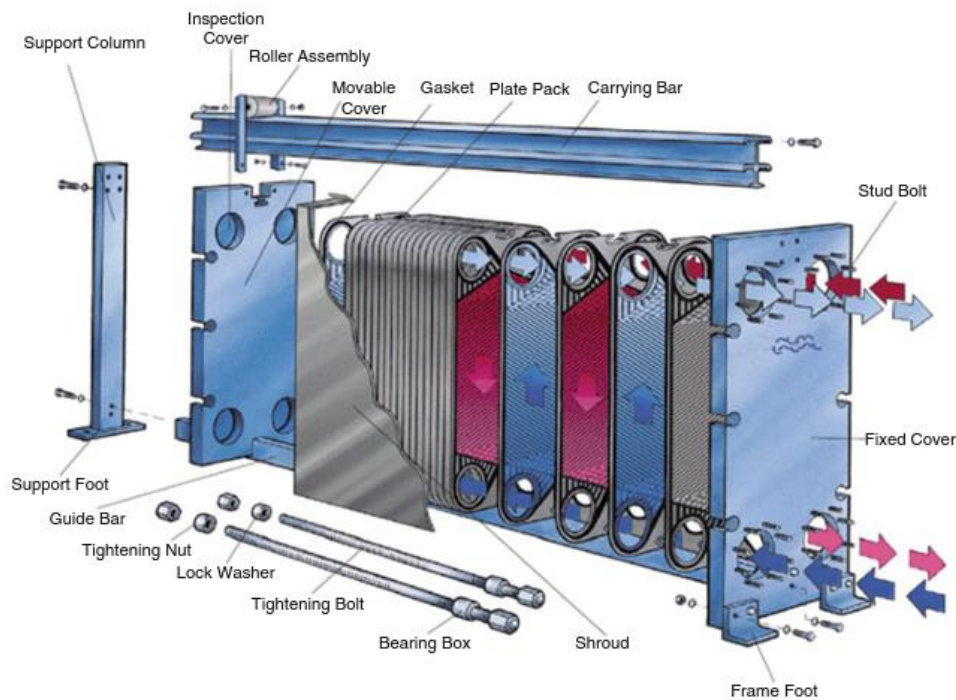


Figura 2.3-2 Esquemático intercambiador de calor compacto de placas con junta [30].

Los intercambiadores compactos se caracterizan por tener una gran área superficial que se logra al sujetar placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre sí en las paredes que separan los dos fluidos. Estos intercambiadores son ampliamente utilizados en aplicaciones de transferencia de calor entre diferentes medios, como gas a gas, gas a líquido o líquido a gas. Su diseño permite contrarrestar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases mediante el aumento del área superficial disponible. Por ejemplo, en un radiador de automóvil, que es un tipo de intercambiador compacto para transferencia de calor entre el agua y el aire, las aletas están ubicadas en el lado del aire de la superficie del tubo [8].

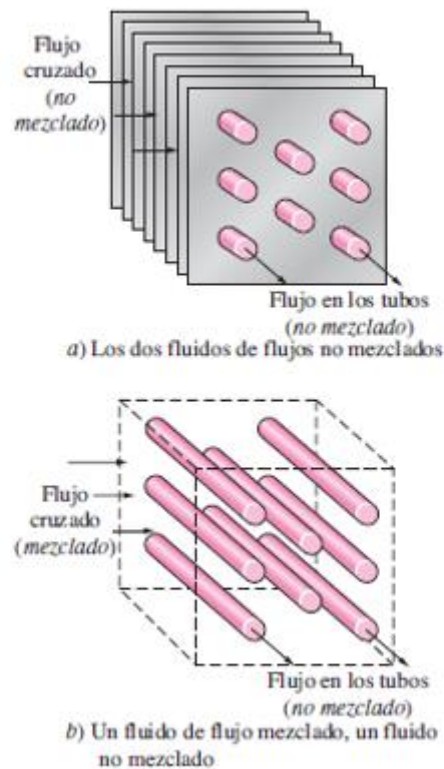


Figura 2.3-3 Diferentes configuraciones de flujo en intercambiadores de calor de flujo cruzado [27].

En los intercambiadores compactos, los dos fluidos suelen fluir perpendicularmente entre sí, lo que se conoce como flujo cruzado. Este flujo cruzado puede clasificarse adicionalmente como no mezclado o mezclado, dependiendo de la configuración específica. En el caso del flujo cruzado no mezclado, las aletas de placa guían al fluido a moverse a través de un espaciado definido entre ellas y restringen su movimiento en dirección transversal (es decir, paralela a los tubos), como se muestra en la Figura 1.6-3a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Por otro lado, el flujo cruzado mezclado permite que el fluido tenga cierta libertad para moverse en dirección transversal, como se ilustra en la Figura 1.6-3b En el radiador de un automóvil, los dos fluidos no se mezclan. Es importante tener en cuenta que la presencia de mezcla en el fluido puede tener un impacto significativo en las características de transferencia de calor del intercambiador [8].

El intercambiador de calor más común en las aplicaciones industriales es el intercambiador de tubos y coraza véase Figura 1.6-4. Este tipo de intercambiador consta de una carcasa que contiene un gran número de tubos dispuestos paralelamente a la carcasa. La transferencia de calor ocurre cuando uno de los fluidos fluye dentro de los tubos y el otro fluye fuera de ellos, a través de la carcasa.

Para mejorar la transferencia de calor, se suelen utilizar deflectores en la carcasa para dirigir el flujo de manera transversal y mantener un espaciamiento uniforme entre los tubos. Sin embargo, estos intercambiadores son relativamente grandes y pesados, por lo que no son adecuados para aplicaciones en automóviles y aviones [8].

Los intercambiadores de tubos y coraza se clasifican según el número de pasos realizados por la carcasa y los tubos. Por ejemplo, un intercambiador de un paso por la carcasa y dos pasos por los tubos véase Figura 1.6-5a significa que todos los tubos forman una U en la carcasa. Del mismo modo, un intercambiador de dos pasos por la carcasa y cuatro pasos por los tubos véase Figura 1.6-5b implica que hay dos trayectos distintos en la carcasa y cuatro trayectos en los tubos [8].

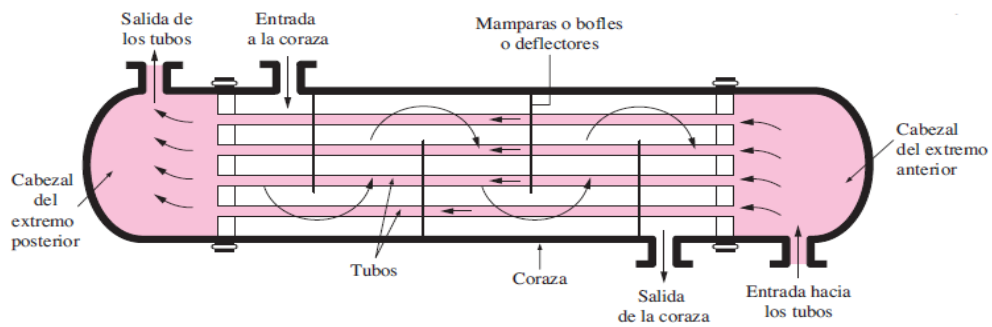
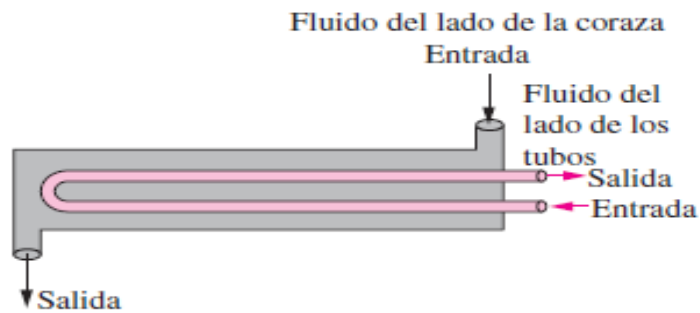
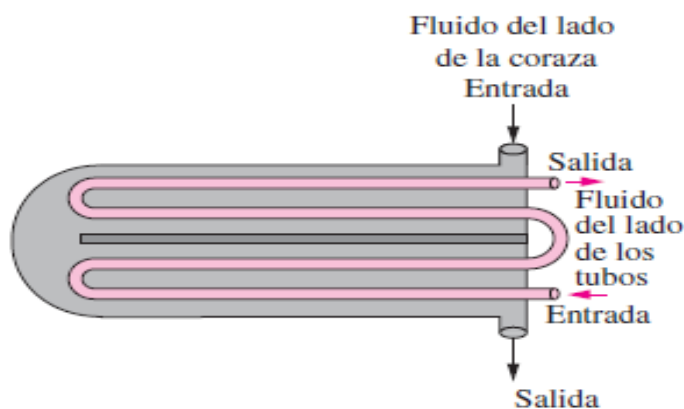


Figura 2.3-4 Esquema de un intercambiador de calor de coraza y tubos (un paso por la coraza y un paso por los tubos) [31].



a) Un paso por la coraza y dos pasos por los tubos



b) Dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos

Figura 2.3-5 Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los intercambiadores de calor de coraza y tubos [32].

3.1 Ecuaciones

En general, las ecuaciones utilizadas en el análisis y cálculo de un intercambiador de calor de tubos concéntricos en flujo paralelo y contraflujo son fundamentales para comprender y evaluar su desempeño térmico. Estas ecuaciones permiten determinar parámetros importantes, como la transferencia de calor, la eficiencia y la resistencia térmicas.

Al utilizar las ecuaciones adecuadas, es posible calcular el flujo de calor transferido entre los fluidos que circulan en los tubos concéntricos, teniendo en cuenta las diferencias de temperatura y los coeficientes de transferencia de calor. Además, se pueden calcular la temperatura media, los gradientes de temperatura, las diferencias de temperatura logarítmicas y otros valores necesarios para el análisis termodinámico y el diseño óptimo del intercambiador de calor.

Estas ecuaciones también permiten evaluar la eficiencia del intercambiador de calor, es decir, cuánta energía se transfiere efectivamente de un fluido al otro en comparación con la máxima posible transferencia de calor. Asimismo, se pueden analizar los efectos del flujo paralelo o contraflujo en la eficiencia y determinar los requerimientos de área de transferencia de calor para un rendimiento óptimo.

3.1.1 Temperatura media (\bar{T})

El cálculo de las temperatura media en un intercambiador de calor de tubos concéntricos en flujo paralelo y contraflujo son de gran importancia para realizar un análisis preciso y eficiente. Estas ecuaciones permiten obtener valores fundamentales que ayudan a comprender el comportamiento térmico del intercambiador y a evaluar su rendimiento.

Para encontrar la temperatura media del circuito frío véase la ecuación (17):

$$\bar{T} = \frac{T_{C1}+T_{C2}}{2} \quad (17)$$

Para encontrar la temperatura media del circuito frío véase la ecuación (18):

$$\bar{T} = \frac{T_{H1}+T_{H2}}{2} \quad (18)$$

3.1.2 Capacidad térmica (C)

La capacidad térmica es una medida del calor necesario para aumentar la temperatura de una determinada masa de material en 1 grado (Kelvin o Celsius). Es el producto de la masa del material (m) y su capacidad calorífica específica (c).

La capacidad térmica es una propiedad importante para caracterizar la respuesta de un material a los cambios de temperatura. Indica la cantidad de calor que un material puede almacenar o liberar en función de su masa y su capacidad para absorber o ceder calor.

La ecuación para la capacidad térmica se expresa de la siguiente manera:

$$C = m * c \quad (19)$$

3.1.3 Capacidad calorífica específica a presión constante (c_p)

La capacidad calorífica específica es la cantidad de energía calorífica necesaria para aumentar la temperatura de exactamente 1 kg de material en 1 grado Celsius. Es una relación entre el cambio de energía calorífica y el cambio de temperatura.

La capacidad calorífica específica a presión constante (c_p) es una propiedad termo física que indica cuánto calor se requiere para aumentar la temperatura de una unidad de masa de un material en 1 grado Celsius, manteniendo la presión constante. Se expresa comúnmente en unidades de energía por unidad de masa y grado (por ejemplo, J/kg·K o cal/g·°C).

La ecuación (20) para la capacidad calorífica específica a presión constante se expresa como:

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (20)$$

La presión y la temperatura afectan la capacidad calorífica específica, por lo que la ecuación (21) asume una presión constante en un rango conocido de temperatura. Esta es la capacidad calorífica específica "isobárica" (a presión constante).

$$c_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (21)$$

Para la capacidad calorífica específica del agua a presión constante véase la ecuación (22), además existen datos tabulados véase Tabla 3.1-1 y graficados como se muestra en la Figura 1.7-1.

$$c_p = 4.2113 - 2.4403 * 10^{-3}T + 7.0487 * 10^{-5}T^2 - 1.0 * 10^{-6}T^3 + 6 * 10^{-9}T^4 \quad (22)$$

Tabla 3.1-1

Capacidad calorífica específica del agua a presión constante.

T_c (0°C)	C_p (kJ/kg·mol)	T_c (0°C)	C_p (kJ/kg·mol)	T_c (0°C)	C_p (kJ/kg·mol)	T_c (0°C)	C_p (kJ/kg·mol)
0	4.224	25	4.184	50	4.179	75	4.192
1	4.221	26	4.183	51	4.179	76	4.193
2	4.219	27	4.183	52	4.179	77	4.194
3	4.216	28	4.182	53	4.179	78	4.195
4	4.214	29	4.181	54	4.18	79	4.195
5	4.212	30	4.181	55	4.18	80	4.196
6	4.21	31	4.18	56	4.18	81	4.197
7	4.208	32	4.18	57	4.181	82	4.198
8	4.206	33	4.179	58	4.181	83	4.199
9	4.204	34	4.179	59	4.182	84	4.2
10	4.202	35	4.179	60	4.182	85	4.201
11	4.201	36	4.178	61	4.183	86	4.202
12	4.199	37	4.178	62	4.183	87	4.203
13	4.197	38	4.178	63	4.184	88	4.204
14	4.196	39	4.178	64	4.184	89	4.205
15	4.194	40	4.178	65	4.185	90	4.206
16	4.193	41	4.178	66	4.186	91	4.208
17	4.192	42	4.178	67	4.186	92	4.209
18	4.191	43	4.178	68	4.187	93	4.21
19	4.19	44	4.178	69	4.188	94	4.211
20	4.188	45	4.178	70	4.188	95	4.212
21	4.187	46	4.178	71	4.189	96	4.213
22	4.186	47	4.178	72	4.19	97	4.215
23	4.186	48	4.178	73	4.19	98	4.216
24	4.185	49	4.178	74	4.191	99	4.217

Nota. Fuente: "Calor y calorimetría," Universidad de Sevilla [22].

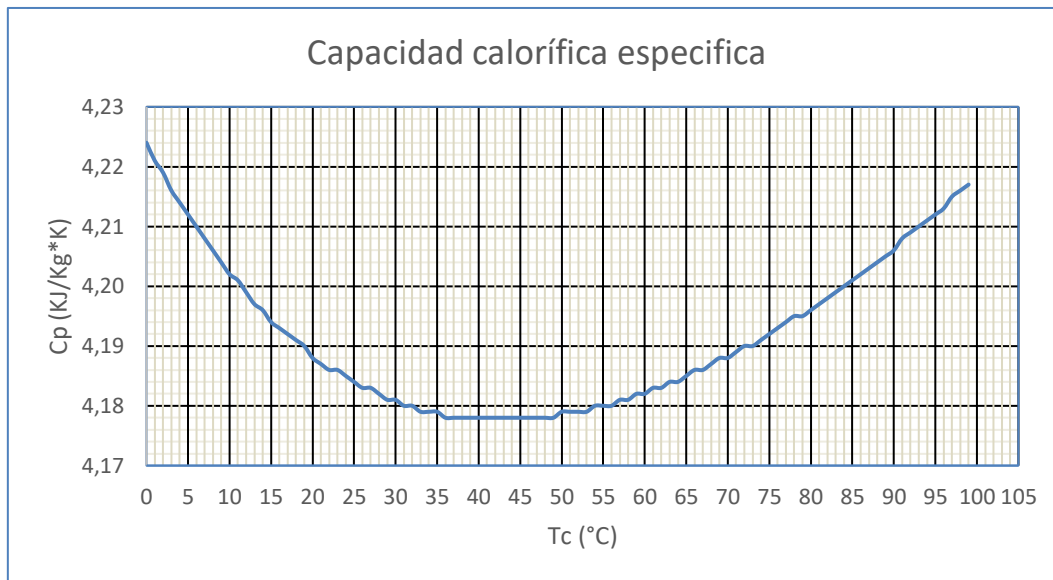


Figura 3.1-1 Capacidad calorífica específica del agua a presión constante [22].

3.1.4 Densidad (ρ)

La densidad del agua se refiere a la masa de agua por unidad de volumen y puede variar dependiendo de la temperatura y la presión.

A medida que la temperatura del agua cambia, su densidad también cambia ligeramente. La densidad máxima del agua se alcanza aproximadamente a 4 grados Celsius y disminuye a medida que su temperatura aumenta o disminuye desde este valor.

Para los circuitos de agua caliente y fría, se puede calcular la densidad lo que ayudaría a comprender mejor las propiedades térmicas del sistema.

Para calcular la densidad del agua véase la ecuación (32), además existen datos tabulados véase Tabla 3.1-2 y graficados como se muestra en la Figura 1.7-2.

$$\rho = \frac{999.839 + 16.952T - 7.990 \cdot 10^{-3}T^2 - 46.241 \cdot 10^{-6}T^3 + 105.846 \cdot 10^{-9}T^4 - 281.030 \cdot 10^{-12}T^5}{1 + 16.887 \cdot 10^{-3}T} \quad (23)$$

Tabla 3.1-2

Densidad del agua.

T(°C)	ρ (kg/m ³)	T(°C)	ρ (kg/m ³)	T(°C)	ρ (kg/m ³)
0.01	999.8	35	994.1	70	978
5	1000	40	992.8	75	975
10	999.7026	45	990.2	80	972
15	999.1026	50	988	85	968
20	998.2071	55	986	90	965
25	997.0479	60	983	95	962
30	995.6502	65	980	100	958

Nota. Fuente: "propiedades del agua" Universidad de Sevilla [23].

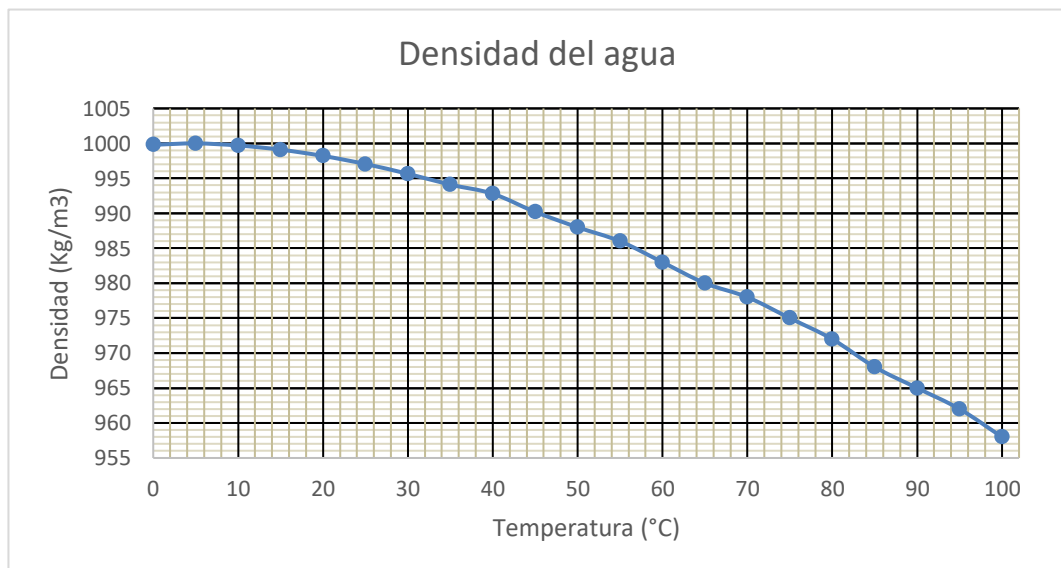


Figura 3.1-2 Densidad del agua [23].

Para convertir de litros por minuto (L/min) a metros cúbicos por segundo (m³/s) tenga en cuenta la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ L/min} = 0.01667 \text{ m}^3/\text{s}.$$

3.1.5 Transferencia de calor, balance de energía y eficiencias

En los intercambiadores de calor, el calor se transfiere o "fluye" desde el circuito de agua caliente al circuito de agua fría. La tasa de transferencia de calor es función del caudal de masa del fluido, el cambio de temperatura y la capacidad calorífica específica del fluido (a temperatura media).

La transferencia de calor se produce debido a la diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el fluido frío. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura, mayor será la tasa de transferencia de calor. La cantidad de calor transferido se calcula multiplicando el caudal de masa del fluido por el cambio de temperatura y la capacidad calorífica específica del fluido.

La ecuación general **(24)** para calcular la tasa de transferencia de calor (\dot{Q}) es:

$$\dot{Q} = m * c_p * \Delta T \quad (24)$$

En un intercambiador de calor ideal, que no pierde ni absorbe calor de su entorno, el fluido frío absorbe todo el calor del fluido caliente. Por lo tanto, para la tasa de transferencia de calor véase la ecuación **(25)**:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = m_H * c_{pH} * \Delta T_H = m_C * c_{pC} * \Delta T_C \quad (25)$$

Reorganizada para el caudal volumétrico, véase la ecuación **(26)**.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = V_H * \rho_H * c_{pH} * \Delta T_H = V_C * \rho_C * c_{pC} * \Delta T_C \quad (26)$$

3.1.6 Coeficiente de balance de energía (C_{EB})

El coeficiente de balance de energía (C_{EB}) vease la ecuación (27), muestra la relación entre la energía absorbida y emitida, este coeficiente es una medida de eficiencia o efectividad en el intercambio de energía en el sistema. ($C_{EB} = 1$) indica un equilibrio energético, donde la energía absorbida y emitida son iguales. ($C_{EB} > 1$) indica que el sistema ha absorbido más energía de la que ha emitido, mientras que ($C_{EB} < 1$) indica lo contrario.

$$C_{EB} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_e} \quad (27)$$

Sin embargo, como se muestra, debido a la posible transferencia de calor hacia dentro o fuera del sistema, el coeficiente de balance de energía puede dar respuestas superiores a 1 si el intercambiador de calor absorbe energía de su entorno. Por lo tanto, solo se utiliza como una guía, ya que en realidad véase ecuación (28)

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_a \pm \text{Pérdidas o ganancias desde el entorno} \quad (28)$$

3.1.7 Eficiencia media de temperatura

La eficiencia media de temperatura y el coeficiente de transferencia de calor proporcionan resultados más útiles para la comparación entre intercambiadores de calor.

La eficiencia de temperatura del circuito caliente del intercambiador de calor es la relación entre el cambio de temperatura en el circuito caliente, dividido por la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de los circuitos caliente y frío véase ecuación (29).

Este parámetro nos indica qué tan eficientemente se está realizando la transferencia de calor en el circuito caliente del intercambiador. Una eficiencia de temperatura más alta indica una mayor capacidad de transferencia de calor y una mejor utilización del gradiente de temperatura disponible.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de temperatura se calcula específicamente para el circuito caliente y no tiene en cuenta las pérdidas o ganancias de calor desde el entorno. Además, este cálculo asume que las temperaturas máximas y mínimas son conocidas y se refieren a las temperaturas en los puntos de entrada y salida del circuito caliente.

$$\eta_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{C1}} * 100 \quad (29)$$

La eficiencia de temperatura del circuito frío del intercambiador de calor es la relación entre el cambio de temperatura en el circuito frío, dividido por la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de los circuitos caliente y frío véase ecuación.

Esta medida nos indica qué tan eficientemente se está realizando la transferencia de calor en el circuito frío del intercambiador. Una eficiencia de temperatura más alta indica una mayor capacidad de transferencia de calor y una mejor utilización del gradiente de temperatura disponible en el circuito frío.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de temperatura se calcula específicamente para el circuito frío y no tiene en cuenta las pérdidas o ganancias de calor desde el entorno. Además, este cálculo asume que las temperaturas máximas y mínimas son conocidas y se refieren a las temperaturas en los puntos de entrada y salida del circuito frío.

$$\eta_C = \frac{T_{C2} - T_{C1}}{T_{H1} - T_{C1}} * 100 \quad (30)$$

La eficiencia media de temperatura de los dos circuitos es la eficiencia promedio de ambos véase ecuación **(31)**.

Esta medida proporciona una evaluación general del rendimiento del intercambiador de calor al considerar tanto el circuito caliente como el circuito frío. Se calcula tomando el promedio de las eficiencias de temperatura de ambos circuitos.

Al calcular la eficiencia media de temperatura, se tiene en cuenta la transferencia de calor en ambos circuitos y se considera el gradiente de temperatura disponible en cada uno de ellos. Proporciona una medida más completa del rendimiento del

intercambiador de calor al considerar la eficiencia de ambos circuitos de manera equilibrada.

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_H + \eta_C}{2} \quad (31)$$

3.1.8 Diferencia Logarítmica de Temperatura Media (LMTD)

La Diferencia Logarítmica de Temperatura Media (LMTD) véase ecuación (32), es una medida de la fuerza impulsora del calor que crea la transferencia de calor. Es un promedio logarítmico de la diferencia de temperatura entre los circuitos caliente y frío en cada extremo del intercambiador de calor.

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln \left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}} \right)} \quad (32)$$

3.1.9 Coeficiente de Transferencia de Calor (U)

El coeficiente de transferencia de calor (U) véase ecuación (33) es el coeficiente global de transferencia de calor que engloba los efectos de la pared y las capas límite en el intercambiador de calor. Es una medida de la eficiencia de transferencia de calor del intercambiador. Un intercambiador de calor eficiente tendrá un coeficiente alto, por lo tanto, este valor es importante para los ingenieros.

El coeficiente de transferencia de calor se utiliza para cuantificar la capacidad del intercambiador de calor para transferir calor entre los fluidos que circulan en los circuitos caliente y frío. Se expresa en unidades de potencia por área y diferencia de temperatura, como $W/(m^2 \cdot K)$ o $Btu/(hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F)$.

$$U = \frac{\dot{Q}_e}{A * LMTD} \quad (33)$$

3.2 Variación del flujo volumétrico

El objetivo de la variación del flujo es mostrar cómo los diferentes caudales en frío afectan el rendimiento del intercambiador de calor tanto en flujo paralelo como en conexión de contraflujo (el caudal caliente y la temperatura del calentador son fijos).

Se debe Conectar y configurar el intercambiador de calor para un flujo paralelo o en contraflujo y una temperatura en el tanque del calentador de 60 ° C.

Se debe crear una tabla de resultados en blanco, similar a la Tabla 3.2-1.

Use un termómetro preciso para verificar la temperatura del aire ambiente local como referencia.

Para la primera prueba, utilice las válvulas de control de flujo manuales para ajustar los caudales de calor y frío. Espere al menos cinco minutos para que las temperaturas del intercambiador de calor se estabilicen.

Registre las temperaturas del circuito caliente y frío.

Repita el procedimiento para caudales, tal como se muestra en la tabla, para las pruebas 2, 3 y 4.

Convertir la tasa de flujo de litros por minuto (L/min) a metros cúbicos por segundo (m³/s).

Calcular el cambio de temperatura (ΔT) y la temperatura promedio para cada uno de los circuitos.

Utilizando los gráficos o las ecuaciones, realice los cálculos de la densidad del agua para cada circuito a la temperatura de cada calentador, así como la capacidad calorífica específica para cada circuito a la temperatura de cada calentador.

Proceda a calcular la potencia emitida, la potencia absorbida, las eficiencias de temperatura media y el coeficiente de balance de energía para los sistemas de flujo paralelo y contraflujo en todas las temperaturas del calentador. Además, genere gráficos del coeficiente de balance de energía en función de la temperatura del calentador.

Determine el LMTD (diferencia de temperatura media logarítmica) y utilícelo para calcular el coeficiente de transferencia de calor (U) correspondiente a la temperatura de cada calentador.

Finalmente, analice cómo la temperatura del calentador (fuerza motriz) afecta el rendimiento del intercambiador de calor en base a los resultados obtenidos.

Tabla 3.2-1																									
Tabla de resultados en blanco 1.																									
Intercambiador de calor: TD360a																									
Conexión (paralelo o contraflujo): Paralelo																									
Temperatura ambiente: 32 °C																									
Temperatura tanque calentador: 60 °C																									
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo frío (L/min)	TH1	TH2	ΔTH	Promedio TH	TH3	TC1	TC2	ΔTC	Promedio TC	TC3	ηH	ηC	ρH	ρC	CpH	CpC	\dot{Q}_e	\dot{Q}_a	CEB	$\tilde{\eta}$	LMTD	U	
1	3	3																							
2	3	2																							
3	3	1																							
4	3	0.5																							

Nota. Fuente: TD360 Bench-Top Heat Exchangers User Guide [24].

Se debe utilizar las temperaturas de entrada y salida (TH1, TH2, TC1 y TC2) para crear gráficos de temperatura simples para cada flujo, similares a la Figura 1.8-1. Tenga en cuenta que los resultados para el flujo paralelo y el contraflujo serán diferentes.

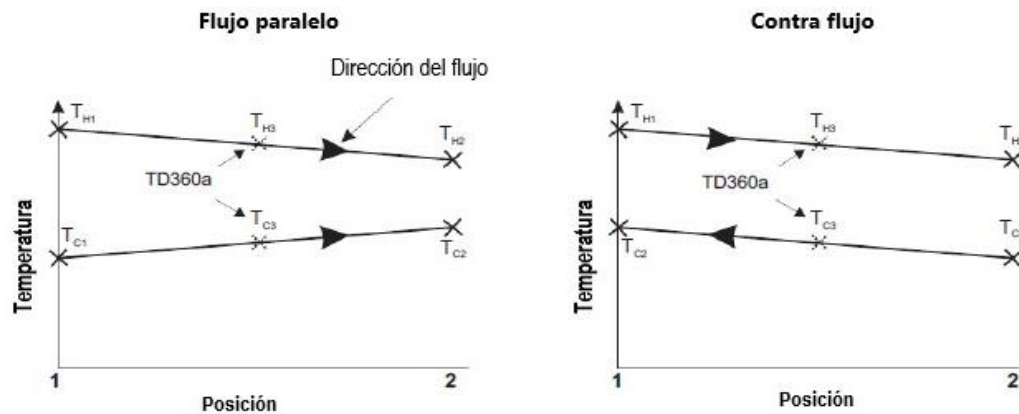


Figura 3.2-1 Gráficos simples de temperatura [24].

3.3 Variación de la temperatura

El objetivo es mostrar cómo las diferentes temperaturas de suministro de agua caliente afectan el rendimiento del intercambiador de calor en conexiones paralelas y contraflujo, manteniendo los caudales fijos.

Conecte y configure su intercambiador de calor para un flujo paralelo o contraflujo, utilizando una temperatura del tanque del calentador de 30 °C.

Se debe crear una tabla de resultados en blanco, similar a la Tabla 3.3-1

Use un termómetro preciso para verificar la temperatura del aire ambiente local como referencia.

Para la primera prueba, utilice las válvulas de control de flujo manuales para ajustar los caudales de calor y frío. Espere al menos cinco minutos para que las temperaturas del intercambiador de calor se estabilicen.

Registre las temperaturas del circuito caliente y frío.

Repita el procedimiento para temperaturas de tanque calentado de 40 °C, 50 °C y 60 °C, como se muestra en la tabla para las pruebas 2, 3 y 4.

Convertir la tasa de flujo de litros por minuto (L/min) a metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Calcular el cambio de temperatura (ΔT) y la temperatura promedio para cada uno de los circuitos.

Utilizando los gráficos o las ecuaciones, realice los cálculos de la densidad del agua para cada circuito a la temperatura de cada calentador, así como la capacidad calorífica específica para cada circuito a la temperatura de cada calentador.

A continuación, proceda a calcular la potencia emitida, la potencia absorbida, las eficiencias de temperatura media y el coeficiente de balance de energía para los sistemas de flujo paralelo y contraflujo en todas las temperaturas del calentador. Además, genere gráficos del coeficiente de balance de energía en función de la temperatura del calentador.

Determine el LMTD (diferencia de temperatura media logarítmica) y utilícelo para calcular el coeficiente de transferencia de calor (U) correspondiente a la temperatura de cada calentador.

Finalmente, analice cómo la temperatura del calentador (fuerza motriz) afecta el rendimiento del intercambiador de calor en base a los resultados obtenidos.

Tabla 3.3-1																							
Tabla de resultados en blanco 2.																							
Intercambiador de calor: TD360a																							
Conexión (paralelo o contraflujo): Paralelo																							
Flujo caliente: 3 L/m																							
Flujo frío: 2 L/m																							
Prueba	Temperatura del calentador	TH1	TH2	ΔTH	Promedio TH	TH3	TC1	TC2	ΔTC	Promedio TC	TC3	η_H	η_C	ρ_H	ρ_C	C_{pH}	C_{pC}	\dot{Q}_e	\dot{Q}_a	CEB	$\tilde{\eta}$	LMTD	U
1	30																						
2	40																						
3	50																						
4	60																						

Nota. Fuente: TD360 Bench-Top Heat Exchangers User Guide [14].

Se debe utilizar las temperaturas de entrada y salida (TH1, TH2, TC1 y TC2) para crear gráficos de temperatura simples para cada flujo, similares a la Figura 1.9-1. Tenga en cuenta que los resultados para el flujo paralelo y el contraflujo serán diferentes.

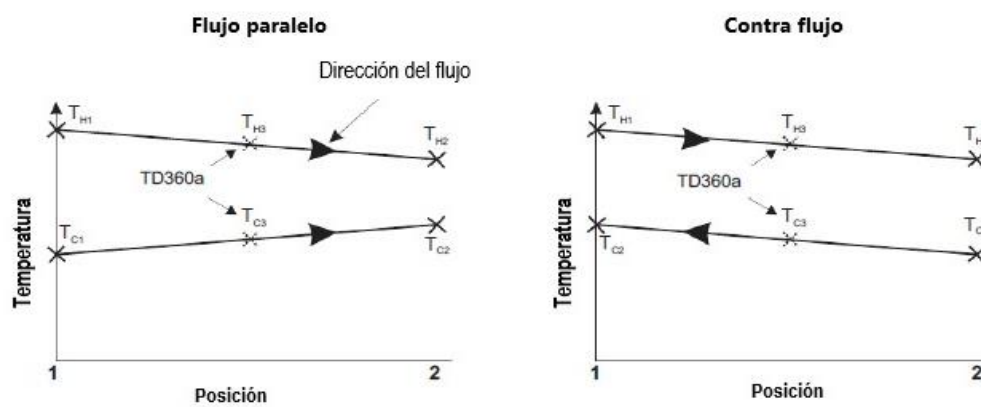


Figura 3.3-1 Gráficos simples de temperatura [24].

4. Metodología experimental

El Laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos de la Universidad Antonio Nariño posee un intercambiador de calor TecQuipment TD360 véase Figura 1.9-1 y un módulo complementario de tubos concéntricos TD360a véase Figura 1.9-2, los cuales son objetos de estudio en este TIG (Thesis, Internship, or Graduate Project). La **Tabla 3.3-1** y **Tabla 3.3-2** muestran las características técnicas del intercambiador de calor TD360 y su complemento TD360a.

TecQuipment TD360

El módulo de servicio (TD360) [24]. véase Figura 1.9-1. es el núcleo de la gama TD360, Se proporciona agua fría y caliente a los intercambiadores de calor y todos los instrumentos necesarios para medir su rendimiento, Todas las conexiones de fluido a los intercambiadores de calor opcionales son conectores rápidos autosellantes, por seguridad y simplicidad. Las corrientes de fluido frío y caliente tienen diferentes conectores para reducir los errores.

El sistema de agua caliente del módulo de servicios incluye un tanque con un calentador eléctrico controlado por PID "proportional-integral-derivative", una bomba e indicadores de nivel del tanque. Una válvula operada eléctricamente se abre para dejar entrar agua para llenar el tanque, El tanque tiene protección en caso de sobre temperatura, bajo nivel de agua y sobrellenado.

El sistema de agua caliente proporciona caudales y temperaturas estables. El circuito de agua fría del módulo de servicios dispone de regulador de caudal y conexión para suministro externo de agua de red.

Tanto el sistema de agua fría como el de agua caliente cuentan con válvulas de aguja de precisión y caudalímetros de turbina para controlar y medir los caudales.

Los termopares en los conectores miden las temperaturas de la corriente de fluido de entrada y salida, caliente y fría. Algunos intercambiadores de calor también tienen termopares incorporados para mediciones de temperatura adicionales. Las pantallas digitales muestran las temperaturas y los caudales de las corrientes de los fluidos.



Figura 3.3-1 Modulo de servicio TD360 [33].

Tabla 3.3-1

Características técnicas TD360.

Artículo	Detalles
Entorno operativo	Interior (laboratorio) Altitud hasta 2000 m Rango de temperatura de 5°C a 40°C Humedad relativa máxima 80% para temperaturas de hasta 31 °C, disminuyendo linealmente al 50% de humedad relativa a 40 °C Categoría de sobretensión 2 (como se especifica en EN61010-1). Grado de contaminación 2 (como se especifica en EN61010-1).
Dimensiones netas	1350 mm de largo x 500 mm de adelante hacia atrás x 500 mm de alto
Peso neto	40 kg
Suministro eléctrico	220 VCA a 240 VCA de fase a neutro o fase a fase de 50 Hz a 60 Hz a 13 A

Tabla 3.3-1	
Características técnicas TD360.	
Conexiones externas (eléctricas)	Toma IEC de interfaz VDAS opcional (donde está instalada): Tensión de alimentación red Tomas Tipo RJ45 para VDAS: Tensión extra baja <25 VCC Tomas de termopar tipo K: <25 VCC Toma de experimento auxiliar de voltaje extra bajo : voltaje extra bajo <25 VCC
Conexiones externas (agua)	Circuito de entrada y salida de agua fría Entrada de agua para el tanque del calentador Todas las conexiones de 15 mm de diámetro.
Protección del circuito eléctrico	Interruptor principal - 13A Un disyuntor de 2 polos Para fuente de alimentación interna y toma de corriente a interfaz VDAS opcional: disyuntor de 2 polos tipo B de 4 A Nota: Algunas unidades no tienen la salida para la interfaz VDAS opcional. Debe conectar la interfaz a su propio suministro; consulte la Guía del usuario de VDAS para obtener más información.
Suministro de agua fría y residuos necesarios	Suministro de agua fría limpia a 5 L.min ⁻¹ , entre 1 bar y 3 bar. Temperatura mínima 5°C, temperatura máxima 20°C*. Estándar de residuos de agua potable. *Si usa agua por encima de esta temperatura, no puede hacer con éxito todos los experimentos y sus resultados serán muy diferentes a los de esta guía.

Nota. Fuente: TD360 Bench-Top Heat Exchangers User Guide [24].

TecQuipment TD360a

Este es el más simple de los intercambiadores de calor opcionales TD360a véase Figura 1.9-2. Tiene dos tubos, uno dentro del otro, un tubo lleva el líquido caliente y el otro lleva el líquido frío, Generando transferencias de calor entre ellos. El intercambiador de calor de TecQuipment [24]. está en dos partes iguales unidas por tubos intermedios, esto permite dos puntos de medición adicionales en el punto medio (más los cuatro puntos estándar en los conectores). Esto da resultados de experimentos más útiles, para mostrar más claramente cómo las temperaturas del fluido cambian durante la transferencia de calor.

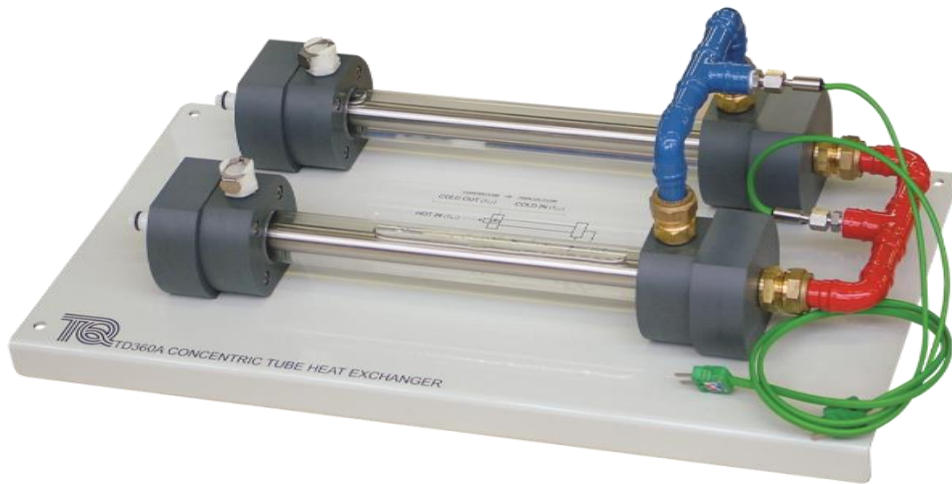


Figura 3.3-2 Intercambiador de calor de tubos concéntricos TD360a [24].

Tabla 3.3-2	
Características técnicas TD360a.	
Intercambiador de calor	Detalles
Intercambiador de calor de tubo concéntrico (TD360a)	<p>Dimensiones netas : 500 mm de ancho x 260 mm de adelante hacia atrás x 160 mm de alto y 3,5 kg</p> <p>Tubo exterior (carcasa): Acrílico transparente, 30 mm de diámetro exterior y 20 mm de diámetro interior.</p> <p>Tubo interior: Acero inoxidable, 12 mm de diámetro exterior y 10 mm de diámetro interior.</p> <p>Área media de transferencia de calor: 0.02 m^2</p>

Nota. Fuente: TD360 Bench-Top Heat Exchangers User Guide [14].

Para la ejecución de este proyecto se describe la metodología experimental que consta de 3 etapas importantes en relación con el cumplimiento de los objetivos, se tiene:

Objetivo específico #1: Cuantificar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura del intercambiador de tubo concéntrico, con el propósito de garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales.

Etapa 1: Cuantificación del error sistemático y la incertidumbre en la medición de temperatura

- Preparación de los instrumentos y equipos:

Se prepararon los termómetros y el intercambiador de tubo concéntrico para la calibración y la toma de medidas. Se verificó el estado de los termómetros y se aseguró que se encontraran en buenas condiciones y limpios antes de iniciar la calibración.

- Calibración de los termómetros:

Se realizó la calibración de los termómetros utilizando un equipo de calibración con trazabilidad a un patrón nacional o internacional. Se registró la temperatura de referencia y se comparó con la medida obtenida por los termómetros.

- Determinación de la incertidumbre en las mediciones:

Se tomaron medidas repetidas de temperatura en varios puntos del intercambiador de tubo concéntrico utilizando los termómetros calibrados. Se registró la temperatura y se calculó la media y la desviación estándar de las mediciones. Posteriormente se calculó la incertidumbre asociada a las mediciones utilizando la fórmula correspondiente.

- Análisis de resultados:

Se comparó el valor de la incertidumbre obtenido en la calibración y en las mediciones repetidas del intercambiador de tubo concéntrico, con el objetivo de evaluar la precisión del sensor y determinar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura.

- Validación de resultados:

Se verificó que los resultados obtenidos fueran confiables y reproducibles. En caso de ser necesario, se repitió la calibración y la toma de medidas para confirmar los resultados obtenidos.

Finalizada esta etapa se pudo cuantificar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura del intercambiador de tubo concéntrico, lo que garantizó la confiabilidad de los resultados experimentales.

Objetivo específico #2: Evaluar el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, con el fin de conocer el impacto en la eficiencia térmico del equipo.

Etapa 2: Evaluación del efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador

- Preparación de los instrumentos y equipos:

Se preparó el intercambiador de tubo concéntrico, el módulo, suministro de agua y los sensores de temperatura y caudal para la evaluación del efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador. Se aseguró que los instrumentos y equipos se encontraran en buen estado y limpios antes de su uso.

- Establecimiento de condiciones de operación:

Se establecieron las condiciones de operación del intercambiador de tubo concéntrico, las cuales consistieron en variar el flujo y la temperatura del fluido que circulaba por los tubos interno y externo del intercambiador. Se tomaron medidas de temperatura y caudal en cada punto de la operación.

- Toma de medidas:

Se tomaron medidas de la temperatura de entrada y salida de los fluidos, así como del caudal que circulaba por los tubos interno y externo del intercambiador. Se repitió el proceso para diferentes combinaciones de flujo y temperatura del fluido.

- Cálculo de la eficiencia térmica:

Se calculó la eficiencia térmica del intercambiador de tubo concéntrico en cada una de las condiciones de operación evaluadas, utilizando la fórmula correspondiente.

- Análisis de resultados:

Se analizaron los resultados obtenidos y se evaluó el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la eficiencia térmica del intercambiador. Se compararon los valores obtenidos para determinar la influencia de cada uno de los parámetros evaluados en la operación del intercambiador.

- Validación de resultados:

Se verificó que los resultados obtenidos fueran confiables y reproducibles. En caso de ser necesario, se repitió la evaluación para confirmar los resultados obtenidos.

Finalizada esta etapa se pudo evaluar el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador de tubo concéntrico y conocer el impacto en la eficiencia térmica del equipo, lo que permitió mejorar su desempeño y eficiencia energética.

Objetivo específico #3: Desarrollar las guías de laboratorio en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, para fines académicos en la UAN-Sede Puerto Colombia.

Etapa 3: Desarrollo de guías de laboratorio

Se desarrollaron guías de laboratorio detalladas para el uso del intercambiador de calor de tubos concéntricos en futuros estudios académicos.

Se incluyó información sobre las condiciones de operación adecuadas, cómo realizar mediciones precisas de temperatura y flujo, y cómo evaluar la eficiencia térmica del intercambiador.

Estas guías se basaron en los resultados obtenidos en la Etapa 1 y 2 del proyecto, y se redactaron de manera clara y concisa para facilitar la comprensión por parte de los estudiantes y profesores de la UAN-Sede Puerto Colombia.

Con la creación de estas guías, se espera que el intercambiador de calor de tubos concéntricos pueda utilizarse de manera eficiente en futuros estudios académicos y que los estudiantes puedan adquirir una comprensión más profunda de los principios fundamentales de la transferencia de calor.

5. Resultados y discusión

En esta sección, se consolida el desarrollo de los objetivos específicos originalmente formulados, ofreciendo un análisis detallado y proporcionando una respuesta integral a la solución de estos. Para respaldar y enriquecer este análisis, se presentarán gráficas, tablas y cálculos pertinentes, que permitirán visualizar de manera visual y cuantitativa los resultados obtenidos.

Posteriormente, en las secciones subsiguientes, se describirá en detalle el análisis de los resultados obtenidos a través de las diferentes herramientas utilizadas. Estas herramientas incluirán tanto análisis estadísticos como técnicas de visualización de datos. Se presentarán gráficas que ilustrarán las tendencias identificadas, tablas que mostrarán los datos recopilados y los cálculos realizados, y se llevará a cabo una discusión exhaustiva sobre el desarrollo del proyecto de grado.

Estas representaciones visuales y numéricas, junto con los análisis correspondientes, permitirán una comprensión más precisa de los hallazgos y resultados obtenidos en el marco de este proyecto. Además, facilitarán la identificación de patrones, tendencias y conclusiones relevantes, promoviendo así un enfoque riguroso y fundamentado en la toma de decisiones y la evaluación crítica de los resultados obtenidos.

5.1 Efecto de la variación del flujo volumétrico

En el marco del proyecto realizado en el laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos, se llevaron a cabo una serie de cálculos y mediciones con el objetivo de obtener datos relevantes sobre el intercambiador de tubos concéntricos.

A continuación, se detallan las actividades realizadas y los resultados obtenidos:

Cálculo del cambio de temperatura y temperatura promedio: Mediante análisis y aplicando las ecuaciones pertinentes, se determinó el cambio de temperatura (ΔT) para cada uno de los circuitos del intercambiador. Además, se calculó la temperatura promedio en cada circuito, tomando en cuenta los valores obtenidos en las mediciones realizadas en el laboratorio.

Cálculo de la densidad y capacidad calorífica específica del agua: Utilizando las ecuaciones disponibles, se llevaron a cabo los cálculos necesarios para determinar la densidad del agua en cada circuito, considerando la temperatura de cada

calentador. Asimismo, se determinó la capacidad calorífica específica del agua para cada circuito a las respectivas temperaturas de los calentadores.

Cálculo de potencia emitida, potencia absorbida y eficiencias: Se procedió al cálculo de la potencia emitida y la potencia absorbida por el sistema en estudio. Además, se calcularon las eficiencias de temperatura media para los sistemas de flujo paralelo y contraflujo, considerando todas las temperaturas del calentador.

Estos cálculos permitieron evaluar el rendimiento y la eficiencia energética del sistema.

Gráficos del coeficiente de balance de energía: Para visualizar de manera clara la relación entre el coeficiente de balance de energía y la temperatura del calentador, se generaron gráficos que representan esta relación. Estos gráficos proporcionan información importante para comprender el comportamiento térmico del sistema y realizar análisis adicionales.

Adjunto se encuentran las Tabla 5.1-1 y Tabla 5.1-2 que contienen los datos de temperatura tomados del intercambiador de tubos concéntricos en función del flujo volumétrico, obtenidos durante las mediciones en el laboratorio. Estos datos son fundamentales para realizar los cálculos mencionados anteriormente y para respaldar los resultados obtenidos en el proyecto.

Tabla 5.1-1

Datos experimentales 1

Intercambiador de calor:		TD360a						
Conexión (paralelo o contraflujo):		Paralelo						
Temperatura ambiente (°C):		32						
Temperatura tanque calentador (°C):		60						
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo frío (L/min)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)
1	3	3	60.3	55.7	57.7	33.2	38.1	36
2	3	2	60	54.3	56.8	33.2	37.1	35.4
3	3	1	60.8	52.7	56.1	33.2	35.8	34.8
4	3	0.5	60.5	50.3	54.6	33.2	35	34.3

Tabla 5.1-2								
Datos experimentales 2								
Intercambiador de calor:						TD360a		
Conexión (paralelo o contraflujo):						Contraflujo		
Temperatura ambiente (°C):						32		
Temperatura tanque calentador (°C):						60		
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo frío (L/min)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)
1	3	3	61.6	56.7	59.1	32.8	37.8	35.2
2	3	2	61.4	55.2	57.9	32.8	36.9	34.7
3	3	1	59.9	51.9	55.3	33	35.7	34.2
4	3	0.5	60	49.7	53.8	33.1	34.8	33.8

En conclusión, los cálculos realizados y los datos recopilados en el laboratorio de Ingeniería Térmica y Termofluidos proporcionaron información crucial para analizar el desempeño del intercambiador de tubos concéntricos. Los resultados obtenidos permiten evaluar la eficiencia térmica del sistema, así como comprender su comportamiento bajo diferentes condiciones de temperatura.

5.1.1 Análisis de la variación del flujo volumétrico en paralelo

Realizando un análisis de los resultados obtenidos véase Tabla 5.3-1 Anexo A, y del Comportamiento de las temperaturas (TH y TC) véase Figura 1.10-1 se puede evidenciar lo siguiente:

Para el fluido caliente (TH), se observa una tendencia descendente en las temperaturas a medida que se avanza desde la posición 1 hasta la posición 3. Esto indica que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la temperatura del fluido caliente también disminuye.

Para el fluido frío (TC), se observa una tendencia ascendente en las temperaturas a medida que se avanza desde la posición 1 hasta la posición 3. Esto indica que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la temperatura del fluido frío aumenta.

En el caso del fluido caliente (TH), se observa que a medida que el flujo del fluido frío disminuye (de la medición 1 a la medición 4), la diferencia de temperatura (ΔT) entre la temperatura de entrada (TH1) y la temperatura de salida (TH2) del fluido caliente aumenta. Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una mayor diferencia de temperatura (ΔT) en el fluido caliente.

En el caso del fluido frío (TC), se observa que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la diferencia de temperatura (ΔT) entre la temperatura de entrada (TC1) y la temperatura de salida (TC2) del fluido frío disminuye. Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una menor diferencia de temperatura (ΔT) en el fluido frío.

En general, se puede concluir que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la diferencia de temperatura (ΔT) entre el fluido caliente y el fluido frío aumenta para el fluido caliente (TH), mientras que disminuye para el fluido frío (TC). Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una mayor transferencia de calor desde el fluido caliente hacia el fluido frío, lo que resulta en un mayor cambio de temperatura en el fluido caliente y un menor cambio de temperatura en el fluido frío.

Además, se puede observar que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, tanto el coeficiente de transferencia de calor como la eficiencia de temperatura se ven afectados véase Figura 1.10-2. La disminución en el coeficiente de transferencia de calor indica una menor tasa de transferencia de calor, mientras que el aumento en la eficiencia de temperatura indica una mayor capacidad del intercambiador de calor para aprovechar la diferencia de temperatura entre los fluidos.

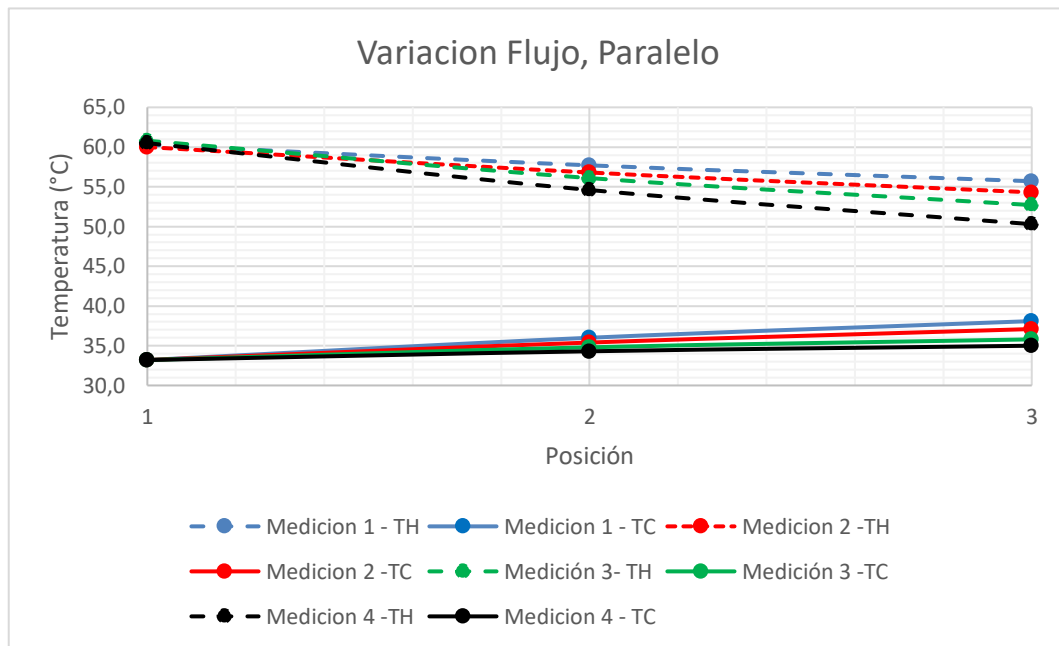


Figura 5.1-1 Variación flujo, paralelo.

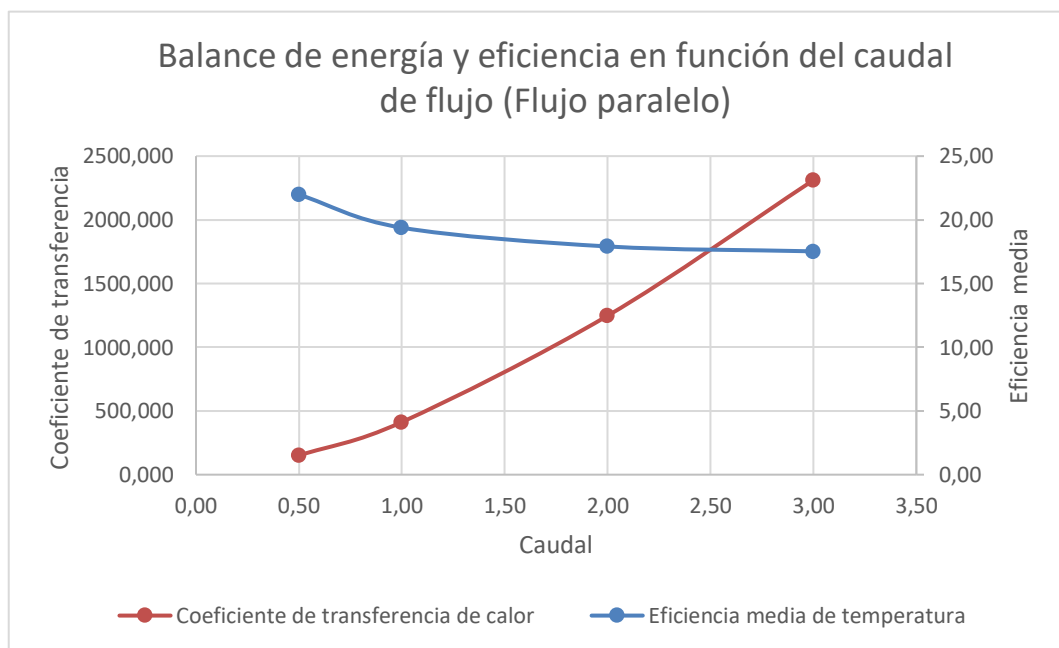


Figura 5.1-2 Balance de energía y eficiencia en función del caudal de flujo (Flujo paralelo).

5.1.2 Análisis de la variación del flujo volumétrico en contraflujo

Realizando un análisis de los resultados obtenidos véase Tabla 5.3-2 Anexo A, y del Comportamiento de las temperaturas (TH y TC) véase Figura 1.10-3 se puede evidenciar lo siguiente:

Para el fluido caliente (TH), se observa una tendencia descendente en las temperaturas a medida que se avanza desde la posición 1 (TH2) hasta la posición 3 (TH1). Esto indica que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la temperatura del fluido caliente también disminuye.

Para el fluido frío (TC), se observa una tendencia descendente en las temperaturas a medida que se avanza desde la posición 1 (TC2) hasta la posición 3 (TC1). Esto indica que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la temperatura del fluido frío aumenta.

En el caso del fluido caliente (TH), se observa que a medida que el flujo del fluido frío disminuye (de la medición 1 a la medición 4), la diferencia de temperatura (ΔT) entre la temperatura de entrada (TH2) y la temperatura de salida (TH1) del fluido caliente aumenta. Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una mayor diferencia de temperatura (ΔT) en el fluido caliente.

En el caso del fluido frío (TC), se observa que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la diferencia de temperatura (ΔT) entre la temperatura de entrada (TC2) y la temperatura de salida (TC1) del fluido frío disminuye. Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una menor diferencia de temperatura (ΔT) en el fluido frío.

En general, se puede concluir que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, la diferencia de temperatura (ΔT) entre el fluido caliente y el fluido frío aumenta para el fluido caliente (TH) y disminuye para el fluido frío (TC). Esto indica que, a menor flujo del fluido frío, se produce una transferencia de calor más intensa desde el fluido caliente al fluido frío, lo que resulta en un mayor cambio de temperatura en el fluido caliente y un menor cambio de temperatura en el fluido frío.

Dado que el análisis se realiza en contraflujo, la posición 1 representa la temperatura de salida del fluido frío (TC2), la posición 2 representa la temperatura media del fluido frío (TC3), y la posición 3 representa la temperatura de entrada del fluido frío (TC1). Esto es contrario a la configuración en paralelo, donde la posición 1 representa la temperatura de entrada del fluido caliente.

Además, se puede observar que a medida que el flujo del fluido frío disminuye, tanto el coeficiente de transferencia de calor como la eficiencia de temperatura se ven afectados véase Figura 1.10-4. La disminución en el coeficiente de transferencia de calor indica una menor tasa de transferencia de calor, mientras

que el aumento en la eficiencia de temperatura indica una mayor capacidad del intercambiador de calor para aprovechar la diferencia de temperatura entre los fluidos.

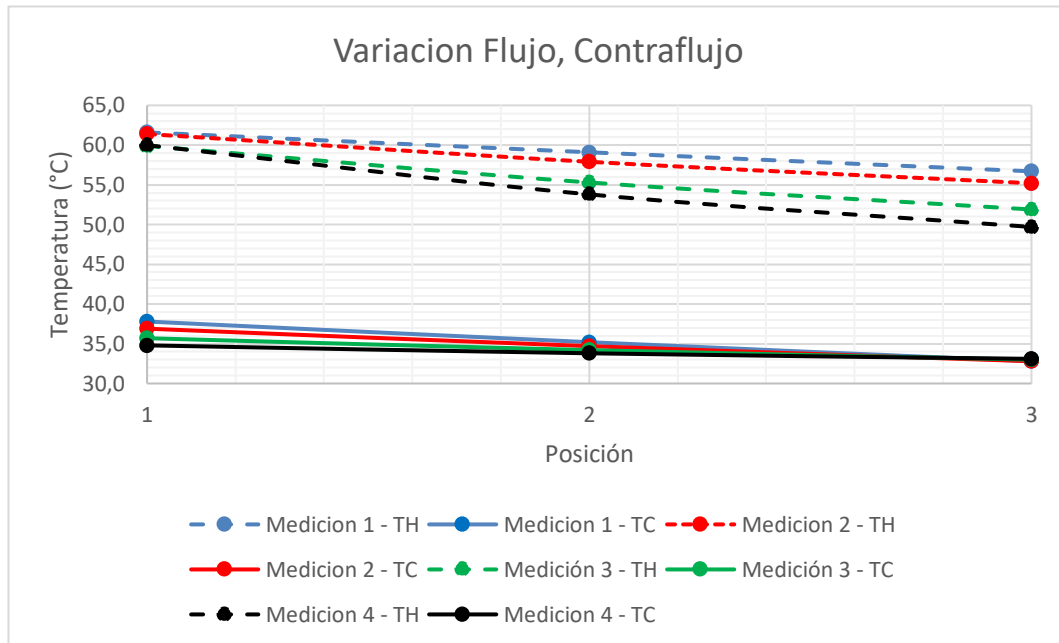


Figura 5.1-3 Variación flujo, contraflujo.

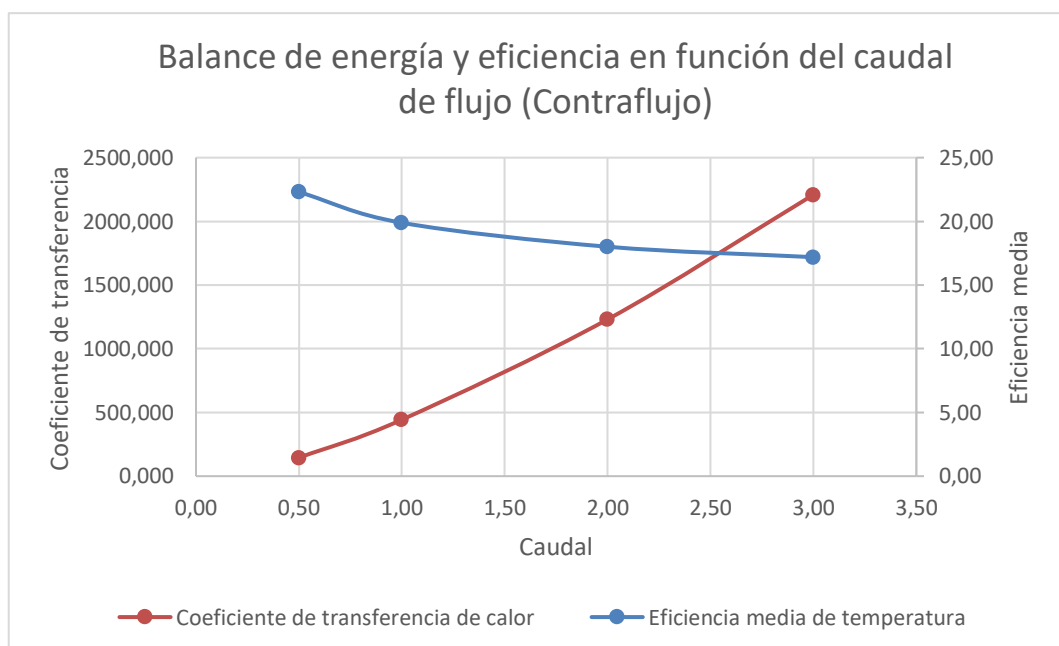


Figura 5.1-4 Balance de energía y eficiencia en función del caudal de flujo (Contraflujo).

5.2 Efecto de la variación de la temperatura

En el marco de este experimento de variación de temperatura, se realizaron cálculos y se obtuvieron datos de temperatura del intercambiador de tubos concéntricos ubicado en el laboratorio de ingeniería térmica y termofluidos.

A continuación, se detallan las actividades realizadas y los resultados obtenidos:

Se determinó el cambio de temperatura (ΔT) y la temperatura promedio para cada uno de los circuitos. Además, se utilizaron gráficos o ecuaciones para calcular la densidad del agua en cada circuito a la temperatura de cada calentador, así como la capacidad calorífica específica para cada circuito a la temperatura de cada calentador.

Posteriormente, se procedió a calcular la potencia emitida, la potencia absorbida, las eficiencias de temperatura media y el coeficiente de balance de energía para los sistemas de flujo paralelo y contraflujo en todas las temperaturas del calentador. Estos cálculos permitieron analizar y evaluar el rendimiento térmico de los sistemas bajo diferentes condiciones de temperatura.

Adicionalmente, se generaron gráficos del coeficiente de balance de energía, y la eficiencia media de temperatura en función de la temperatura del calentador. Estos gráficos proporcionan una visualización clara y comprensible de cómo varía la eficiencia energética en relación con la temperatura en el sistema de intercambio de calor.

Adjunto se encuentran las Tabla 5.2-1 y Tabla 5.2-2 que contienen los datos de temperatura tomados del intercambiador de tubos concéntricos en función de la variación de la temperatura, obtenidos durante las mediciones en el laboratorio. Estos datos son fundamentales para realizar los cálculos mencionados anteriormente y para respaldar los resultados obtenidos en el proyecto.

Tabla 5.2-1

Datos experimentales 3

Intercambiador de calor:	TD360a
Conexión (paralelo o contraflujo):	Paralelo
Flujo caliente (L/m):	3
Flujo frío (L/m):	2

Prueba	Temperatura del calentador	TH1 (°C)	TH2 (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)
1	30	35	34.8	34.9	33.4	33.7	33.6
2	40	41	40	40.4	33.8	35.4	34.7
3	50	50.2	47.7	48.7	32.8	36.5	34.9
4	60	60.2	56	57.6	32.7	39.1	36.4

Tabla 5.2-2

Datos experimentales 4

Intercambiador de calor:		TD360a					
Conexión (paralelo o contraflujo):		Contraflujo					
Flujo caliente (L/m):		3					
Flujo frío (L/m):		2					
Prueba	Temperatura del calentador	TH1 (°C)	TH2 (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)
1	30	35.2	35.1	35	33.3	33.7	33.4
2	40	41	40.1	40.4	34.1	35.6	34.8
3	50	49	46.5	47.6	32.8	36.3	34.5
4	60	59.7	55.9	57.8	32.6	38.8	35.8

5.2.1 Análisis de la variación de la temperatura en paralelo

Realizando un análisis de los resultados obtenidos véase Tabla 5.3-1 Anexo B y del Comportamiento de las temperaturas (TH y TC) véase Figura 1.11-1 se puede evidenciar lo siguiente:

Al observar el comportamiento de las temperaturas TH y TC en el gráfico, se puede notar que la temperatura del fluido caliente, representada por la recta

descendente TH, disminuye a medida que se incrementa la temperatura inicial TH. Por otro lado, la temperatura del fluido frío, representada por la recta ascendente TC, aumenta a medida que se incrementa la temperatura inicial TH. Esto indica una transferencia de calor desde el fluido caliente hacia el fluido frío.

En cuanto a la comparativa entre las mediciones, se puede apreciar que a medida que la temperatura inicial TH aumenta, la temperatura de salida TH2 disminuye. Esto implica una mayor diferencia de temperatura (ΔT) entre la entrada (TH1) y la salida (TH2) del fluido caliente. Por otro lado, la temperatura de salida TC2 aumenta a medida que la temperatura inicial TH aumenta. Estas diferencias en las temperaturas de salida entre las mediciones reflejan cómo varía la transferencia de calor en función de la temperatura inicial TH.

En general, se puede concluir que a medida que la temperatura inicial TH aumenta, se obtiene una mayor eficiencia de temperatura media véase Figura 1.11-2. Esto se debe a que una temperatura inicial más alta proporciona una mayor diferencia de temperatura (ΔT) entre los fluidos, lo que favorece una transferencia de calor más eficiente.

Además, se observa que a medida que la temperatura inicial TH aumenta, el coeficiente de transferencia de calor también tiende a aumentar véase Figura 1.11-2. Esto indica una mayor capacidad de transferencia de calor entre los fluidos a temperaturas iniciales más altas.

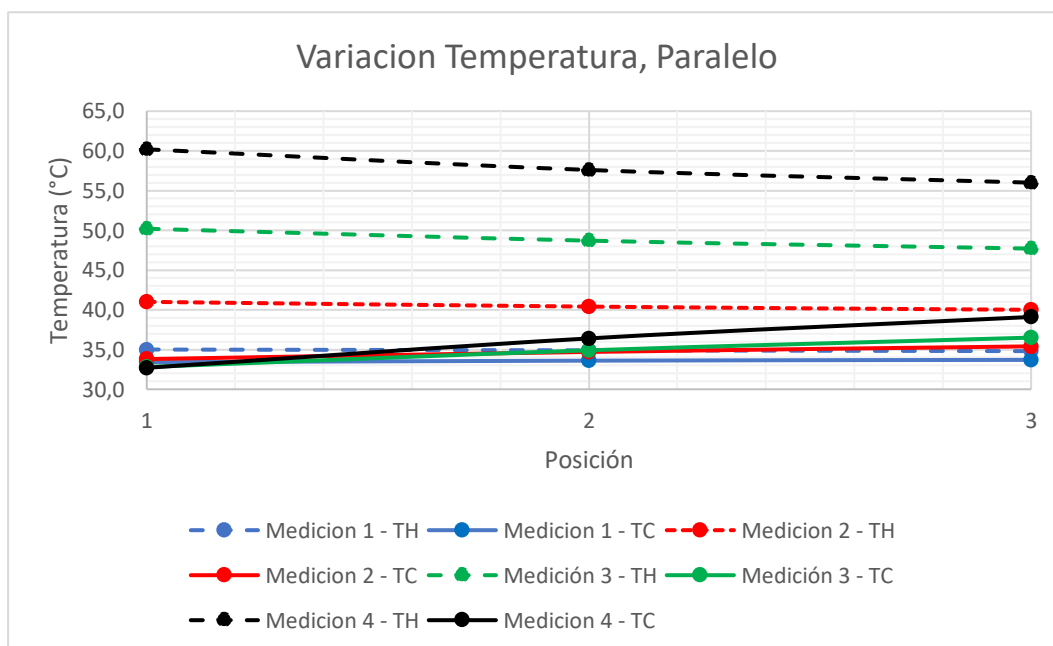


Figura 5.2-1 Variación temperatura, paralelo.

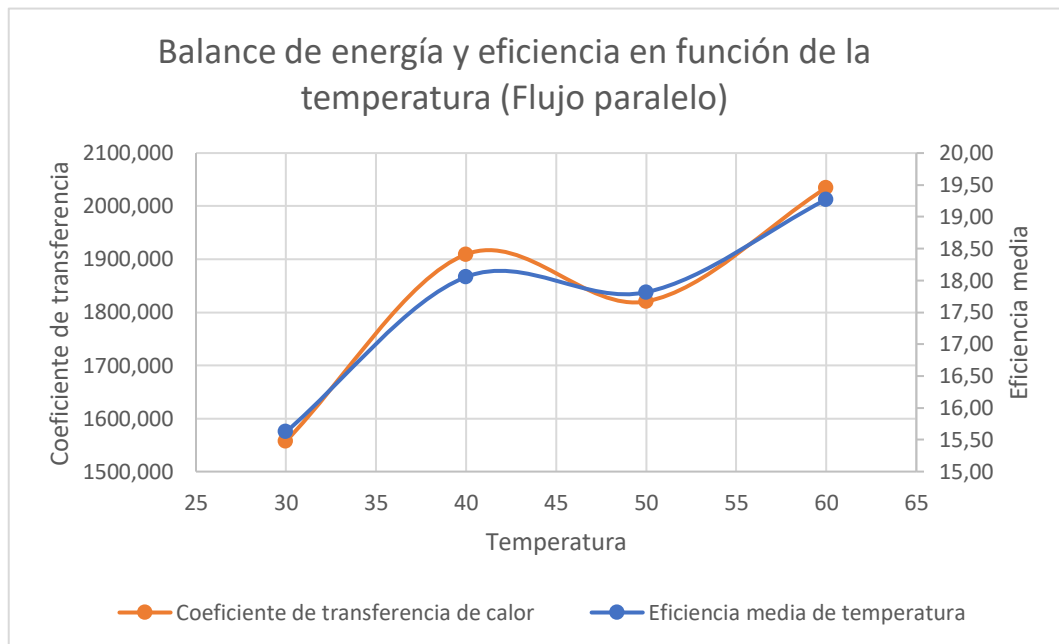


Figura 5.2-2 Balance de energía y eficiencia en función de la temperatura (Flujo paralelo)

5.2.2 Análisis de la variación de la temperatura en contraflujo

Realizando un análisis de los resultados obtenidos véase Tabla 5.3-2 Anexo B y del Comportamiento de las temperaturas (TH y TC) véase Figura 1.11-3, se puede evidenciar lo siguiente:

Se observa que la temperatura inicial TH1 se representa mediante la posición 1, y a medida que se incrementa la temperatura inicial, la temperatura de salida TH2 disminuye. Por otro lado, la temperatura inicial TC2 se representa mediante la posición 1, y la temperatura de salida TC1 posición 3 aumenta.

En el gráfico, se puede apreciar que las temperaturas TH y TC siguen un comportamiento descendente a medida que se avanza en las mediciones. Esto indica una transferencia de calor del fluido caliente al fluido frío en el intercambiador de tubos concéntricos en contraflujo.

Al comparar las diferentes mediciones, se puede observar que a medida que la temperatura inicial TH1 aumenta, la temperatura de salida TH2 presenta una

disminución más pronunciada. Por otro lado, la temperatura de salida TC2 aumenta a medida que se incrementa la temperatura inicial TH.

Estos resultados indican que a mayor diferencia de temperatura (ΔT) entre los fluidos en la entrada del intercambiador, se produce una transferencia de calor más eficiente, lo que se refleja en las variaciones de temperatura observadas en las mediciones.

En general, se puede concluir que, en el caso de contraflujo en un intercambiador de tubos concéntricos, a medida que la temperatura inicial TH aumenta, se obtiene una mayor eficiencia de temperatura media. Esto significa que se logra una mayor transferencia de calor entre los fluidos cuando la diferencia de temperatura (ΔT) es mayor.

Con un aumento en la temperatura inicial TH, se logra evidenciar una mayor eficiencia de temperatura media en el intercambiador de calor en contraflujo véase Figura 1.11-4. Esto se debe a que una mayor diferencia de temperatura (ΔT) permite una transferencia de calor más eficiente entre los fluidos.

Asimismo, se logra apreciar un incremento en la temperatura inicial TH también resulta en un mayor coeficiente de transferencia de calor véase Figura 1.11-4. Esto indica una mayor facilidad para que el calor se transfiera entre los fluidos en el intercambiador de calor.

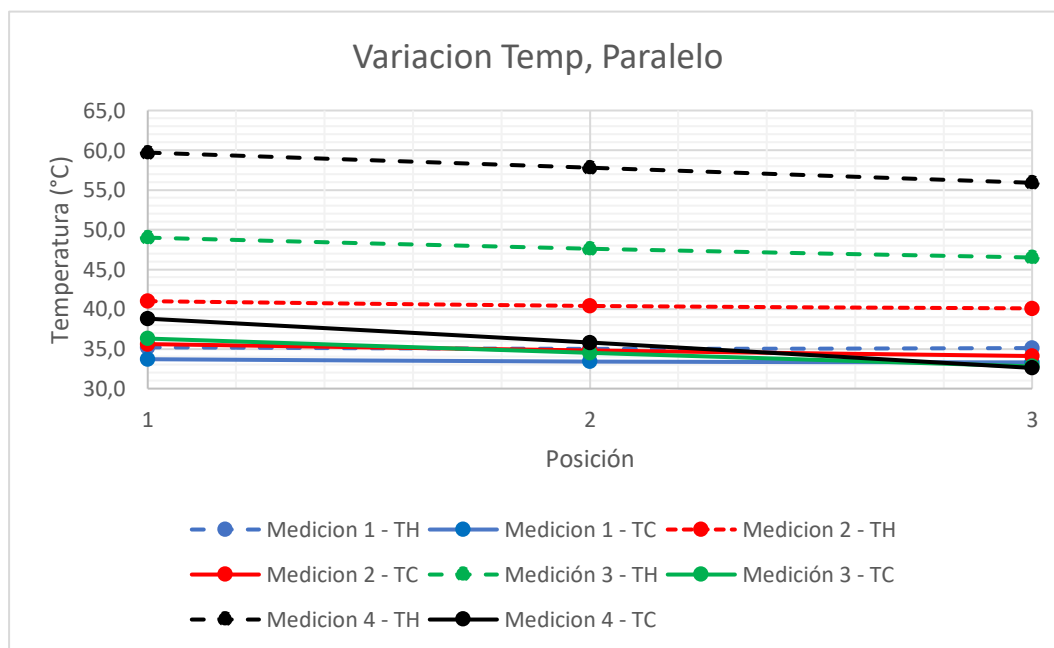


Figura 5.2-3 Variación temperatura, Contraflujo.

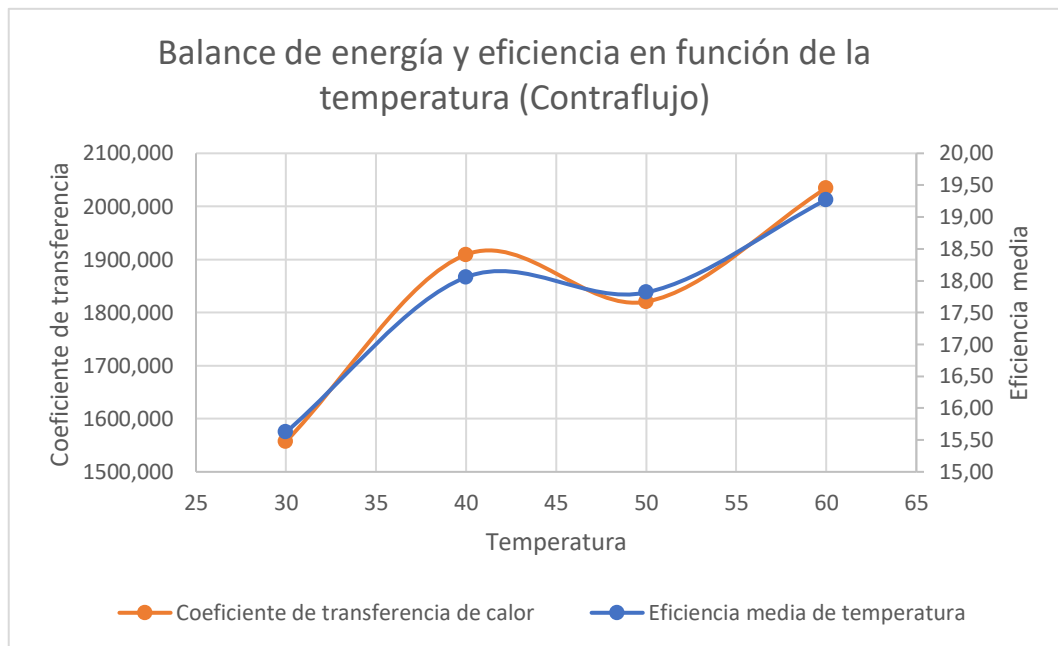


Figura 5.2-4 Balance de energía y eficiencia en función de la temperatura (Contraflujo).

5.3 Guías de laboratorios en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador

La transferencia de calor es un fenómeno fundamental en el campo de la ingeniería, y su comprensión y aplicación son de gran importancia en diversas áreas, incluyendo la industria, la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías. Uno de los dispositivos utilizados para facilitar la transferencia de calor eficiente es el intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Los intercambiadores de calor de tubos concéntricos son ampliamente utilizados debido a su diseño eficiente y versatilidad. Estos dispositivos consisten en tubos concéntricos colocados uno dentro del otro, creando así un espacio entre ellos. A través de estos tubos, se hacen pasar dos fluidos, uno en el espacio anular entre los tubos y otro en el interior del tubo más pequeño. Esto permite el intercambio de calor entre los fluidos, ya sea mediante transferencia de calor por conducción o por convección.

La importancia de la transferencia de calor adicional en los intercambiadores de calor de tubos concéntricos radica en su capacidad para optimizar la eficiencia de transferencia de calor. Estos dispositivos permiten alcanzar altos coeficientes de

transferencia de calor, lo que significa que se puede lograr una transferencia de calor más rápida y eficiente entre los fluidos.

En el ámbito académico, el estudio de los intercambiadores de calor de tubos concéntricos y la transferencia de calor adicional es de gran relevancia, especialmente en el campo de la ingeniería. La Universidad Antonio Nariño (UAN), sede Puerto Colombia, reconoce esta importancia y busca desarrollar guías de laboratorio que permitan a los estudiantes adquirir conocimientos prácticos en este tema.

Estas guías de laboratorio brindan a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con los principios y conceptos de la transferencia de calor adicional en intercambiadores de calor de tubos concéntricos. A través de experimentos y prácticas guiadas, los estudiantes pueden explorar y comprender el comportamiento de los fluidos, los efectos de los diferentes parámetros de operación y las técnicas de medición y análisis utilizadas en este campo.

El desarrollo de guías de laboratorio específicas para intercambiadores de calor de tubos concéntricos en la Universidad Antonio Nariño, sede Puerto Colombia, contribuye a fortalecer la formación académica de los estudiantes de ingeniería. Estas guías permiten aplicar los conocimientos teóricos en un entorno práctico, fomentando el desarrollo de habilidades experimentales, el análisis crítico de los resultados y la comprensión de los fenómenos de transferencia de calor.

Teniendo todo esto en cuenta se desarrollan las guías de laboratorio en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador véase guías en el Anexo C: Guía de Laboratorio del intercambiador de calor de tubos

6. Conclusiones y recomendaciones

En este proyecto de grado, teniendo en cuenta el objetivo general, se logró analizar de manera exhaustiva los efectos de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Mediante la recopilación de datos experimentales y su posterior análisis, se pudo determinar la influencia de estos parámetros en la eficiencia térmica del equipo.

En relación con el primer objetivo específico: Cuantificar el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura del intercambiador de calor doble tubo, con el propósito de garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales, se cuantificó el error sistemático y la incertidumbre asociada a la medición de temperatura del intercambiador de calor doble tubo. Esto fue fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos. La precisión en la medición de temperatura es crucial para obtener conclusiones confiables y consistentes.

En relación con el segundo objetivo específico: Evaluar el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, con el fin de conocer el impacto en la eficiencia térmica del equipo se evaluó el efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, Se pudo comprobar que tanto el flujo volumétrico como la temperatura del fluido influyen directamente en la eficiencia térmica del equipo. A medida que el flujo y la temperatura se modifican, se observan cambios en la transferencia de calor y, por lo tanto, en la eficiencia del intercambiador.

En relación con el primer objetivo específico: Desarrollar las guías de laboratorio en cuanto al efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador, para fines académicos en la UAN-Sede Puerto Colombia, se logró desarrollar las guías de laboratorio pertinentes para el estudio del efecto del flujo y la temperatura del fluido en la operación del intercambiador de calor de tubos

concéntricos. Estas guías proporcionan una base teórica y práctica para los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño, sede Puerto Colombia, y les permiten adquirir conocimientos y habilidades en el área de transferencia de calor.

Recomendaciones:

- Se sugiere realizar investigaciones adicionales para profundizar en el análisis de otros parámetros relevantes en la operación del intercambiador de calor de tubos concéntricos. Esto podría incluir el estudio de la geometría de los tubos, los materiales utilizados y las condiciones de operación específicas.
- Es recomendable continuar mejorando la precisión de las mediciones de temperatura, buscando métodos y equipos más precisos y confiables. Esto contribuirá a reducir aún más el error sistemático y la incertidumbre asociada a las mediciones.
- Se sugiere promover la divulgación de los resultados obtenidos en esta investigación a través de publicaciones académicas o presentaciones en conferencias. Esto permitirá compartir los conocimientos adquiridos y contribuir al avance del campo de la transferencia de calor.
- Es importante fomentar la continuidad de la implementación de las guías de laboratorio desarrolladas en la Universidad Antonio Nariño, sede Puerto Colombia. Estas guías brindan una valiosa herramienta educativa para los estudiantes y deben ser actualizadas y adaptadas de acuerdo con los avances tecnológicos y científicos en el campo de los intercambiadores de calor.

En general, la realización de esta tesis proporcionó un sólido análisis de los efectos de la variación del flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Los resultados obtenidos y las guías de laboratorio desarrolladas contribuirán al crecimiento académico y al avance de la investigación en el campo de la transferencia de

Este trabajo de grado, la consolidación de los objetivos originalmente formulados permitió obtener el objetivo general perseguido en la investigación: *Realizar la instrumentación y evaluación termo-mecánica de un motor de combustión interna monocilíndrico para fines investigativos.*

En relación con el primer objetivo específico – *Implementar un sistema de control y medición de RPM que permita el ajuste manual de la velocidad de rotación del motor*– se instaló al sistema del motor de combustión interna un medidor de RPM analógico. Para la instalación se realizó una compleja instalación eléctrica que permitiera conectar el instrumento de medición y respondiera al aumento y disminución de las revoluciones aplicadas al motor. Este instrumento permite medir con alta confiabilidad las revoluciones a las cuales está operando el motor y, consecuentemente, evaluar el punto de RPM cuya eficiencia térmica es considerada la mayor en todo el proceso.

Considerando el segundo objetivo específico – *Cuantificar y definir la curva de rendimiento del consumo específico de combustible a partir de distintos valores de RPM*– se estableció la curva de rendimiento del motor de combustión tanto en gramos para el caso del consumo específico de combustible, como en mililitro para el caso del consumo volumétrico. Los resultados consolidados confirmaron que el consumo específico de combustible es mayor cuando el motor funciona a 2000 RPM siendo igual a 2.39 g lo que equivale a 3,47 ml.

Finalmente, en relación con el tercer objetivo específico – *Realizar las guías de laboratorios para ser implementadas en el desarrollo del curso de máquinas térmicas la UAN-Sede Puerto Colombia*– se desarrolló una guía práctica de laboratorio a partir de toda la experiencia aprendida. Esa guía constituye un aporte significativo al Programa de Ingeniería Mecánica de la UAN en el marco del proceso de renovación del registro calificado ante el Ministerio de Educación Nacional de Colombia. En la guía desarrollada se consolidan los principales aportes experimentales en el motor de combustión y será de gran utilidad para los futuros estudiantes que empiezan a tener sus primeras experiencias académica y científica en la operación de un motor de combustión interna.

A partir de la experiencia aprendida se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar un mantenimiento preventivo al motor de combustión interna de forma periódica, principalmente, en la recarga de la batería del sistema de medición de RPM. Esto debido a que el motor no cuenta con una bobina de recarga que permita alimentar de energía eléctrica la batería durante la operación del motor.
- Evaluar la eficiencia térmica mediante el uso de otros combustibles y/o aditivos.

Bibliografía

- [1] “Subirtupagina.com. (s. f.). Historia de los Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente. Historia de los Intercambiadores de Calor | Alfa de Occidente. Recuperado 15 de abril de 2020, de <https://alfadeoccidente.mx/seccion/?p=32>”.
- [2] “T. W. Choon, M. S. Shariff, M. Law and L. E. Aik, ‘Computational fluid dynamics analysis of shelland-double concentric-tube heat exchanger,’ 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Langkawi, Malaysia, 2011, pp. 535-538, doi: 10.1109/ISIEA.2011.6108769”.
- [3] “Gu, J., Li, J., Zhang, Y., Li, J., Li, W., & Wu, H. (2019). Investigation on heat transfer and pressure drop of a concentric-tube heat exchanger for seawater cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114093. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114093”.
- [4] “Cao, X., Li, H., Feng, J., Liu, C., & Chen, Z. (2017). Experimental study on heat transfer characteristics of a novel concentric-tube heat exchanger for ammonia synthesis gas. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1198-1208. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.032”.
- [5] “Lee, Y., Lee, T., Lee, C., Lee, C., & Lee, K. (2012). Effect of inlet velocity and temperature on the heat transfer and pressure drop characteristics of a concentric tube heat exchanger. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(5), 1505-1510. doi: 10.1007/s12206-012-0316-2”.
- [6] “Y. A. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, 4ta Edición. Madrid, España: McGraw Hill Education, 2013.”.
- [7] “Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.”.
- [8] “Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education.”.

- [9] “Holman, J. P. (2010). *Transferencia de calor*. México, D.F: McGraw-Hill. ”.
- [10] “Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, ‘Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications,’ 4th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, Table 1-1.”.
- [11] “Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, 4ta ed. México: McGraw Hill, 2012, p. 16, Fig. 1-23.”.
- [12] “Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley. ”.
- [13] “Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, ‘Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications,’ 4th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, Table 1-4.”.
- [14] “Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, ‘Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications,’ 4th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, Table 1-5.”.
- [15] “Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. Wiley.”.
- [16] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 11-7.”.
- [17] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 11-8.”.
- [18] “‘Wilhelm Nusselt,’ Thermopedia. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermopedia.com/content/992/>. [Accedido: 19-mayo-2023].”.
- [19] “‘Osborne Reynolds,’ Encyclopedia Britannica, [En línea]. Disponible en: [<https://www.britannica.com/biography/Osborne-Reynolds>]. [Accedido: 19-mayo-2023].”.
- [20] “Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2014). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico* (4.a ed.). McGraw-Hill. ”.
- [21] “Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, ‘Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications,’ 4th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, Table 1-6.”.
- [22] “‘Calor y calorimetría,’ Universidad de Sevilla, [En línea]. Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa. [Acceso: 14 de mayo de 2023].”.

- [23] “‘Propiedades del agua’ Universidad de Sevilla, [En línea]. Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades_del_agua. [Acceso: 14 de mayo de 2023].”
- [24] “‘TD360 Bench-Top Heat Exchangers User Guide,’ TecEquipment Ltd, 2016.”
- [25] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 1-31.”
- [26] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección,’ Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones, 4th ed., McGraw-Hill Interamericana, 2012, p. 21, Figura 1-34.”
- [27] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural,’ Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones, 4th ed., McGraw-Hill Interamericana, 2012, p. 22, Figura 1-35.”
- [28] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica,’ Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones, 4th ed., McGraw-Hill Interamericana, 2012, p. 24, Figura 1-38.”
- [29] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 11-1.”
- [30] “B. Zohuri, ‘Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation’, Springer, 2017, Fig. 3-34.”
- [31] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 11-4.”
- [32] “Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, ‘Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones,’ 4ta ed., McGraw-Hill Interamericana Editores S.A., 2011, Fig. 11-5.”
- [33] “TecEquipment Ltd, ‘Heat Exchanger Service Module,’ TecEquipment, Disponible en: <https://www.tecequipment.com/es/heat-exchanger-service-module>. [Acceso: 7 de mayo de 2023].”

Anexo A: Efecto de la variación del flujo volumétrico

Tabla 5.3-1																										
Resultados datos experimentales 1																										
Intercambiador de calor:												TD360a														
Conexión (paralelo o contraflujo):												Paralelo														
Temperatura ambiente (°C):												32														
Temperatura tanque calentador (°C):												60														
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo caliente (m ³ /s)	Flujo frío (L/min)	Flujo frío (m ³ /s)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	ΔTH (°C)	Promedio TH (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	ΔTC (°C)	Promedio TC (°C)	TC3 (°C)	ηH	ηC	ρH (kg/m ³)	ρC (kg/m ³)	CpH (kJ/kg·°C)	CpC (kJ/kg·°C)	Qe (Kw)	Qa (Kw)	CEB	η̃	LMTD	U (W/m ² .C)
1	3	0.0000500	3	0.0000500	60.3	55.7	4.6	58.0	57.7	33.2	38.1	4.9	35.7	36.0	16.97	18.08	984.199	993.796	4.1797	4.1783	0.946	1.018	1.075	17.53	22.01	2311.584
2	3	0.0000500	2	0.0000333	60.0	54.3	5.7	57.2	56.8	33.2	37.1	3.9	35.2	35.4	21.27	14.55	984.624	993.970	4.1794	4.1783	1.173	0.540	0.460	17.91	21.65	1247.362
3	3	0.0000500	1	0.0000167	60.8	52.7	8.1	56.8	56.1	33.2	35.8	2.6	34.5	34.8	29.35	9.42	984.822	994.192	4.1793	4.1784	1.667	0.180	0.108	19.38	21.81	412.687
4	3	0.0000500	0.5	0.0000083	60.5	50.3	10.2	55.4	54.6	33.2	35.0	1.8	34.1	34.3	37.36	6.59	985.485	994.328	4.1789	4.1785	2.101	0.062	0.030	21.98	20.72	150.391

Tabla 5.3-2
Resultados datos experimentales 2

Intercambiador de calor:		TD360a																								
Conexión (paralelo o contraflujo):		Contraflujo																								
Temperatura ambiente (°C):		32																								
Temperatura tanque calentador (°C):		60																								
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo caliente (m ³ /s)	Flujo frío (L/min)	Flujo frío (m ³ /s)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	ΔTH (°C)	Promedio TH (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	ΔTC (°C)	Promedio TC (°C)	TC3 (°C)	ηH	ηC	ρH (kg/m ³)	ρC (kg/m ³)	CpH (kJ/kg·°C)	CpC (kJ/kg·°C)	Qe (Kw)	Qa (Kw)	CEB	η̄	LMTD	U (W/m ² ·C)
1	3	0.00005	3	0.00005	61.6	56.7	4.9	59.2	59.1	32.8	37.8	5.0	35.3	35.2	17.01	17.36	983.617	993.918	4.1801	4.1783	1.008	1.038	1.031	17.19	23.50	2209.104
2	3	0.00005	2	0.00003	61.4	55.2	6.2	58.3	57.9	32.8	36.9	4.1	34.9	34.7	21.68	14.34	984.047	994.073	4.1798	4.1784	1.275	0.568	0.445	18.01	23.07	1230.655
3	3	0.00005	1	0.00002	59.9	51.9	8.0	55.9	55.3	33.0	35.7	2.7	34.4	34.2	29.74	10.04	985.241	994.243	4.1791	4.1785	1.647	0.187	0.114	19.89	21.10	443.100
4	3	0.00005	0.5	0.00001	60.0	49.7	10.3	54.9	53.8	33.1	34.8	1.7	34.0	33.8	38.29	6.32	985.752	994.378	4.1788	4.1785	2.122	0.059	0.028	22.30	20.31	144.922

Anexo B: Efecto de la variación de la temperatura

Tabla 5.3-1																											
Resultados datos experimentales 3																											
Intercambiador de calor:										TD360a																	
Conexión (paralelo o contraflujo):										Paralelo																	
Flujo caliente (L/m):										3																	
Flujo frío (L/m):										2																	
Prueba	Temperatura del calentador (°C)	Flujo caliente (L/min)	Flujo caliente (m ³ /s)	Flujo frío (L/min)	Flujo frío (m ³ /s)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	ΔTH (°C)	Promedio TH (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	ΔTC (°C)	Promedio TC (°C)	TC3 (°C)	ηH	ηC	ρH (kg/m ³)	ρC (kg/m ³)	CpH (kJ/kg·°C)	CpC (kJ/kg·°C)	Qe (Kw)	Qa (Kw)	CEB	η̄	LMTD	U (W/m ² .C)
1	30	3	0.00005	2	0.00003	35.0	34.8	0.2	34.9	34.9	33.4	33.7	0.3	33.6	33.6	12.50	18.75	994.056	994.512	4.1784	4.1786	0.042	0.042	1.001	15.63	1.33	1557.415
2	40	3	0.00005	2	0.00003	41.0	40.0	1.0	40.5	40.4	33.8	35.4	1.6	34.6	34.7	13.89	22.22	992.012	994.158	4.1778	4.1784	0.207	0.222	1.069	18.06	5.80	1909.205
3	50	3	0.00005	2	0.00003	50.2	47.7	2.5	49.0	48.7	32.8	36.5	3.7	34.7	34.9	14.37	21.26	988.493	994.141	4.1779	4.1784	0.516	0.512	0.992	17.82	14.07	1820.570
4	60	3	0.00005	2	0.00003	60.2	56.0	4.2	58.1	57.6	32.7	39.1	6.4	35.9	36.4	15.27	23.27	984.148	993.709	4.1797	4.1782	0.864	0.886	1.025	19.27	21.77	2034.590

Tabla 5.3-2																											
Resultados datos experimentales 4																											
Intercambiador de calor:														TD360a													
Conexión (paralelo o contraflujo):														Contraflujo													
Flujo caliente (L/m):														3													
Flujo frío (L/m):														2													
Prueba	Temperatura del calentador (°C)	Flujo caliente (L/min)	Flujo caliente (m ³ /s)	Flujo frío (L/min)	Flujo frío (m ³ /s)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	ΔTH (°C)	Promedio TH (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	ΔTC (°C)	Promedio TC (°C)	TC3 (°C)	ηH	ηC	ρH (kg/m ³)	ρC (kg/m ³)	CpH (kJ/kg·°C)	CpC (kJ/kg·°C)	Qe (Kw)	Qa (Kw)	CEB	ñ	LMTD	U (W/m ² .C)
1	30	3	0.00005	2	0.00003	35.2	35.1	0.1	35.2	35.0	33.3	33.7	0.4	33.5	33.4	5.26	21.05	993.970	994.528	4.1783	4.1786	0.021	0.055	2.668	13.16	1.64	1692.458
2	40	3	0.00005	2	0.00003	41.0	40.1	0.9	40.6	40.4	34.1	35.6	1.5	34.9	34.8	13.04	21.74	991.992	994.073	4.1778	4.1784	0.187	0.208	1.114	17.39	5.61	1849.787
3	50	3	0.00005	2	0.00003	49.0	46.5	2.5	47.8	47.6	32.8	36.3	3.5	34.6	34.5	15.43	21.60	989.023	994.175	4.1778	4.1784	0.517	0.485	0.938	18.52	12.97	1868.774
4	60	3	0.00005	2	0.00003	59.7	55.9	3.8	57.8	57.8	32.6	38.8	6.2	35.7	35.8	14.02	22.88	984.299	993.779	4.1796	4.1783	0.782	0.858	1.098	18.45	21.72	1976.060

Anexo C: Guía de Laboratorio del intercambiador de calor de tubos concéntricos

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
GUÍA DE LABORATORIO

Datos de identificación	
Nombre de la Asignatura: Transferencia de calor	Número de la guía: 1
Unidad temática: Efecto de la variación de flujo volumétrico	Periodo académico de la asignatura: 1er período

Presentación Actividad

Bienvenidos a la guía de laboratorio del intercambiador de tubos concéntricos. En esta actividad práctica, exploraremos los principios fundamentales de transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubos concéntricos y analizaremos sus efectos en el rendimiento térmico del equipo.

Objetivos de la Actividad

Conceptual (plano cognitivo)	Procedimental (plano psicomotor)	Actitudinal (plano subjetivo)
<p>Comprender los principios fundamentales de transferencia de calor y su aplicación en intercambiadores de tubos concéntricos.</p> <p>Identificar y explicar los diferentes modos de transferencia de calor presentes en un intercambiador de tubos concéntricos.</p> <p>Reconocer la importancia de la transferencia de calor en la optimización del rendimiento térmico de los equipos de intercambio de calor.</p>	<p>Realizar la configuración adecuada del intercambiador de tubos concéntricos, incluyendo la conexión de los fluidos de trabajo y la regulación del flujo volumétrico.</p> <p>Utilizar instrumentos de medición de temperatura para tomar mediciones precisas en diferentes puntos del intercambiador.</p> <p>Calcular y analizar los datos recopilados, incluyendo el flujo de calor, la eficiencia térmica y el coeficiente de transferencia de calor.</p> <p>Interpretar los resultados obtenidos y relacionarlos con los conceptos teóricos de transferencia de calor.</p>	<p>Desarrollar una actitud de curiosidad y disposición hacia el aprendizaje de los principios de transferencia de calor en un contexto práctico.</p> <p>Valorar la importancia de la transferencia de calor en la optimización de los procesos de intercambio de energía térmica.</p> <p>Fomentar el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y el respeto hacia los demás participantes durante el desarrollo de la actividad de laboratorio.</p> <p>Promover la ética científica y el rigor experimental en la toma de datos, análisis y conclusiones.</p>

Descripción de la actividad

Para iniciar la experiencia

- Al iniciar la actividad de la guía de laboratorio primeramente se deben abrir la válvulas de suministro de agua, y verificar que el tanque del intercambiador este lleno.
- Se debe verificar y encender los paneles de visualización digital de los equipos de medición: Termómetros.
- Verificar la configuración y acoples rápidos del intercambiador.

Metodología experimental

Familiarización con el equipo: Comenzaremos por familiarizarnos con el intercambiador de tubos concéntricos, identificando sus componentes principales y comprendiendo su funcionamiento.

Configuración experimental: Ajustaremos las condiciones experimentales, como el flujo volumétrico y la temperatura del fluido de trabajo, para realizar una serie de mediciones y recopilar datos.

Mediciones de temperatura: Utilizando termopares u otros dispositivos de medición de temperatura, registraremos las temperaturas en diferentes puntos del intercambiador de calor, incluyendo las temperaturas de entrada y salida de los fluidos.

Análisis de datos: Una vez que hayamos recopilado los datos experimentales, procederemos a analizarlos y calcular variables importantes como el flujo de calor, la eficiencia térmica y el coeficiente de transferencia de calor.

Interpretación de resultados: Comentaremos los resultados obtenidos, identificando patrones y tendencias en la transferencia de calor en función de las condiciones de flujo y temperatura.

Resultados asociados a la experiencia

En el curso de los experimentos, los estudiantes deben aplicar los principios asociados a la transferencia de calor en intercambiadores de calor de tubos concéntricos y responder las siguientes preguntas las cuales deben estar desarrolladas en la sección de **Resultados y Discusión** del informe de laboratorio que debe ser entregado dentro de los 8 días posteriores a la experiencia realizada:

1. Mediciones de temperatura: Registro de las temperaturas del fluido caliente y del fluido frío en diferentes puntos del intercambiador de calor a lo largo del tiempo.
2. Mediciones de caudal: Determinación de los caudales de los fluidos caliente y frío que ingresan y salen del intercambiador de calor.
3. Diferencia de temperatura media logarítmica (DTML): Cálculo de la DTML utilizando las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, lo cual permite evaluar la efectividad del intercambiador de calor.
4. Coeficiente de transferencia de calor (U): Determinación del coeficiente de transferencia de calor a partir de las temperaturas y caudales, utilizando ecuaciones y modelos establecidos.
5. Eficiencia térmica: Cálculo de la eficiencia térmica del intercambiador de calor, que indica qué tan eficientemente se transfiere el calor entre los fluidos.
6. Gráficos y curvas de temperatura: Representación gráfica de las variaciones de temperatura en el intercambiador de calor a lo largo del tiempo, permitiendo visualizar el comportamiento del sistema.
7. Análisis comparativo: Comparación de los resultados obtenidos con los valores teóricos o esperados, identificando posibles desviaciones y analizando las causas subyacentes.

Informe que debe ser entregado al finalizar la experiencia

El informe debe ser presentado en el formato aprobado por el sub-consejo de programa de la FIMEB en la Sede Puerto Colombia para la entrega de los informes de laboratorio. Este informe debe ser enviado a los estudiantes por parte del docente.

El número de personas que hacen parte del informe será definido por el docente responsable por la asignatura.

El informe debe contener:

- Introducción
- Revisión de la literatura
- Objetivos
- Metodología Experimental (debe incluir fotos de las experiencias realizadas)
- Resultados y discusión

- Conclusiones
- Referencias bibliográficas
- Anexos (opcional)
- Apéndices (opcional)

Rúbrica de evaluación

Descripción del ítem	Porcentaje	Nota	Nota parcial	Observación
Uso del formato adecuado	5%			
Introducción	10%			
Revisión de la literatura	10%			
Objetivos	5%			
Metodología Experimental (debe incluir fotos de las experiencias realizadas)	15%			
Resultados y discusión	40%			
Conclusiones	10%			
Uso correcto de la norma IEEE y citación de las referencias bibliográficas	5%			

Asesoría

Para la asesoría personalizada, el profesor informa a los estudiantes de los horarios disponibles para atención en su oficina.

Actividades Tutoriales o Encuentros de Clase

El profesor enseñará los fundamentos necesarios para el desarrollo de esta actividad en las horas de clase dispuestas para la asignatura en cada semestre.

Fuentes de información o referencias bibliográficas

Textos Guía

- "Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones" por Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar. Editorial: McGraw-Hill Interamericana, 4ta edición.
- "Heat Exchangers: Selection, Design, and Construction" por Sadik Kakaç, Hongtan Liu y Anchasa Pramuanjaroenkij. Editorial: CRC Press, 2da edición.
- "Heat Exchanger Design: Guide to the Design and Selection of Heat Exchangers" por Manfred Nitsche y Raji Olayiwola. Editorial: CRC Press, 2da edición.
- "Principles of Heat Transfer" por Faghri Amir, Zhang Yuwen y Howell John. Editorial: Cengage Learning, 8va edición.
- "Heat Exchangers: Basics Design Applications" por Jovan Mitrovic. Editorial: CRC Press, 1ra edición.
- "Heat Exchangers: Theory and Practice" por T. Kuppan. Editorial: McGraw-Hill Education, 1ra edición.

Textos complementarios

- "Heat Transfer Handbook" por Adrian Bejan y Allan D. Kraus. Editorial: Wiley, 3ra edición.
- "Heat Exchanger Design Handbook" por Kuppan Thulukkanam. Editorial: CRC Press, 2da edición.
- "Introduction to Heat Transfer" por Frank P. Incropera y David P. DeWitt. Editorial: Wiley, 6ta edición.
- "Principles of Heat Transfer" por Frank Kreith y Mark S. Bohn. Editorial: Cengage Learning, 8va edición.

Anexos

Fotos del intercambiador de calor ubicado en Laboratorio de Máquinas Térmicas y Termofluidos de la Universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia:



Figura 1 – Intercambiador de calor



Figura 2 – Tablero de temperatura digital



Figura 3 – Intercambiador de tubos concéntricos

TABLAS DE REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES

Tabla 1 – Registro de datos de la variación del flujo volumétrico

Intercambiador de calor:						TD360a		
Conexión (paralelo o contraflujo):						Paralelo		
Temperatura ambiente (°C):						32		
Temperatura tanque calentador (°C):						60		
Prueba	Flujo caliente (L/min)	Flujo frío (L/min)	TH1 (°C)	TH2 (°C)	TH3 (°C)	TC1 (°C)	TC2 (°C)	TC3 (°C)
1	3	3	60.3	55.7	57.7	33.2	38.1	36
2	3	2	60	54.3	56.8	33.2	37.1	35.4
3	3	1	60.8	52.7	56.1	33.2	35.8	34.8
4	3	0.5	60.5	50.3	54.6	33.2	35	34.3

Anexo D: Notación

Tabla 5.3-1 Notación		
Símbolo	Definición	Unidades
A	Área de transferencia de calor	m^2
C	Capacidad calorífica	$\frac{J}{K}$
C_P	Capacidad calorífica específica del agua a presión constante	$\frac{J}{kg * K}$
$LMTD$	Diferencia logarítmica de temperatura media	$K, ^\circ C$
ρ	Densidad del agua	kg/L
η_o	Eficiencia total	%
C_{EB}	Coeficiente de balance de energía	–
$\tilde{\eta}$	Eficiencia de temperatura media	%
Q	Energía calorífica transferida por unidad de masa	J/kg
\dot{Q}	Energía calorífica transferida por unidad de tiempo (tasa de transferencia de calor)	W
\dot{Q}_a	Energía calorífica absorbida	W
\dot{Q}_e	Energía calorífica emitida	W
T	Temperatura	$K, ^\circ C$
ΔT	Cambio de temperatura	$K, ^\circ C$
\bar{T}	Temperatura media	$K, ^\circ C$
U	Coeficiente de transferencia de calor	$W/m^2 * K$
V_H	Tasa de flujo volumétrico (circuito caliente)	$\frac{m^3}{s}, \frac{L}{min}$
V_C	Tasa de flujo volumétrico (circuito frío)	$\frac{m^3}{s}, \frac{L}{min}$
m_H	Tasa de flujo masico (circuito caliente)	$\frac{kg}{s}$
m_C	Tasa de flujo masico (circuito frío)	$\frac{kg}{s}$