

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



Evaluación numérica de la eficiencia de un intercambiador de calor de tubo y coraza en condiciones de laboratorio

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA

Autora:

Bach. Huaraz Cornelio, Micaela Beatriz

Código ORCID: 0009-0002-7985-9426

Asesor:

M.Sc. Montañez Montenegro, Carlos Macedonio

DNI: 42451038

Código ORCID: 0000-0002-8439-4734

Nuevo Chimbote - Perú

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D N°492-2017- CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

TÍTULO DE TESIS

Evaluación numérica de la eficiencia de un intercambiador de calor de tubo y coraza en condiciones de laboratorio

Autora:

Bach. Huaraz Cornelio, Micaela Beatriz

Código ORCID: 0009-0002-7985-9426

M.Sc. Montañez Montenegro, Carlos Macedonio
Asesor

DNI: 42451038

Código ORCID: 0000-0002-8439-4734

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para obtener el grado académico de Bachiller y Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D N° 492-2017-CU-R-UNS); titulado:

Evaluación numérica de la eficiencia de un intercambiador de calor de tubo y coraza en condiciones de laboratorio

Autor: Br. Micaela Beatriz Huaraz Cornelio

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:

M.Sc. Hugo Rolando Calderon Torres

Presidente

DNI: 32913914

Código ORCID: 0000-0002-0210-5565

Mg. Guevara Chinchayan Robert Fabian

Secretario

DNI: 32888460

Código ORCID: 0000-0002-3579-3771

M.Sc. Montañez Montenegro Carlos Macedonio

Integrante

DNI: 42451038

Código ORCID: 0000-0002-4734



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Micaela Beatriz Huaraz Cornelio
Título del ejercicio: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN INTERCAM...
Título de la entrega: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN INTERCAM...
Nombre del archivo: TURNITIN_final_Micaela_Huaraz_Cornelio_UNS.pdf
Tamaño del archivo: 965.03K
Total páginas: 75
Total de palabras: 10,698
Total de caracteres: 46,342
Fecha de entrega: 17-jul.-2023 12:19p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre... 2132666174

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



INFORME DE TESIS PARA TÍTULO
EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN
INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EN
CONDICIONES DE LABORATORIO

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA

Autor

Dr. Micaela Beatriz, I. Huaraz Cornelio
Código ORCID:0000-0002-7985-9426

Asesor:

M.Sc. Carlos Macedonio Montañez Montenegro
DNI: 42451038
Código ORCID:0000-0002-8439-4734

Nuevo Chimbote- Perú
2023

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EN CONDICIONES DE LABORATORIO

INFORME DE ORIGINALIDAD

21%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.gunt.de

Fuente de Internet

5%

2

escritura.cua.uam.mx

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

pascualbravo.edu.co

Fuente de Internet

2%

5

www.elsevier.es

Fuente de Internet

2%

6

www.wikiteka.com

Fuente de Internet

1%

7

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

1%

8

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

Dedicatoria

A Dios Padre por haberme dado la vida
y tomar mi mano siempre en este largo camino.

A mis amados Padres

Mateo Huaraz Salinas y Sabina Cornelio Bermúdez

por su amor incondicional y guía constante.

AGRADECIMIENTOS

Al M.Sc. Carlos Macedonio Montañez Montenegro

por su paciencia, guía y consejos para la realización de esta tesis.

A los docentes de la EAP Ingeniería en energía

por sus enseñanzas durante mi carrera profesional.

RESUMEN

La presente investigación se orientó a evaluar numéricamente la eficiencia de un intercambiador de calor de tubo y coraza en condiciones de laboratorio. La metodología corresponde al tipo pre experimental y se empleó los fundamentos de métodos numéricos para establecer el balance de calor en una sección o volumen de control a lo largo de la extensión de longitud de la tubería del intercambiador tomando 6 sesioneso puntos de medición de temperatura a una distancia de 3 cm respectivamente.

Los resultados encontrados indican que en los 3 ensayos experimentales de determinaron las curvas de temperatura en función de la distancia o posición como se indica $T(x) = -3.0974(x) + 67.673$, para el ensayo 2, $T(x) = -3.877(x) + 75.022$ y el ensayo 3, $T(x) = -3.671(x) + 72.02$, respectivamente alcanzando valores muy aproximados a los que se midieron con los sensores que dispone el equipo modular, la diferencia entre el sistema de medición con sensores y los resultados obtenidos del método numérico es de 1.6% cumpliendo la hipótesis planteada.

La eficiencia obtenida para cada uno de los ensayos corresponde a ensayo 1, 43.5 %, para el ensayo 2, 45.39% y el ensayo 3 39.28% respectivamente a consideración de que el ultimo valor de efectividad disminuye a razón de que los caudales se equilibraron a un valor promedio de 1.05 Lit/min.

Palabra clave: Método numérico, intercambiador de calor tubo y coraza, eficiencia.

ABSTRACT

The present investigation was oriented to numerically evaluate the efficiency of a shell and tube heat exchanger under laboratory conditions. The methodology corresponds to the pre-experimental type and the fundamentals of numerical methods were used to establish the heat balance in a section or control volume along the length of the exchanger pipe, taking 6 sessions or temperature measurement points. at a distance of 3 cm respectively.

The results found indicate that in the 3 experimental tests the temperature curves were determined as a function of distance or position as indicated $T(x) = -3.0974(x) + 67.673$, for test 2, $T(x) = -3.877(x) + 75.022$ and test 3, $T(x) = -3.671(x) + 72.02$, respectively reaching very close values to those measured with the sensors available in the modular equipment, the difference between the measurement system with sensors and the results obtained from the numerical method is 1.6%, fulfilling the proposed hypothesis.

The efficiency obtained for each of the tests corresponds to test 1, 43.5%, for test 2, 45.39% and test 3 39.28% respectively, considering that the last value of effectiveness decreases because the flow rates were balanced at an average value of 1.05 Lit/min.

Key word: Numeric method, shell and tube heat exchanger, efficiency.

ÍNDICE

	Pág.
Dedicatoria	vii
Agradecimientos	ix
Resumen	x
Abstract	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCION	
1.1 Antecedentes	17
1.2 Formulación del problema	19
1.3 Objetivo general	19
1.4 Objetivos específicos	19
1.5 Hipótesis de la investigación	19
1.6 Justificación y limitaciones del trabajo	19
1.7 Limitaciones de la investigación	
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	
2.1 Intercambiadores de calor	22
2.2 intercambiadores de calor de tubo y coraza	22
2.3 Características del módulo experimental	24
2.4 Parámetros de un intercambiador de calor experimental	25
2.5 Disposición de flujos másicos	26
2.6 Simulación por computadora	27
2.7 Métodos numéricos	28
2.8 Método de soluciones analíticas	28
2.9 análisis numérico en un sistema nodal para tubería	29
2.10 Correlaciones de transferencia de calor en convección forzada interna	
CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS	
3.1 Materiales	36
3.2 Método	38
3.3 Población y muestra	38
3.4 Técnicas e instrumentos	38
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	
4.1 Resultados	42

4.2 Discusiones	68
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAD BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Instrumento de recolección de datos de la variable independiente	39
Tabla 2. Instrumento de recolección de datos de la variable dependiente	39
Tabla 3. Distribución de temperaturas en nodos de ensayo 1	47
Tabla 4. Distribución de temperaturas en nodos de ensayo 2	55
Tabla 5. Distribución de temperaturas en nodos de ensayo 3	66
Tabla 6. Datos de grupos de ensayos y efectividades	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Intercambiador de calor de tubo y coraza	22
Figura 2 Intercambiador de calor de tubo y coraza experimental	24
Figura 3. Módulo de experimentación de intercambio de calor	24
Figura 4. Partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza	25
Figura 5. Sentido de circulación de flujos de agua	26
Figura 6. Panel interfaz de control de variables	27
Figura 7. Modelo 3D de una región parabólica	28
Figura 8. Modelo de un cilindro	29
Figura 9. Unidad de alimentación Gunt Amburg	30
Figura 10. Unidad de alimentación para intercambiador de calor	36
Figura 11. Intercambiador de calor experimental de tubo y coraza	37
Figura 12. Componentes de instalación de modulo experimental	37

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución de temperatura de nodos para efectividad de 43.5%	47
Gráfica 2. Distribución de temperaturas de corrientes de fluido para efectividad de 43.5%	48
Gráfica 3. Perfil de caudales vs temperatura de corriente de fluidos para efectividad de 43.5%.	49
Gráfica 4. Distribución de temperatura de nodos para efectividad de 45.39%	56
Gráfica 5. Distribución de temperaturas de corrientes de fluido para efectividad de 43.5%	57
Gráfica 6. Distribución de temperatura de nodos para efectividad de 45.39%	58
Gráfica 7. Distribución de temperatura de nodos para efectividad de 39.28.%	67
Gráfica 8. Distribución de temperaturas de corrientes de fluido para efectividad de 39.28%	68
Gráfica 9. Perfil de caudales vs temperatura de corriente de fluidos para efectividad de 39.28.%	69
Gráfica 10. Efectividad vs ensayos experimentales	70

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

- Sotomayor Zajarov, D (2014), en su tesis titulada “Simulación numérica del comportamiento de un intercambiador de calor de flujo transversal aleteado”. Propuso como objetivo general simular el comportamiento el comportamiento del intercambiador a partir de los datos de diseño del fabricante, mediante esto propone obtener la capacidad de transferencia de calor mediante simulación para compararse con los datos del fabricante, para compararse con los que presentan los libros teóricamente, el segundo objetivo específico corresponde a la caída de presión, identificando regiones de alta y baja tasa de transferencia de calor. El método utilizado corresponde a la simulación numérica mediante ANSYS CFX

V.14.5. para evaluar sus resultados y compararse con los calculados a través de correlaciones de diseño matemático de transferencia de calor. Los resultados encontrados a través de la simulación numérica indican una variación alrededor de 11% respecto a los datos brindados por el fabricante y de 4.5 % respecto de la capacidad calculada analíticamente, además las tasas de transferencia de calor que presenta el intercambiador en diferentes zonas, los cuales sirvieron para punto de partida de optimización del intercambiador de calor con aletas.

- Valdez Ortiz, M ; Ardilla Marin, J, et al , en el artículo de investigación titulada “Análisis numérico vía ansys de intercambiadores de calor con mejora pasiva: casos de estudio densidad del mallado y modelado de turbulencia”. Tuvo como objetivo realizar tres simulaciones con los modelos $k-\varepsilon$. Para hallar la temperatura promedio adecuada, la primera simulación con propiedades del fluido constante a 40°C y Dean: 72,823,979; la segunda simulación con propiedades constantes a la nueva temperatura promedio hallada con sus respectivos Dean; y tercera simulación correspondientemente. Los métodos empleados consisten en el uso de Ansys Los resultados obtenidos muestran que la pendiente de las líneas se reduce para el modelo $k-\varepsilon$ a medida que se corrigen las propiedades del fluido con la temperatura promedio hallada, aproximándose la pendiente de los ajustes a la pendiente de Kumar et al. [2]. Los resultados muestran que la pendiente de las líneas aumenta para $k-\omega$ a medida que se corrigen las

Kumar et al. Los resultados muestran que el modelo $k-\omega$ no es el adecuado para las simulaciones con CFX y con la densidad de malla aplicada, debido a que el error de la pendiente aumenta a medida que se corrigen las propiedades del fluido. Por otro lado, el modelo $k-\varepsilon$ Estándar presentó resultados más aproximados a los resultados de Kumar, et al con un error del 5%, demostrando ser adecuado para simular estos intercambiadores.

- Morales J, Campo A., (1991) "Simulación numérica de la convección mixta de gases en tubos verticales incluyendo inversión de flujo", tiene como objetivo. El método empleado consiste en la metodología de volúmenes finitos para el modelado del intercambiador de calor y la representación del conexionado de los tubos se realizó mediante la teoría de grafos. El resultado obtenido consiste en la verificación de la flexibilidad en transferencia de calor que tiene el modelo desarrollado, resolviendo distintos casos que involucran aletas secas y húmedas en el lado del aire. También fue posible predecir el comportamiento de los flujos de un evaporador bajo condiciones de aletas secas y húmedas, después de ajustar el modelo, se logró obtener valores de error inferior al 6% con respecto a los datos experimentales.
- Márquez B, Valencia L, et al, en el artículo de investigación titulado (2016) "Determinación computacional del coeficiente de transferencia de calor en calentadores eléctricos de flujo continuo, mediante dinámica de fluidos computacional", tuvo como objetivo "...la estimación del coeficiente de transferencia de calor mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para cuatro configuraciones de calentadores eléctricos de 5,08 cm de diámetro: a) tubo simple, b) baffles verticales, c) baffle helicoidal, y d) baffle helicoidal, con variación de torsión. El modelo computacional se planteó empleando el modelo $k-\varepsilon$ para representar los fenómenos de turbulencia acoplado con la ecuación del balance de calor. Un método desarrollado para la mejora de los procesos de transferencia de calor es la inclusión de baffles en la zona de intercambio y más recientemente el uso de baffles helicoidales (Taher et al., 2012; Rodríguez-Toral y Heard, 2012; Wen et al., 2015). El uso de baffles helicoidales fue desarrollado por primera vez en Checoslovaquia para intercambiadores de

calor de tubos y tubos con deflectores verticales y han mostrado un rendimiento muy eficaz sobre todo para los casos en los que se controla el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza; teniendo una menor caída de presión y ensuciamiento (Lei et al., 2008; Movassag et al., 2013).

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué parámetros se obtendrán al evaluar numéricamente la eficiencia de un intercambiador de calor de tubo y coraza en condiciones de laboratorio?

1.3 OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación numérica de la eficiencia de un intercambiador de calor en condiciones de laboratorio.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el equipo modular experimental y configurar los parámetros de operación para un intercambiador de tubo y coraza.
- Determinar las ecuaciones de perfil de temperaturas de los ensayos.
- Establecer el método numérico apropiado y los parámetros de entrada para la evaluación de la eficiencia.

1.5 HIPÓTESIS

La evaluación numérica determina que los parámetros de gradiente térmico y másico influyen en que la eficiencia del intercambiador de calor de forma experimental varíe en 2% respecto a los resultados del análisis numérico.

1.6 JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES DEL TRABAJO

1.6.1 JUSTIFICACIÓN

El trabajo se justifica a partir de las necesidades de dar a conocer resultados concretos respecto a dos formas de evaluar un mismo fenómeno, la información que resulte de la investigación ayudará a completar el análisis sobre el diseño de equipos de transferencia de calor atendiendo a sus dimensiones y restricciones de parámetros de flujo como de temperatura.

Es necesario realizar una investigación de esta naturaleza a fin de complementar resultados de interés académico ya que la mayoría de trabajos de investigación para titulación profesional solo usan una de las alternativas, bien experimentalmente o solo simulación, para este caso se complementan las dos formas para establecer una discusión que ayudara a despejar dudas respecto al comportamiento de ciertos parámetros asociados directamente a la transferencia de calor.

Los resultados permitirán tener una noción de lo que puede ocurrir a mayores dimensiones teniendo presente que los regímenes usados en el módulo experimental limitan un patrón que se puede esperar a mayor escala cuando un intercambiador de tamaño real opera, sin embargo, la investigación ayudará a establecer las ventajas y limitaciones en el diseño de equipos de transferencia de calor, específicamente el de tubo y coraza.

1.6.2 LIMITACIONES DEL TRABAJO

La investigación comprenderá las etapas de experimentación a través de un módulo de transferencia de calor donde se elegirá para el análisis un intercambiador de tubo y coraza, los regímenes de flujo másico y temperatura quedan sujetos a los parámetros que el módulo experimental proporciona porque lo que los resultados que se obtengan, se explicaran a partir de ellas.

Se usará un software para simular el comportamiento dado en condiciones experimentales a fin de corroborar o comparar resultados, el alcance de la investigación se limita a las condiciones explicadas. No se construirán prototipos algunos, sino más bien se obtendrán conclusiones diferenciables a partir de las dos formas de evaluación, la experimentación en el módulo de transferencia de calor y la simulación numérica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Los equipos de intercambio de calor son equipos o dispositivos utilizados para transferir (recuperar) calor desde una corriente de un fluido caliente a otra constituida por un fluido frío. El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida, ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería. El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio se denomina intercambiador de calor y las aplicaciones específicas se pueden encontrar en calefacción de locales y acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desechos y algunos procesos químicos, según lo define, Incropera Frank, P & David P. De Witt (Fundamento de transferencia de calor).

Figura 1

Intercambiador de calor de tubo y coraza



2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

Los intercambiadores de calor modular o experimental reúnen ciertas características las cuales permitan variar las condiciones de operación a fin de demostrar la relación que hay entre estas. Sin embargo, las propiedades de los fluidos, así como sus gradientes térmicos presentan características o patrones similares a la de un intercambiador de calor de tamaño real, pero existen restricciones o condiciones en las cuales es muy importante considerar sus limitaciones a fin de comprender las fronteras entre sus parámetros para interpretarse en términos de eficiencia y costo operación.

A continuación, se presenta un tipo de intercambiador de calor de tubo y coraza de un fabricante conocido, el equipo equivale a un módulo experimental calor de carcasa y tubos son un modelo muy difundido. Las ventajas de este modelo son la gran superficie de transmisión de calor y su fabricación sencilla. Los cambiadores de calor de carcasa y tubos se utilizan en la industria química y farmacéutica, en refinerías y en plantas de procesos. WL 110.03 pertenece a una serie de equipos que hace posibles ensayos con diversos tipos de cambiadores de calor. El equipo de ensayo es idóneo para investigar el funcionamiento y el comportamiento de un cambiador de calor de carcasa y tubos. Se conecta a unidad de alimentación WL 110 por medio de acoplamientos rápidos. El cambiador de calor de carcasa y tubos consta de siete tubos rodeados por un tubo envolvente transparente. El agua caliente fluye por el espacio del tubo y el agua fría por el espacio envolvente. El agua caliente transfiere así una parte de su energía térmica al agua fría. Con ayuda de deflectores se desvía la corriente en el espacio envolvente de manera que se origine una fuerte turbulencia y, con ello, una transferencia intensiva de calor.

El caudal de agua caliente y el de agua fría se ajustan por medio de válvulas. La manguera de alimentación se puede cambiar de empalme con ayuda de acoplamientos rápidos, cambiando así la dirección del flujo. De este modo se puede trabajar en paralelo cruzado o en contracorriente cruzado. Sensores de temperatura para medición de la temperatura de entrada y salida se encuentran en las conexiones de alimentación de WL 110. En los ensayos se capta la evolución de la temperatura y se representa gráficamente en forma de curvas. Los valores medidos se pueden captar y procesar con ayuda de un software de adquisición de datos. A continuación, se determina el coeficiente de transferencia de calor medio como variable característica.

Figura 2

Intercambiador de calor de tubo y coraza experimental



Nota: Intercambiador de calor de tubo y coraza de la marca GUNT AMBURG WL.110.03

2.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL MÓDULO EXPERIMENTAL

El módulo experimental que se dispone en el laboratorio de procesos térmico presenta controles para graduar la temperatura de agua que es proveída de la red pública, además regula el caudal en litros por minuto la cual permite encontrar una relación de comportamiento preestablecido, en la condición que se dese analiza. Para ello se pasará a describir las partes más importantes, así como los valores graduales que permite realizar en la temperatura de fluido y el flujo másico.

Figura 3

Módulo de experimento de intercambiadores de calor



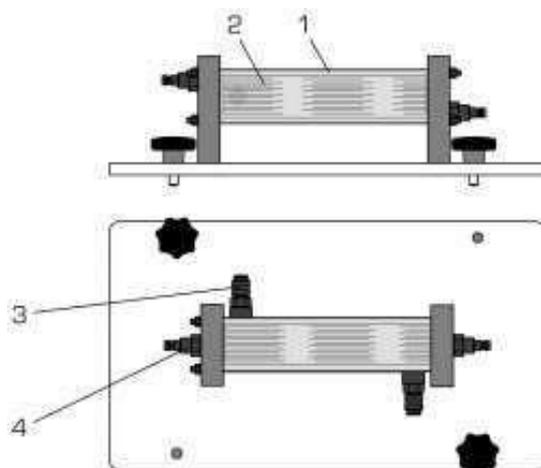
Nota: Equipo modular de soporte para abastecimiento de flujo de agua caliente y sistema de control de fluidos, marca GUNT AMBURG WL.110.03.

2.4 PARÁMETROS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR MODULAR

- Intercambiador de calor de carcasa y tubos (flujo cruzado) para conexión a WL 110.
- Alimentación de agua caliente y fría a través de WL 110.
- Funcionamiento posible en flujo paralelo y cruzado y a contracorriente cruzado.
- Tubo envolvente transparente, haz de tubos visible.
- Haz de tubos formados por 7 tubos y 4 deflectores.
- Adquisición de la temperatura a través de WL 110
- Superficie de transmisión de calor 200 cm²
- Haz de tubos, acero inoxidable.
- Diámetro exterior: 6cm
- Grosor de pared: 1 mm
- Tubos, 7 piezas.

Figura 4

Partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza, modular.

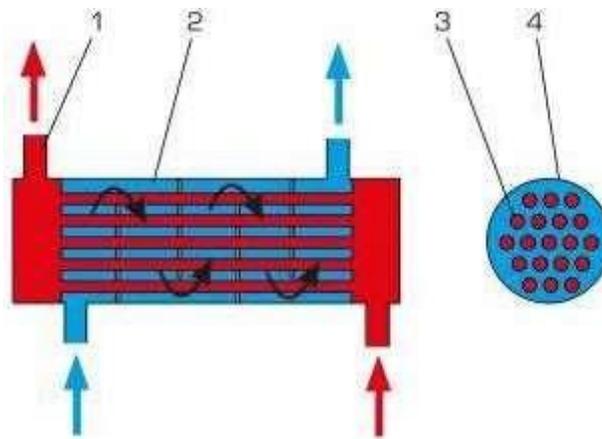


2.5 DISPOSICIÓN DE FLUJOS

El modulo permite acoplar terminales de ingreso y salida del fluido según el sentido de trabajo sea en paralelo o serie, la configuración se realiza a raves de la conexión y también a través de la selección de configuración en el panel de la computadora.

Figura 5

Sentido de circulación de flujos de agua



El equipo presenta una interfaz de programa donde se muestran las variables y sus parámetros más importantes, esto permite analizar el desarrollo de un proceso de intercambio de calor cuando se programan valores para temperatura y flujo másico, además permite exportar los resultados a formato Excel para su análisis e interpretación gráfica.

Figura 6

Panel e interfaz de control de variables de intercambio de calor



2.6 SIMULACIÓN POR COMPUTADORA

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Shannon,1988). Se centra en la simulación por computadoras. Un simulador por computadora está compuesto por las siguientes partes:

- Un modelo: Es un modelo simbólico puede ser un conjunto de ecuaciones, reglas lógicas o un modelo estadístico.
- El evaluador: Es el conjunto de procedimientos que procesaran el modelo para obtener resultados de la simulación, puede contener rutinas para la resolución de sistemas de ecuaciones, generadoras de números aleatorios, rutinas estadísticas, etc.

La interfaz: Es parte dedicada a interactuar con el usuario, recibe las acciones del mismo y presentan los resultados de la simulación en forma adecuada. Esta unidad puede ser tan compleja como la cabina utilizada en los simuladores de vuelos profesionales.

Sistema: Conjunto de objetos o ideas que están interrelacionadas entre sí como una unidad para la consecución de un fin (Shannon, 1988). También se puede definir como la porción del universo que será objeto de la simulación.

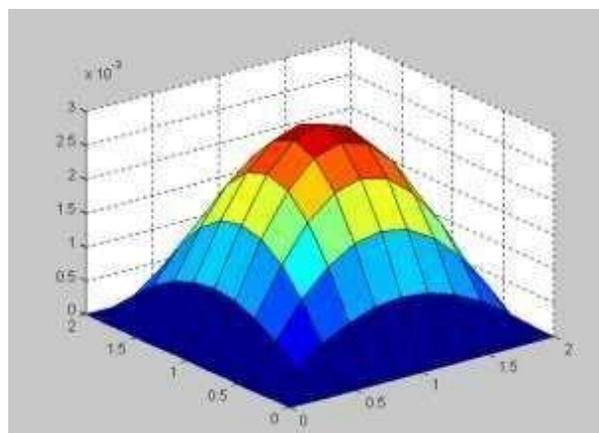
Modelo: Un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede emplear X para responder cuestiones que le interesan acerca de Y (Minsky).

2.7 MÉTODOS NUMÉRICOS

Es considerada una sucesión de operaciones matemáticas empleadas para hallar una solución numérica aproximada a un caso determinado, se emplean series de cálculos que dependen de una precisión. Su aplicación y utilidad se basa en algoritmos que a su vez relacionan variables del tipo discreta entre otros tipos de variables y su campo de aplicación se extiende desde sistemas de ecuaciones lineales, ecuaciones no lineales con raíces reales y complejas, además de integraciones numéricas, sistemas de ecuaciones no lineales, ecuaciones diferenciales, autovalores y auto vectores de una matriz, etc.

Figura 7

Modelo en 3D de una región parabólica

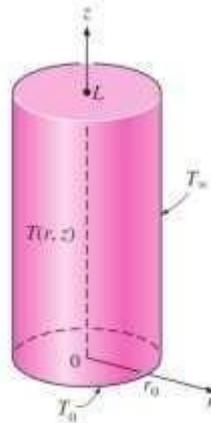


2.8 MÉTODOS DE SOLUCIONES ANALÍTICAS

Es una técnica en la cual se restringe o limita un problema a condiciones específicas elegidas con dominio y criterio sobre las variables que se estudian, este método permite reducir la dependencia de variables múltiples eligiendo entre las más importantes y de rigor en el dominio del fenómeno que se esté analizando. Ejemplo en el caso de analizar la conducción del calor la selección de la superficie debe ser tal que pueda analizarse matemáticamente mediante un sistema de coordenadas sea el ejemplo para un sólido definido o una pieza de tubería que se dese analizar.

Figura 8

Modelado de un cilindro



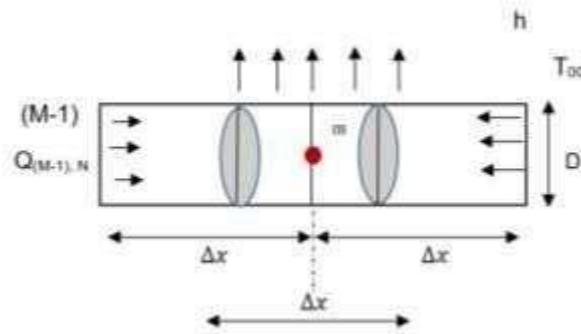
Nota. Tomado del libro de Yunus & Cengel (2013), tercera edición.

2.9 ANÁLISIS NUMÉRICO EN UN SISTEMA NODAL PARA TUBERÍA

Se tiene la siguiente representación de un sistema basado en un cilindro que se asemeja a una tubería por donde circula un fluido al interior,

Figura 9

Modelo de volumen de control de análisis nodal



$$[N-1] \rightarrow N = [N+1] \rightarrow N + Q_{CONVECCION} \quad 01$$

$$\frac{-k \cdot A}{hP\Delta x} [T_M - T_{M-1}] = -k \cdot A \left[\frac{T_{M+1}}{\Delta x} \right] + \frac{-T}{M \infty} \quad 02$$

$$\frac{T}{hP\Delta x} \left[2 + \frac{hP\Delta x^2}{kA} \right] - \frac{-T}{kA} \infty \left[\frac{T_{M+1}}{\Delta x} \right] = 0 \quad 03$$

Balance de energía Nudo 6

$$Q_{5-6} + Q_{cond-6} + Q_{conv-6} = 0 \quad 04$$

Resolviendo se tiene

$$kA \frac{T_5 - T_6}{\Delta x} + \frac{hP\Delta x}{2} [T_{\infty} - T_6] + hA [T_{\infty} - T_6] = 0 \quad 05$$

$$T_6 \left[1 + \frac{hP\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] - \left[h \frac{P\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] * T_{\infty} - T_5 = 0 \quad 06$$

Obteniendo ecuaciones de nodos

Nodo 2: para $P = \pi_* D_{\rightarrow} P = 4$

07

$$T_2 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_{\infty} - (T_1 + T_3) = 0$$

08

Para el Nodo 3

$$T_3 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_{\infty} - (T_2 + T_4) = 0$$

09

Para el Nodo 4

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_{\infty} - (T_3 + T_5) = 0$$

10

Para el Nodo 5

$$T_5 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_{\infty} - (T_4 + T_6) = 0$$

11

Para el Nodo 6

$$T_6 \left[1 + \frac{2h\Delta x^2}{kD} + \frac{h\Delta x^2}{k} \right] - h \left[\frac{\Delta x}{k} + \frac{2h(\Delta x)^2}{kD} \right] * T_{\infty} - T_5 = 0$$

12

2.10 CORRELACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN CONVECCIÓN FORZADA INTERNA

Paso 1:

Calculo de temperatura media de fluido

$$T_m = \frac{T_{en} + T_{em}}{2} \quad 13$$

Paso 2:

Obtención de propiedades térmicas del fluido

Paso 3:

Determinación del régimen en base al número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad 14$$

Paso 4.

Cálculo de numero de Nusselt

Para flujo laminar completamente desarrollado $Re < 2300$, corresponde $Nu = 4.36$

$$Nu = 4.36 \quad 15$$

Para flujo turbulento

$$Nu = 0.023(Re)^{0.8} * (Pr)^{0.3} \quad 16$$

Paso 5

Cálculo del coeficiente convectivo interno

$$h_i = \frac{Nu * k}{Di} \quad 17$$

Di : diámetro interno de la tubería del intercambiador de calor
Coeficiente convectivo externo

$$h_e = \frac{Nu * k}{Do} \quad 18$$

Do : diámetro externo de la coraza del intercambiador de calor

Paso 6

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad 19$$

No se considera el efecto del factor de ensuciamiento ni las resistencias conductivas para un tubo cilíndrico por ser espesores de tubería muy pequeñas.

Paso 7

Cálculo del calor transferido

$$Q = U * A * \Delta T_{ML} \quad 20$$

Paso 8

Obtención de la capacidad calorífica

$$C_{min} = (m * Cp) \quad 21$$

$$C_{max} = (m * Cp) \quad 22$$

$$C = \frac{C_{min}}{(m * Cp)_{max}} = \frac{(m * Cp)}{(m * Cp)_{max}} \quad 23$$

Paso 9

Cálculo de los NTU-Número de unidades de transferencia de calor

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}} \quad 24$$

Paso 10

Cálculo de la efectividad para intercambiador de calor de tubo y coraza

$$\varepsilon = \frac{1 - [-NTU\sqrt{1+c^2}]}{1 + [-NTU\sqrt{1+c^2}]} \quad 25$$

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1 Materiales

Figura 10

Unidad de alimentación para intercambiador de calor



Especificaciones técnicas

- Unidad de alimentación para cambiadores de calor
- Circuito de agua caliente con depósito, calefacción, regulador de temperatura, bomba y protección contra falta de agua
- Circuito de agua fría procedente de la red del laboratorio o del generador de aguafría WL 110.20
- Controlador de temperatura controla la temperatura de agua caliente
- Caudales ajustables mediante válvulas
- Indicadores digitales para 6 sensores de temperatura y 2 de caudal
- Tomas de agua con acoplamientos rápidos
- Conexión de mecanismo de agitación con ajuste del número de revoluciones(WL 110.04)
- Funciones del software GUNT: software de aprendizaje y adquisición de datos
- Software GUNT para la adquisición de datos a través de USB en Windows 8.1, 10

3.1.2 Equipos

Figura 11

Intercambiador de calor experimental de tubo y coraza



Imagen de intercambiador de calor de tubo y coraza

Figura 12

Componentes de instalación de modulo experimental



Imagen de modulo experimental de uso para intercambiadores de calor

3.2 MÉTODOS

El método que se utilizó corresponde al método pre experimental, a razón de que se manipulo la variable independiente en función de los límites de máximo y mínimocaudal que dispone el módulo experimental.

Se consideró el siguiente esquema de trabajo para desarrollarse en el laboratorio.

Diseño pre-experimental.

ENTRADA A1	PROCESO X	DATOS DE SALIDA A2
VARIABLE INDEPEDIENTE	ESTIMULO	VARIABLE DEPENDIENTE
Condiciones iniciales de experimento	Método numérico	Condiciones finales de experimento

Dónde:

A₁ : Condiciones iniciales de experimento X : método numérico

A₂ : Condiciones finales de experimento

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y muestra corresponden es única, a razón de que las condiciones a experimentar son elegidos a criterio específico del investigador asumiendo las características paramétricas del módulo y el tamaño del intercambiador de calor, considerando que los parámetros de las variables se operaran en condiciones particulares y muy específicas.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Se empleará la observación como técnica, y su instrumento a utilizar será la guía de observación en la que se anotaran los datos específicos de cada etapa experimental.

Tabla 1

Instrumento de recolección de datos de la variable independiente

Nº	T1 (°C) Entr agua cal	T2 (°C)	T3 (°C) Sal agua cal	T4 (°C) Ent agua fria	T5 (°C)	T6 (°C) Sal agua fria
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

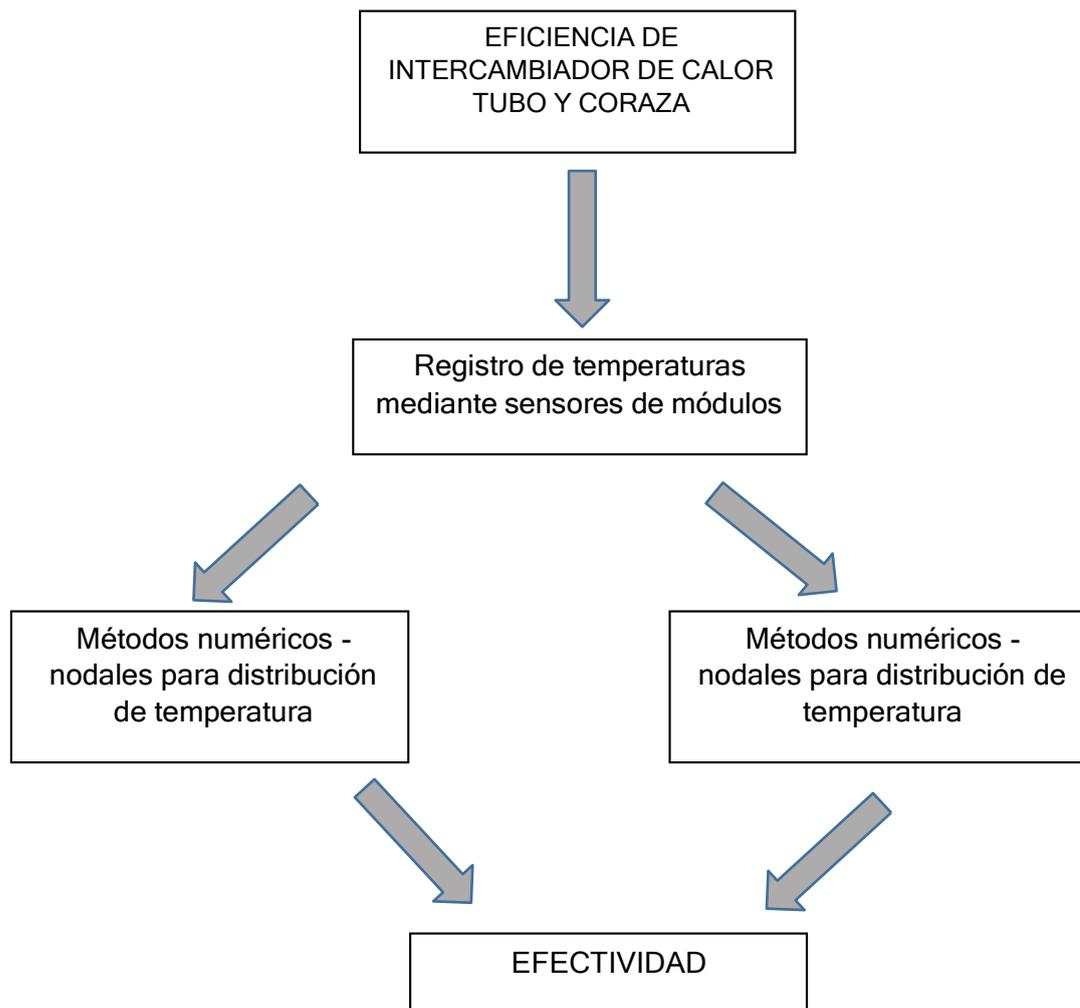
Fuente: elaboración propia

Tabla 2

Instrumento para procesamiento de datos de la variable dependiente

Nº	dV1/dt (l/min)	dV2/dt (l/min)	dQ1/dt (kW)	dQ2/dt (kW)	dQm/dt (kW)	dTm (K)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Fuente: elaboración propia



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. RESULTADOS

ANALISIS PARA ENSAYO 1

Caso I: Datos promediados de Anexo 1

Se toma el promedio del flujo másico registrado en el anexo 1, obteniéndose la densidad del agua caliente a 64.5 °C es 980.4 kg/m³ y el flujo de agua promedio es 0.52 Lit/min, según Anexo 1.

$$\dot{m}_{1,o} = 0.52 \frac{\text{Lit}}{\text{min}} * \frac{0.001\text{m}^3}{\text{Lit}} * \frac{\text{min}}{60\text{s}} * 980.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8.49 * 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Coefficiente convectivo interno promedio de agua caliente a temperatura promedio

$$T_m = \frac{64.5 + 52.5}{2} = 58.5^\circ\text{C}$$

Evaluando el coeficiente convectivo

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{983.3 * 0.10 * 0.01}{0.467 * 10^{-3}} = 2105.56$$

Cálculo de número de Nusselt

Flujo laminar completamente desarrollado $Re < 2300$, corresponde $Nu = 4.36$

$$Nu = 4.36$$

Coefficiente convectivo interno

$$h_i = \frac{Nu * k}{Di} = \frac{4.36 * 0.654}{0.01} = 281.22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coeficiente convectivo externo

$$W h_e = 195.69 \frac{W}{m^2 K}$$

Coeficiente global de transferencia de calor (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{281.22} + \frac{1}{195.69}}$$

$$U = 115.39 \frac{W}{m^2 K}$$

Cálculo del calor transferido

$$Q = U * A * \Delta T_{ML}$$

$$Q = 115.39 \frac{W}{m^2 K} * 0.025 m^2 * 6 * (32.4^\circ C) = 560.79 W$$

$$Q = 0.56079 kW$$

Donde se obtiene la capacidad calorífica

$$C_{min} = (m * Cp)_{min} = 8.49 * 10^{-6} \frac{Kg}{s} * 4.187 \frac{kJ}{KgK} = 0.03554 \frac{kW}{K}$$

$$C_{max} = (m * Cp)_{max} = 1.25 * 10^{-5} \frac{Kg}{s} * 4.182 \frac{kJ}{KgK} = 0.21817 \frac{kW}{K}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{(m * Cp)_{min}}{(m * Cp)_{max}}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0.03554 \frac{kW}{K}}{0.21817 \frac{kW}{K}} = 0.162$$

Cálculo de los NTU-Número de unidades de transferencia de calor

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}}$$

$$NTU = \frac{0.146 \frac{W}{m^2K} * 0.025m^2}{0.03554 \frac{kW}{K}}$$

$$NTU = 0.1027$$

Cálculo de la efectividad para intercambiador de calor de tubo y coraza

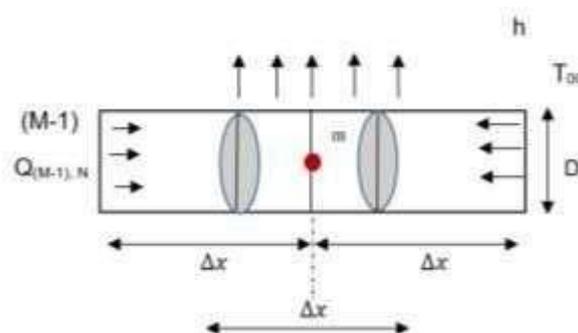
$$\varepsilon = 2 \left[\frac{1 + \sqrt{1 + c^2 * [-NTU\sqrt{1+c^2}]}}{1 + c + \sqrt{1 + c^2 * [-NTU\sqrt{1+c^2}]}} \right] 1 - [-NTU\sqrt{1+c^2}]$$

$$\varepsilon = 2 \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (0.162)^2 * [-0.1027\sqrt{1+(0.162)^2}]}}{1 + 0.162 + \sqrt{1 + (0.162)^2 * [-0.1027\sqrt{1+(0.162)^2}]}} \right] 1 - [-0.1027\sqrt{1+(0.162)^2}]$$

$$\varepsilon = 43.5\%$$

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS

Aplicando métodos numéricos para analizar la distribución de temperaturas en un tubo Estableciendo el balance de energía.



Fuente: Elaboración propia

$$[N-1] \rightarrow N = [N+1] \rightarrow N + Q_{CONVECCION}$$

$$-k \cdot A \left[\frac{T_M - T_{M-1}}{\Delta x} \right] = -k \cdot A \left[\frac{T_{M+1} - T_M}{\Delta x} \right] + hP\Delta [T_M - T_\infty]$$

$$T_M \left[2 + \frac{hP\Delta x^2}{kA} \right] - \frac{hP\Delta x^2}{kA} * T_\infty - [T_{M+1}, T_{M-1}] = 0$$

Obteniendo ecuaciones nodales en nodos de frontera
 Nodo 1: 64.5°C

Balance de energía
 Nodo 6

$$Q_{5-6} + Q_{cond-6} + Q_{conv-6} = 0$$

Resolviendo se tiene

$$kA \frac{T_5 - T_6}{\Delta x} + \frac{hP\Delta x}{2} [T_\infty - T_6] + hA [T_\infty - T_6] = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{hP\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] - \left[\frac{hP\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] * T_\infty - T_5 = 0$$

Obteniendo ecuaciones de nodos
 Nodo 1: $T_1 = 64.5^\circ\text{C}$

Nodo 2: para $P = \pi * D \rightarrow P = \pi * D$

$$T_2 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_1 + T_3) = 0$$

Usando los valores establecidos

$$T_2 \left[2 + \frac{4(10)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} \right] - \frac{4(10)(0.03)^2}{205(6 * 10^{-3})} * (21.2) - 64.5 - T_3 = 0$$

$$2.029T_2 - 60.77 - T_3 = 0$$

Para el Nudo 3

$$T_3 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_2 + T_4) = 0$$

$$T_3 \left[2 + \frac{4(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(10)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} * (21.2) - T_2 - T_4 = 0$$

$$2.029T_3 - 0.6204 - T_2 - T_4 = 0$$

Para el Nudo 4

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_3 + T_5) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_3 - T_5 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.6204 - T_3 - T_5 = 0$$

Para el Nudo 5

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_4 + T_6) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_4 - T_6 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.6204 - T_4 - T_6 = 0$$

Para el Nudo 6

$$T_6 \left[1 + \frac{2h\Delta x^2}{kD} + \frac{h\Delta x^2}{k} \right] - \left[h \frac{\Delta x}{k} + \frac{2h(\Delta x)^2}{k \cdot D} \right] * T_\infty - T_5 = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{2(10) * 2 * (0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} + \frac{10 * (0.03)^2}{205} \right] - \left[10 * \frac{0.03}{205} + \frac{2(10)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] * 21.2 - T_5 = 0$$

$$1.029T_6 - 0.311 - T_5 = 0$$

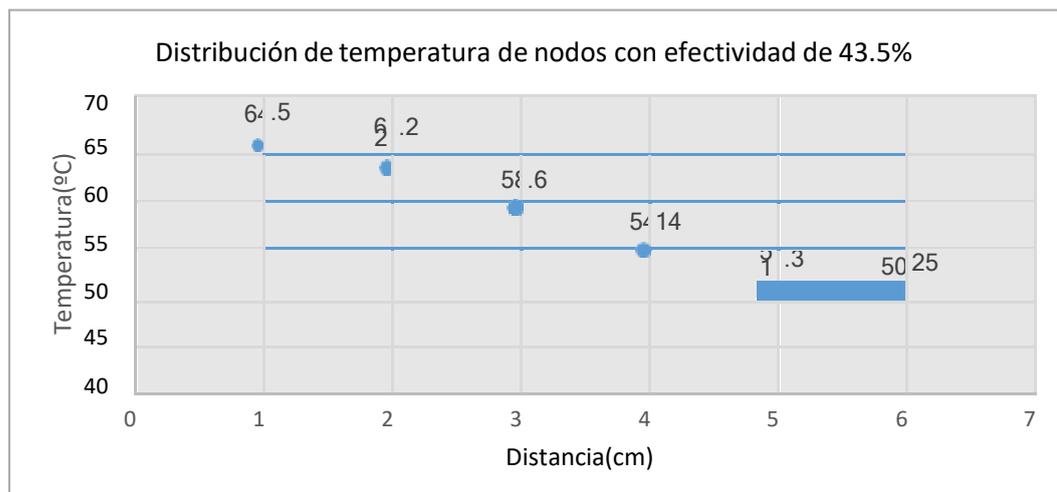
De los resultados obtenidos de las ecuaciones en la distribución de temperaturas para 6 puntos con extensión de separación de 3cm para el tubo del intercambiador de tubo y coraza, obtenemos la siguiente distribución.

T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	T ₅ (°C)	T ₆ (°C)
64.5	62.2	58.6	54.14	51.3	50.25

Tabla 3

Distribución de temperatura en nodos ensayo 1

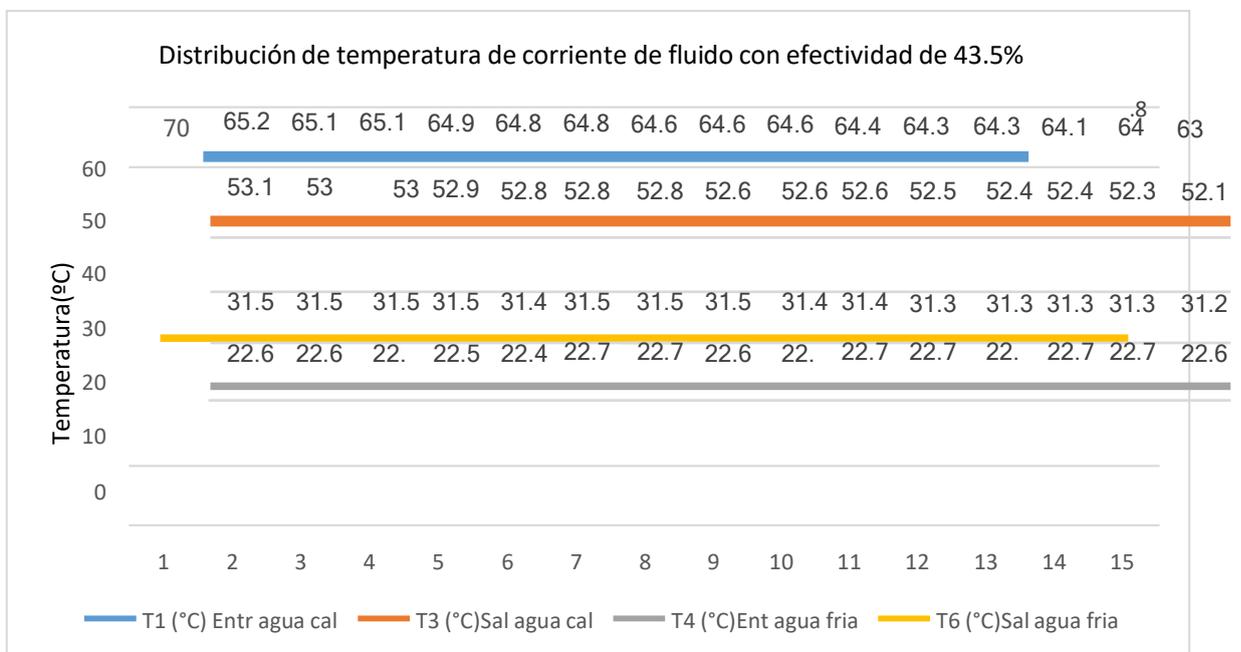
Distancia	Temperatura
0cm	64.5
0-3cm	62.2
3cm-6cm	58.6
6cm-9cm	54.14
9cm-12cm	51.3
12cm-15cm	50.25



Gráfica 1

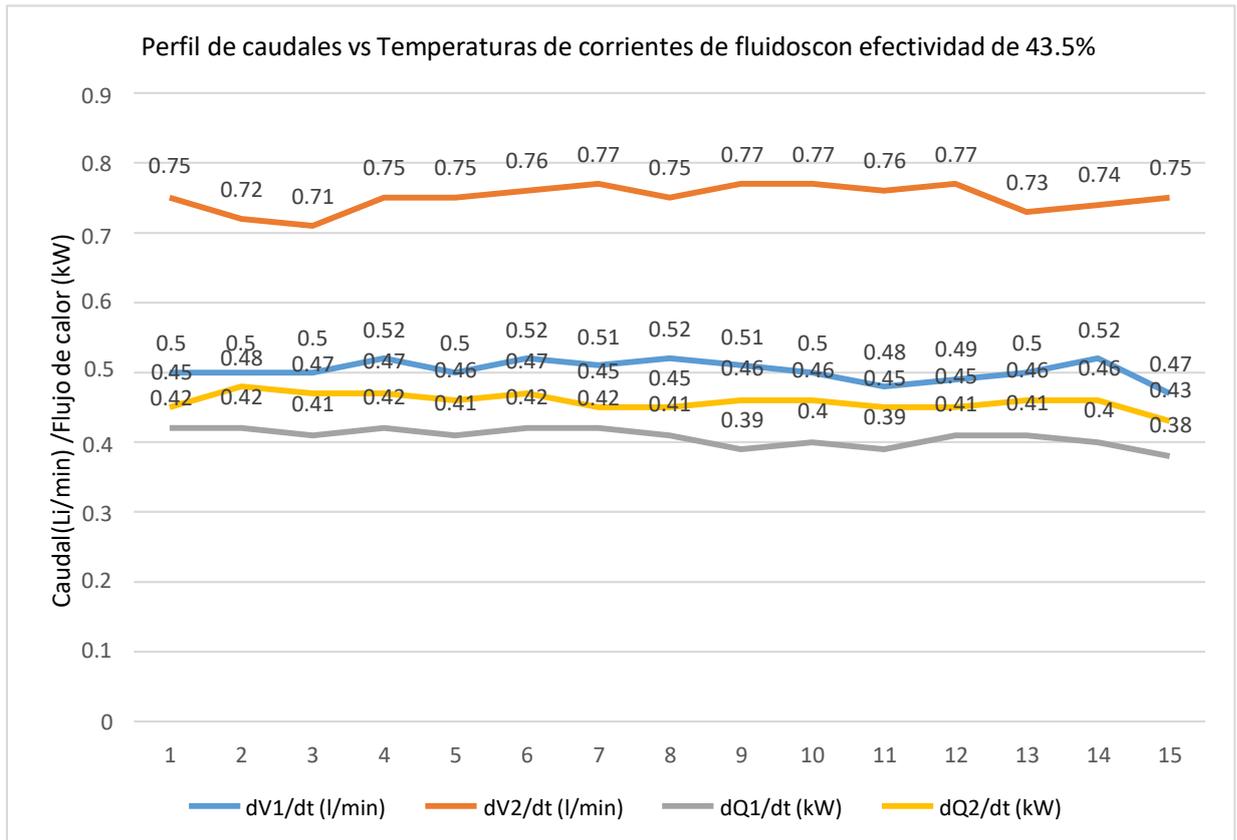
De la presente grafica se observa la evolución de la temperatura desde la entrada a 64.5°C hasta la salida con un valor de solución de 50.25°C, estos valores representan a las temperaturas que se han calculado en base al método nodal mediante métodos numéricos, asimismo estos datos sirven para conocer la distribución de temperaturas a lo largo de la extensión del tubo del intercambiador de calor con el fin de promediar parámetros convectivos y conocer su influencia en el coeficiente global de transferencia. Los valores obtenidos desde T1 hasta T6 representan la forma en que se enfría el agua caliente.

A continuación, se grafican las temperaturas registradas a través del módulo experimental, los datos se han tomado del Anexo 1



Gráfica 2

De la gráfica se observa el desarrollo de las temperaturas iniciando con agua caliente desde 65.2 °C hasta 63.8 °C y que se enfría entre 53.1°C hasta 52.1°C en estas condiciones la temperatura de ingreso de agua fría se mantiene entre 22.6°C y 25.7 °C aproximadamente, este perfil permite obtener el valor referencial de la temperatura medias logarítmica que sirve para encontrar el flujo de calor global que se intercambia en el proceso, considerando que el valor de entrada de temperatura a 65.2°C es un valor alto respecto a la capacidad de calentamiento del módulo que permite elevar la temperatura hasta 70°C aproximadamente.



Gráfica 3

De la gráfica se observa el desarrollo del perfil para el caudal de entrada de agua caliente a 0.75 Lit/min, iniciando con una capacidad de caudal bajo sabiendo que el modulo tiene como flujo mínimo de inicio a 0.5 Lit/min, por lo tanto el valor que se considero para iniciar permite estudiar la transferencia de calor que entrega un caudal bajo hacia la corriente de flujo frio a fin de ir incrementando este flujo para cuantificar su efecto en la corriente de agua fría, en este caso el agua fría de alimentación que proviene de la red publica inicia a 0.5 lit/min aproximadamente cediendo calor en el orden de 0.45 kW hasta 0.42kW para el agua fría.

ANALISIS PARA ENSAYO 2

Se toma el promedio del flujo masico registrado en el anexo 2, obteniéndose la densidad del agua caliente a 69.3 °C es 980.4 kg/m³ y el flujo de agua promedios 0.52 Lit/min, según Anexo 2

$$\dot{m}_{1,o} = 0.7 \frac{\text{Lit}}{\text{min}} * \frac{0.001 \text{m}^3}{\text{Lit}} * \frac{\text{min}}{60 \text{s}} * 977.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.0114 \text{kg/s}$$

Coefficiente convectivo interno promedio de agua caliente a temperatura promedio

$$T_m = \frac{69.3 + 59}{2} = 64.15^\circ\text{C}$$

Evaluando el coeficiente convectivo

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{977.5 * 0.16 * 0.01}{0.404 * 10^{-3}} = 3871.28$$

Cálculo de numero de Nusselt Flujo turbulento

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

$$Nu = 0.023 * (3871.28)^{0.8} * (2.75)^{0.3}$$

$$Nu = 23.11$$

Coefficiente convectivo interno

$$h_i = \frac{Nu * k}{Di} = \frac{23.11 * 0.659}{0.01} = 1522.94 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coeficiente convectivo externo

$$h_e = 459.54 \text{ m}^2\text{K}$$

Coeficiente global de transferencia de calor (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{1522.94} + \frac{1}{459.54}}$$

$$U = 353.018 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Cálculo del calor transferido

$$Q = U * A * \Delta T_{ML}$$

$$Q = 353.018 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * 0.025\text{m}^2 * 6 * (36.6^\circ\text{C}) = 1938.06 \text{ W}$$

$$Q = 1.93 \text{ kW}$$

Donde se obtiene la capacidad calorífica

$$C_{min} = (m * Cp)_{min} = 0.0114 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{KgK}} = 0.0477 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

$$C_{max} = (m * Cp)_{max} = 0.0134 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 4.182 \frac{\text{kJ}}{\text{KgK}} = 0.0560 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{(m * Cp)_{min}}{(m * Cp)_{max}}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0.0477 \frac{kW}{K}}{0.0560 \frac{kW}{K}} = 0.8517$$

Cálculo de los NTU-Número de unidades de transferencia de calor

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}}$$

$$NTU = \frac{0.353 \frac{kW}{m^2K} * 0.025m^2}{0.0477 \frac{kW}{K}}$$

$$NTU = 0.185$$

Cálculo de la efectividad para intercambiador de calor de tubo y coraza

$$\varepsilon = 2 [1 + c + \sqrt{1 + c^2} * \frac{1 + \frac{1}{[-NTU\sqrt{1+c^2}]}}{1 - [-NTU\sqrt{1+c^2}]}]$$

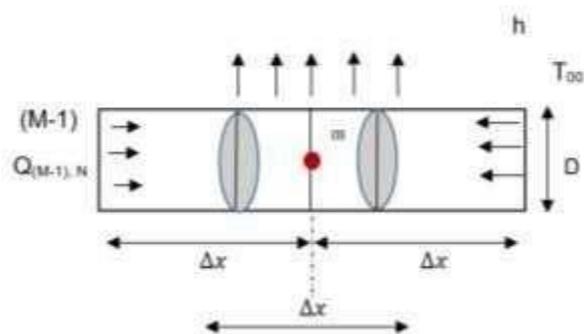
$$\varepsilon = 2 [1 + 0.817 + \sqrt{1 + (0.8517)^2} * \frac{1 + \frac{1}{[-0.185\sqrt{1+(0.8517)^2}]}}{1 - [-0.185\sqrt{1+(0.8517)^2}]}]$$

$$\varepsilon = 45.39\%$$

Utilizando los datos de Anexo 2 Nodo T_1 : 69.3 °C

Balance de energía

Nodo 6



Caso II: Datos promediados de Anexo 2

Estableciendo el balance de energía.

$$Q_{[N-1] \rightarrow N} = Q_{[N+1] \rightarrow N} + Q_{CONVECCION}$$

$$-k \cdot A \left[\frac{T_M - T_{M-1}}{\Delta x} \right] = -k \cdot A \left[\frac{T_{M+1} - T_M}{\Delta x} \right] + hP\Delta [T_M - T_{\infty}]$$

$$T_M \left[2 + \frac{hP\Delta x^2}{kA} \right] - \frac{hP\Delta x^2}{kA} * T_{\infty} - [T_{M+1}, T_{M-1}] = 0$$

Obteniendo ecuaciones nodales en nodos de frontera

Nodo 6

$$Q_{5-6} + Q_{cond-6} + Q_{conv-6} = 0$$

Resolviendo se tiene

$$kA \frac{T_5 - T_6}{\Delta x} + \frac{hP\Delta x}{2} [T_{\infty} - T_6] + hA [T_{\infty} - T_6] = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{hP\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] - \left[\frac{P\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] * T_{\infty} - T_5 = 0$$

Obteniendo ecuaciones de nodos Nudo 1: $T_1 = 69.3^\circ\text{C}$

Nudo 2: para $P = \pi * D \rightarrow \underline{P} = \underline{4}$

$$T_2 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_1 + T_3) = 0$$

Usando los valores establecidos

$$T_2 \left[2 + \frac{4(14.6)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} \right] - \frac{4(14.6)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} * (21.2) - 69.3 - T_3 = 0$$

$$2.029T_2 - 63.095 - T_3 = 0$$

Para el Nudo 3

$$T_3 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_2 + T_4) = 0$$

$$T_3 \left[2 + \frac{4(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(14.6)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} * (21.2) - T_2 - T_4 = 0$$

$$2.029T_3 - 0.6204 - T_2 - T_4 = 0$$

Para el Nudo 4

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_3 + T_5) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_3 - T_5 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.905 - T_3 - T_5 = 0$$

Para el Nudo 5

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_4 + T_6) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_4 - T_6 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.905 - T_4 - T_6 = 0$$

Para el Nudo 6

$$T_6 \left[1 + \frac{2h\Delta x^2}{kD} + \frac{h\Delta x^2}{k} \right] - \left[h\frac{\Delta x}{k} + \frac{2h(\Delta x)^2}{k \cdot D} \right] * T_\infty - T_5 = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{2(14.6) * 2 * (0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} + \frac{14.6 * (0.03)^2}{205} \right] - \left[14.6 * \frac{0.03}{205} + \frac{2(14.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] * 21.2 - T_5 = 0$$

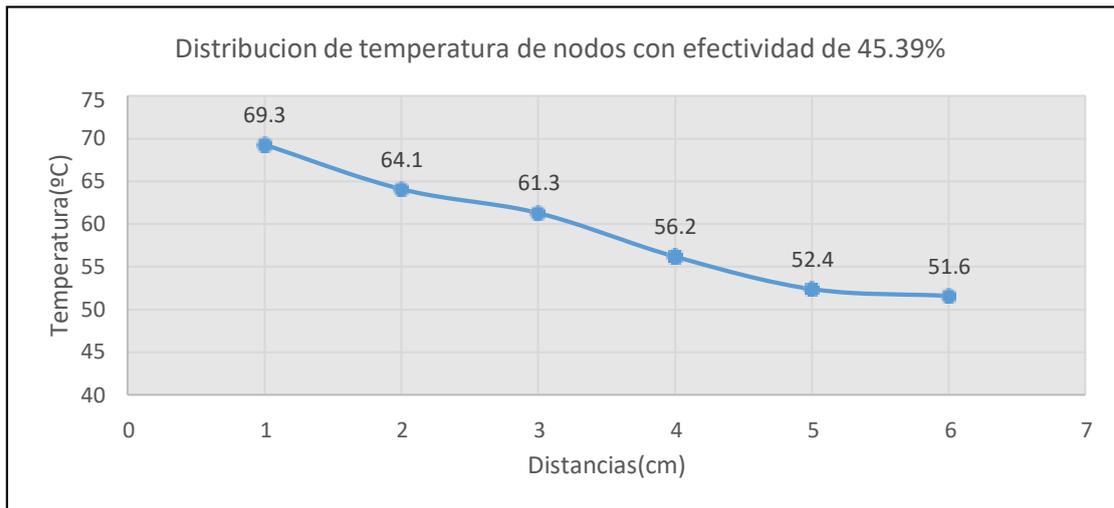
$$1.042T_6 - 4.814 - T_5 = 0$$

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$	$T_6(^{\circ}\text{C})$
69.3	64.1	61.3	56.2	52.4	51.6

Tabla 4

Distribución de temperatura en nodos ensayo 2

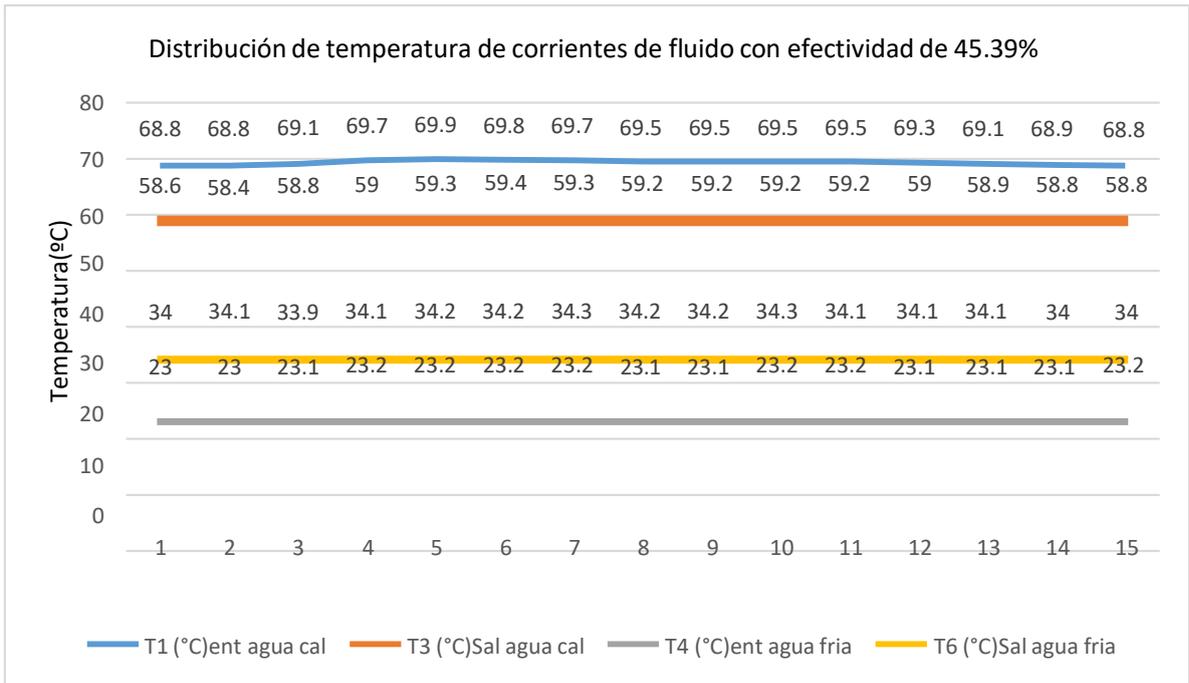
Distancia	Temperatura($^{\circ}\text{C}$)
0cm	69.3
0-3cm	64.1
3cm-6cm	61.3
6cm-9cm	56.2
9cm-12cm	52.4
12cm-15cm	51.6



Gráfica 4

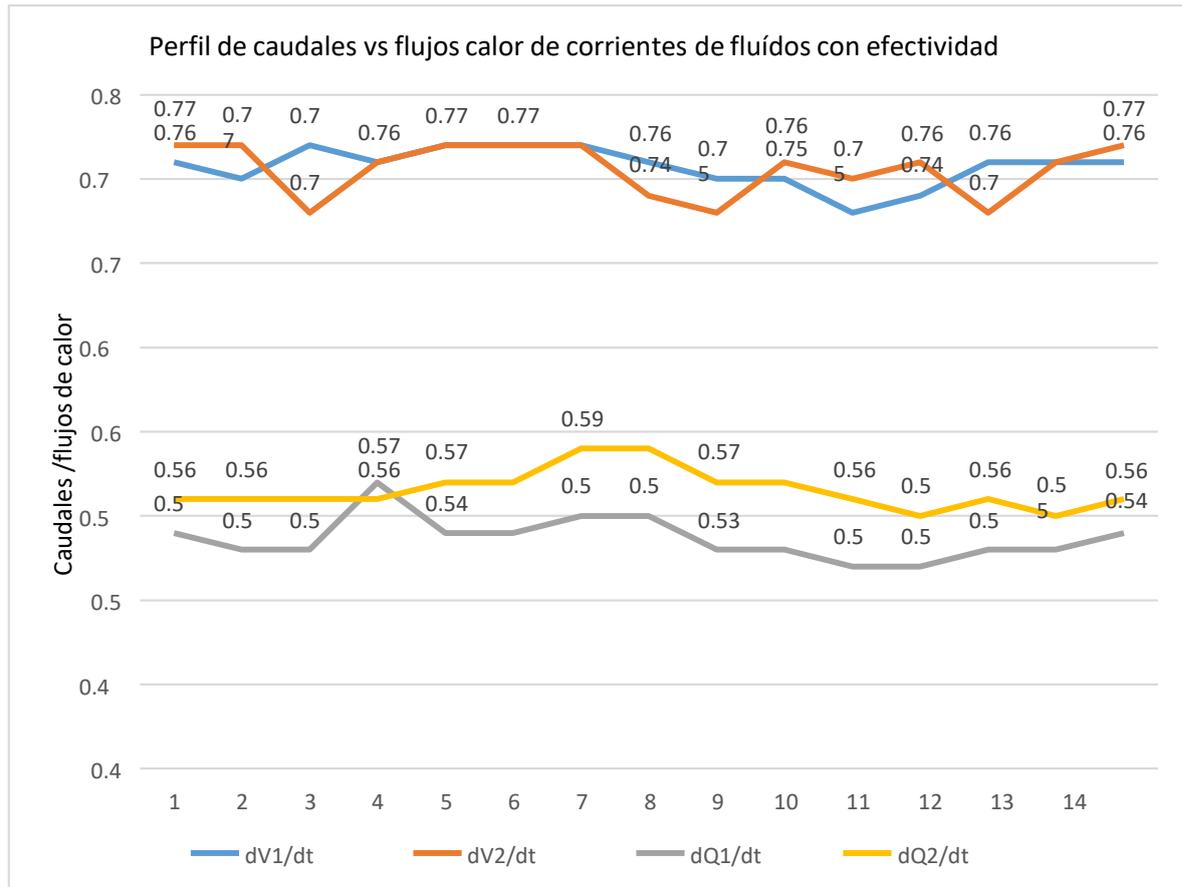
De la presente gráfica se observa la evolución de la temperatura desde la entrada a 69.3° Chasta la salida con un valor de 51.6°C, estos valores representan a las temperaturas que se han calculado en base al método nodal mediante métodos numéricos, asimismo estos datos sirven para conocer la distribución de temperaturas a lo largo de la extensión del tubo del intercambiador de calor con el fin de promediar parámetros convectivos y conocer su influencia en el coeficiente global de transferencia . Los valores obtenidos desde T1 hasta T6 representan la forma en que se enfría el agua caliente.

A continuación, se grafican las temperaturas registradas a través del módulo experimental, los datos se han tomado del anexo 2



Gráfica 5

De la gráfica se observa el desarrollo de las temperaturas iniciando con agua caliente desde 68.8 °C y que se enfría hasta 58.8°C en estas condiciones la temperatura de ingreso de agua fría se mantiene entre 23 °C y se calienta aproximadamente hasta 34.3°C aproximadamente, este perfil permite obtener el valor referencial de la temperatura medias logarítmica que sirve para encontrar el flujo de calor global que se intercambia en el proceso, considerando que el valor de entrada de temperatura a 68.8°C es un valor alto respecto a la capacidad de calentamiento del módulo que permite elevar la temperatura hasta 70°C aproximadamente.



Gráfica 6

De la gráfica se observa el desarrollo del perfil para el caudal de entrada de agua caliente a 0.77 Lit/min, iniciando con una capacidad de caudal bajo sabiendo que el módulo tiene como flujo mínimo de inicio a 0.73 Lit/min, por lo tanto el valor que se consideró para iniciar permite estudiar la transferencia de calor que entrega un caudal bajo hacia la corriente de flujo frío a fin de ir incrementando este flujo para cuantificar su efecto en la corriente de agua fría, en este caso el agua fría de alimentación que proviene de la red pública inicia a 0.53 lit/min aproximadamente cediendo calor en el orden de 0.53 kW hasta 0.56 kW para el agua fría.

ANALISIS PARA ENSAYO 3

Se toma el promedio del flujo masico registrado en el anexo 3, obteniéndose la densidad del agua caliente a 70.5 °C es 980.4 kg/m³ y el flujo de agua promedio es 1.05 Lit/min, según Anexo 3.

$$\dot{m}_{1,0} = 1.05 \frac{\text{Lit}}{\text{min}} * \frac{0.001 \text{m}^3}{\text{Lit}} * \frac{\text{min}}{60 \text{s}} * 982.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.0171 \text{kg/s}$$

Coefficiente convectivo interno promedio de agua caliente a temperatura promedio

$$T_m = \frac{70.5 + 62.5}{2} = 66.5^\circ\text{C}$$

Evaluando el coeficiente convectivo

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{982.4 * 0.27 * 0.01}{0.394 * 10^{-3}} = 6729.44$$

Cálculo de numero de Nusselt Flujo turbulento

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

$$Nu = 0.023 * (6729.44)^{0.8} * (2.68)^{0.3}$$

$$Nu = 35.69$$

Coefficiente convectivo interno

$$h_i = \frac{Nu * k}{Di} = \frac{35.69 * 0.663}{0.01} = 2366.247 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coeficiente convectivo externo

$$h_e = 611.25 \frac{W}{m^2K}$$

Coeficiente global de transferencia de calor (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{2366.247} + \frac{1}{611.25}}$$

$$U = 485.76 \frac{W}{m^2K}$$

Cálculo del calor transferido

$$Q = U * A * \Delta T_{ML}$$

$$Q = 485.76 \frac{W}{m^2K} * 0.025m^2 * 6 * (44.8^\circ C) = 3264.3072 W$$

$$Q = 3.264 kW$$

Donde se obtiene la capacidad calorífica

$$C_{min} = (m * Cp) = 0.0171 \frac{Kg}{s} * 4.170 \frac{kJ}{KgK} = 0.07130 \frac{kW}{K}$$

$$C_{max} = (m * Cp) = 0.0171 \frac{Kg}{s} * 4.180 \frac{kJ}{KgK} = 0.07158 \frac{kW}{K}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{(m * Cp)_{min}}{(m * Cp)_{max}}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0.07130 \frac{kW}{K}}{0.07158 \frac{kW}{K}} = 0.99$$

Cálculo de los NTU-Número de unidades de transferencia de calor

$$NTU = \frac{U * A}{C_{min}}$$

$$NTU = \frac{0.485 \frac{kW}{m^2K} * 0.025m^2}{0.07130 \frac{kW}{K}}$$

$$NTU = 0.017$$

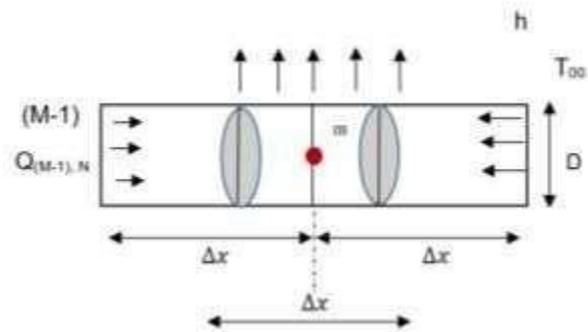
Cálculo de la efectividad para intercambiador de calor de tubo y coraza

$$\varepsilon = 2 [1 + c + \sqrt{1 + c^2} * \frac{1 + \frac{1}{[-NTU\sqrt{1+c^2}]}}{1 - [-NTU\sqrt{1+c^2}]}]$$

$$\varepsilon = 2 [1 + 0.99 + \sqrt{1 + 0.99^2} * \frac{1 + \frac{1}{[-0.017\sqrt{1+(0.99)^2}]}]}{1 - 0.99}]$$

$$\varepsilon = 39.28\%$$

Nodo $T_1: 70.5^\circ\text{C}$ Balance de energía Nodo 6



Caso III: Datos promediados de Anexo 3

Estableciendo el balance de energía.

$$Q_{[N-1] \rightarrow N} = Q_{[N+1] \rightarrow N} + Q_{\text{CONVECCION}}$$

$$-k \cdot A \left[\frac{T_M - T_{M-1}}{\Delta x} \right] = -k \cdot A \left[\frac{T_{M+1} - T_M}{\Delta x} \right] + hP\Delta \left[T_M - T_{\infty} \right]$$

$$T_M \left[2 + \frac{hP\Delta x^2}{kA} \right] - \frac{hP\Delta x^2}{kA} T_{\infty} - [T_{M+1}, T_{M-1}] = 0$$

Obteniendo ecuaciones nodales en nodos de frontera Nodo $T_1: 70.5^\circ\text{C}$

Balance de energía Nodo 6

$$Q_{5-6} + Q_{\text{cond-6}} + Q_{\text{conv-6}} = 0$$

Resolviendo se tiene

$$kA \frac{T_5 - T_6}{\Delta x} + \frac{hP\Delta x}{2} [T_{\infty} - T_6] + hA \left[T_{\infty} - T_6 \right] = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{hP\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] - \left[\frac{P\Delta x^2}{2kA} + \frac{h\Delta x}{k} \right] * T_\infty - T_5 = 0$$

Obteniendo ecuaciones de nodos
 Nodo 1: $T_1 = 70.5^\circ\text{C}$

Nodo 2: para $P = \pi * D \rightarrow \frac{P}{A} = \frac{4}{D}$

$$T_2 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_1 + T_3) = 0$$

Usando los valores establecidos

$$T_2 \left[2 + \frac{4(18.6)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} \right] - \frac{4(918.6)(0.03)^2}{205(6 * 10^{-3})} * (21.2) - 70.5 - T_3 = 0$$

$$2.029T_2 - 68.37 - T_3 = 0$$

Para el Nodo 3

$$T_3 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_2 + T_4) = 0$$

$$T_3 \left[2 + \frac{4(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(18.6)(0.03)^2}{(205)(6 * 10^{-3})} * (21.2) - T_2 - T_4 = 0$$

$$2.029T_3 - 0.6204 - T_2 - T_4 = 0$$

Para el Nodo 4

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_3 + T_5) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_3 - T_5 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.6204 - T_3 - T_5 = 0$$

Para el Nodo 5

$$T_4 \left[2 + \frac{4h\Delta x^2}{kD} \right] - \frac{4h\Delta x^2}{kD} * T_\infty - (T_4 + T_6) = 0$$

$$T_4 \left[2 + \frac{4(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] - \frac{4(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} * (21.2) - T_4 - T_6 = 0$$

$$2.029T_4 - 0.6204 - T_4 - T_6 = 0$$

Para el Nodo 6

$$T_6 \left[1 + \frac{2h\Delta x^2}{kD} + \frac{h\Delta x^2}{k} \right] - \left[\frac{\Delta x}{k} + \frac{2h(\Delta x)^2}{k \cdot D} \right] * T_\infty - T_5 = 0$$

$$T_6 \left[1 + \frac{2(18.6) * 2 * (0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} + \frac{18.6 * (0.03)^2}{205} \right] - \left[10 * \frac{0.03}{205} + \frac{2(18.6)(0.03)^2}{205 * 6 * 10^{-3}} \right] * 21.2 - T_5 = 0$$

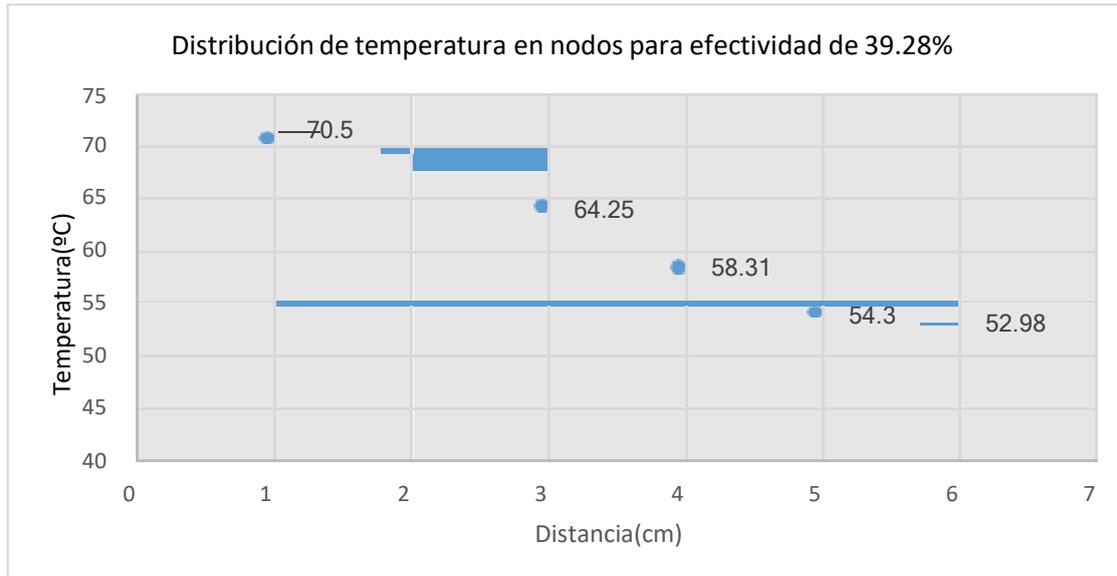
$$1.029T_6 - 0.311 - T_5 = 0$$

T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	T ₅ (°C)	T ₆ (°C)
70.5	68.36	64.25	58.31	54.3	52.98

Tabla 5

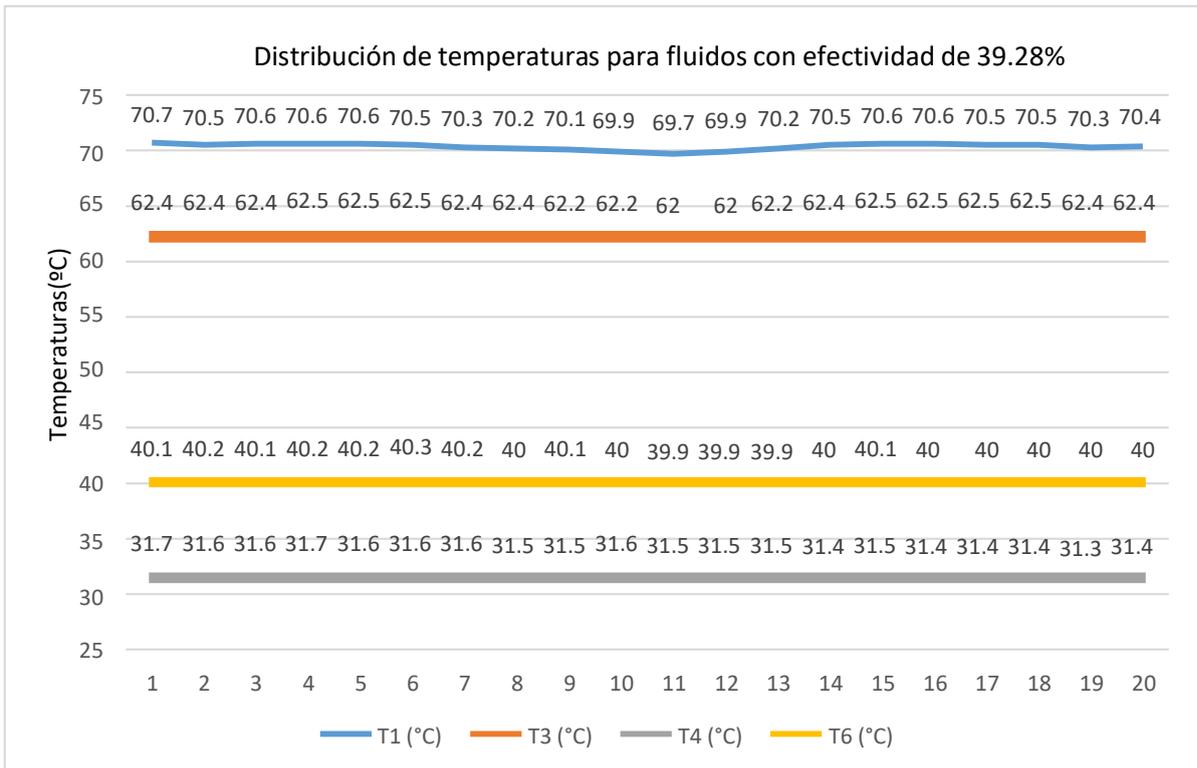
Distribución de temperatura en nodos ensayo 3

Distancia	Temperatura(°C)
0cm	70.5
0-3cm	68.36
3cm-6cm	64.25
6cm-9cm	58.31
9cm-12cm	54.3
12cm-15cm	52.98



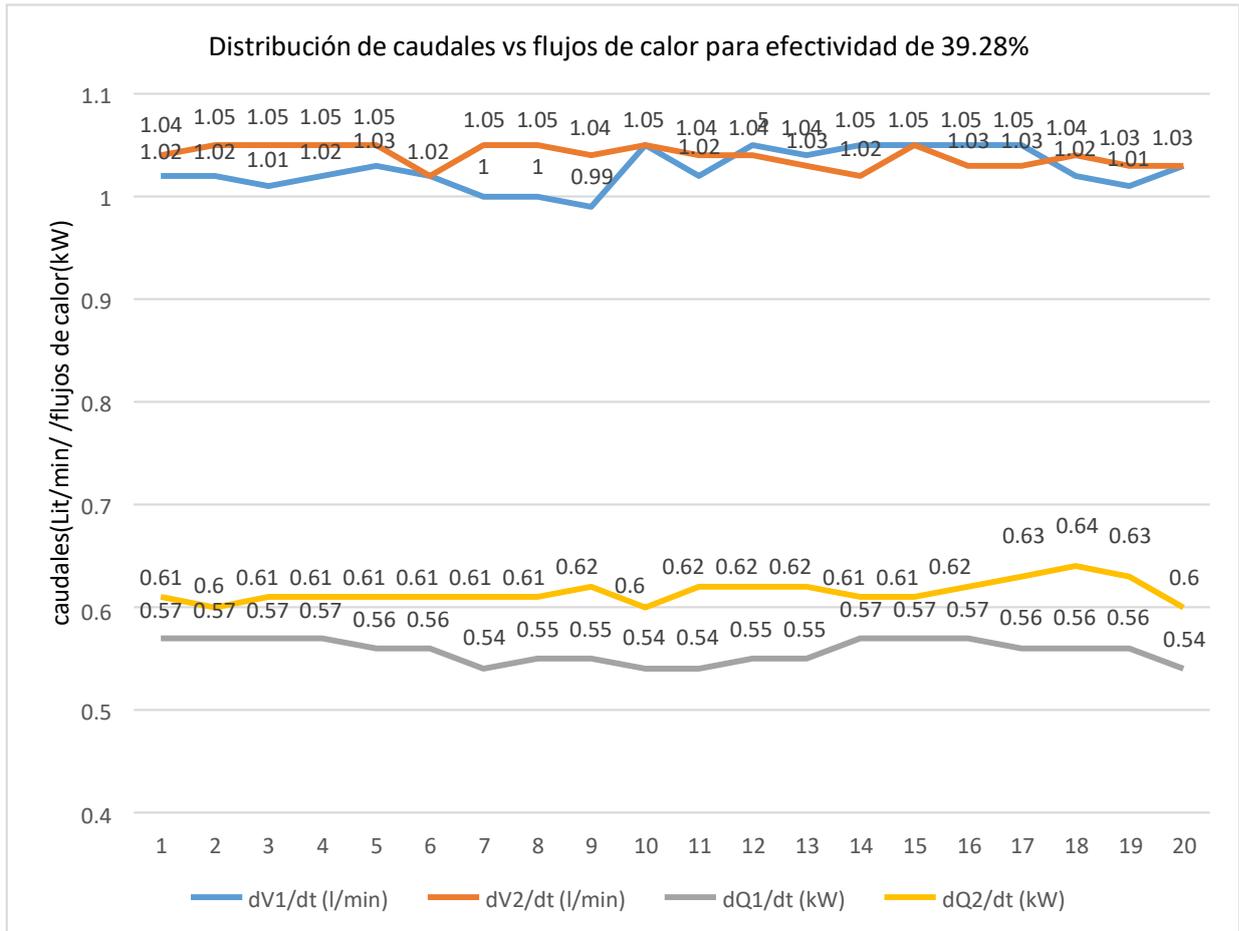
Gráfica 7

De la presente gráfica se observa la evolución de la temperatura desde la entrada a 70.5°C hasta la salida con un valor de 52.98°C, estos valores representan a las temperaturas que se han calculado en base al método nodal mediante métodos numéricos, asimismo estos datos sirven para conocer la distribución de temperaturas a lo largo de la extensión del tubo del intercambiador de calor con el fin de promediar parámetros convectivos y conocer su influencia en el coeficiente global de transferencia. Los valores obtenidos desde T1 hasta T6 representan la forma en que se enfría el agua caliente.



Gráfica 8

De la gráfica se observa el desarrollo de las temperaturas iniciando con agua caliente desde 70.7 °C y que se enfría hasta 62.4°C en estas condiciones la temperatura de ingreso de agua fría se mantiene entre 31.7 °C y se calienta aproximadamente hasta 40.1°C aproximadamente, este perfil permite obtener el valor referencial de la temperatura medias logarítmica que sirve para encontrar el flujo de calor global que se intercambia en el proceso.



Gráfica 9

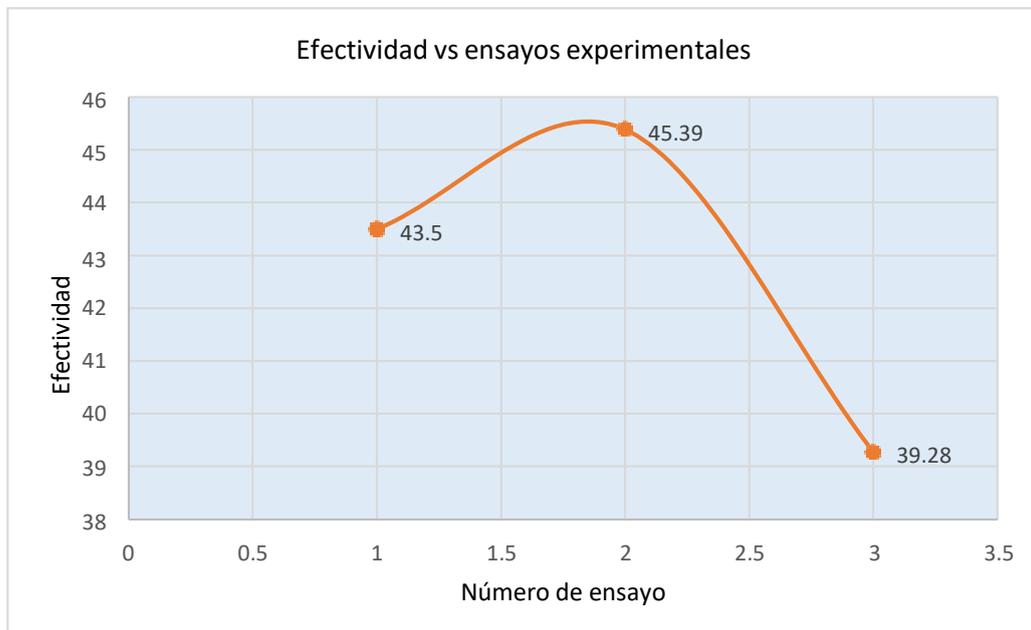
De la gráfica se observa el desarrollo del perfil para el caudal de entrada de agua caliente a 1.02 Lit/min, iniciando con una capacidad de caudal bajo sabiendo que el módulo tiene como flujo mínimo de inicio a 1.05 Lit/min, por lo tanto el valor que se consideró para iniciar permite estudiar la transferencia de calor que entrega un caudal bajo hacia la corriente de flujo frío a fin de ir incrementando este flujo para cuantificar su efecto en la corriente de agua fría, gana calor desde 0.57 kW hasta 0.61 kW en promedio.

4.2. RESULTADOS

Tabla 6

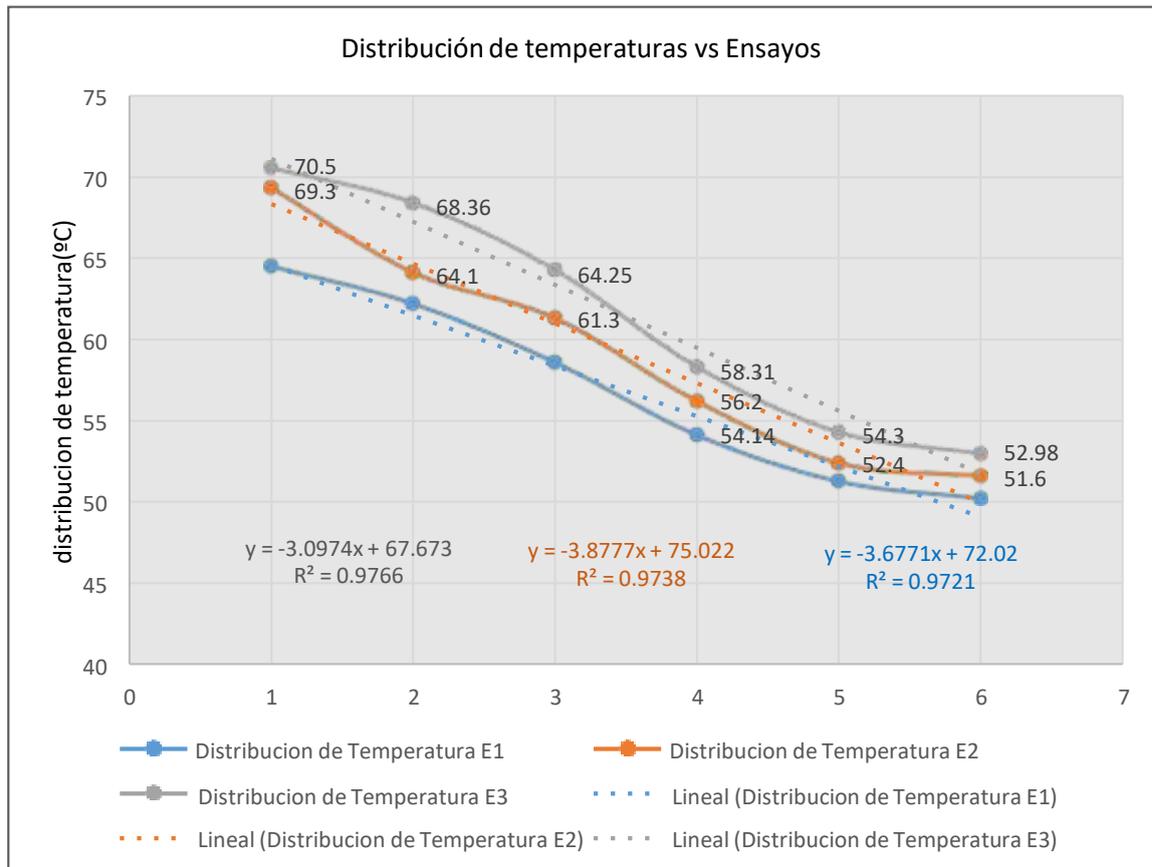
Datos de grupos de ensayos y efectividades

Grupo de experimento	Efectividad
ensayo 1	43.5
ensayo 2	45.39
ensayo 3	39.28



Gráfica 10

De la gráfica se observa que en el grupo de ensayo 1 que considera una temperatura de ingreso de agua de 64.5°C , el segundo grupo de ensayo considera una temperatura de entrada de agua caliente de 69.3°C y el último grupo de ensayo a una temperatura de entrada de agua de 70.5°C , señalan correspondientemente que las efectividades van en incremento desde 43.5%, 45.39% y decae a 39.28%, este último valor se debe a que los caudales de ambas Corrientes operaron a un valor muy cercano a 1.05 Lit cada uno.



Grafica 11

De la gráfica se puede observar que los perfiles de temperaturas cuyos valores han sido obtenidos a raíz de realizar particiones de 3cm entre cada punto nodal a lo largo de la longitud de la tubería, para observar el decaimiento de temperatura y compararse con los resultados que se obtienen de los sensores del módulo experimental que tiene instalado, sin embargo esta información permite obtener las curvas o funciones de la temperatura en función de la longitud o posición a lo largo de la tubería a fin de hacerse más analítico y determinista cualquier punto de temperatura que se desee evaluar a lo largo de la tubería.

DISCUSIONES

- Respecto del trabajo de Sotomayor Zajarov, D (2014). Los resultados encontrados a través de la simulación numérica indican una variación alrededor de 11% respecto a los datos brindados por el fabricante y de 4.5% respecto de la capacidad calculada analíticamente, además las tasas de transferencia de calor que presenta el intercambiador en diferentes zonas, los cuales sirvieron para punto de partida de optimización del intercambiador de calor con aletas, sin embargo la aplicación de métodos numéricos a través de análisis nodal permite encontrar una relación de distribución e temperaturas a lo largo de los puntos distribuidos del tubo del intercambiador de calor experimental, ya que los sensores solo registran las temperaturas a la entrada y salida de las tomas de flujo del intercambiador, por lo cual los métodos numéricos detallan con precisión la forma en que se distribuye la temperatura y por ende el calor, según lo calculado mediante métodos numérico se obtuvo a posterior una efectividad de 43.5% , 45.39% y finalmente 39.28 % al someter este último a ensayo a caudales similares a 1.05 lit/min
- De los resultados de Morales J, Campo A., (1991) " Simulación numérica de la convección mixta de gases en tubos verticales incluyendo inversión de flujo", tiene como objetivo. El método empleado consiste en la metodología de volúmenes finitos para el modelado del intercambiador de calor y la representación del conexionado de los tubos se realizó mediante la teoría de grafos. El resultado obtenido consiste en la verificación de la flexibilidad en transferencia de calor que tiene el modelo desarrollado, resolviendo distintos casos que involucran aletas secas y húmedas en el lado del aire. También fue posible predecir el comportamiento de los flujos de un evaporador bajo condiciones de aletas secas y húmedas, después de ajustar el modelo, se logró obtener valores de error inferior al 6% con respecto a los datos experimentales, para los resultados que se obtuvo en los 3 ensayos desarrollados se obtuvo un valor de efectividad optimizado de 45.39%.

- Según Márquez B, Valencia L, et al, en el artículo de investigación titulado (2016)”. Uso baffles helicoidales fue desarrollado por primera vez para intercambiadores de calor de tubos y tubos con deflectores verticales y han mostrado un rendimiento muy eficaz sobre todo para los casos en los que se controla el coeficiente de transferencia de calor , en el contexto del presente estudio se encontró que es conveniente fija el lado de corriente de fluido de menor caudal que en este caso está orientado al flujo de agua caliente, esta limitación hace de que se confronte el escenario real cuando se analizan intercambiadores de calor de tamaño industrial, en estas condiciones se encontró una dependencia del flujo másico de agua caliente al verse disminuido frente a la disposición de agua fría que proviene de la red pública, la ganancia de flujo de calor estuvo en el orden de 0.42kW aproximadamente para los 3 ensayos experimentales.
- Respecto a los valores obtenidos para la efectividad, estos se enmarcan en valores aceptables es decir a razón de que se utilizado un bajo caudal de agua caliente y se ha maximizado su temperatura, esto genera que el agua fría que ingresa a mayor proporción absorba mayor energía haciendo eficiente el proceso de transferencia, sin embargo se debe considera que los valores obtenidos de temperatura por los sensores se obtienen solo de las entradas y salidas, mientras que mediante métodos numéricos se obtuvo todo el perfil de temperatura en 6 puntos a lo largo de extensión de un tubo, haciendo que se conozca a mayor detalle su distribución, además se considerar las ecuaciones de temperatura en función a su posición o distancia

CONCLUSIONES

- Se caracterizó los parámetros de operación del módulo experimental de intercambio de calor con un caudal máximo disponible de equipo hasta 3.0 lt/min y una temperatura máxima de calentamiento de 75°C, asimismo se estableció a criterio de la experimentación, la temperaturas de entrada de agua caliente desde 64.5°C, 69.3°C y 70.5°C respectivamente, para caudales de agua fría que proviene de la red pública a razón desde 0.5 Lit/min hasta 1.5 lit/min.
- Los perfiles de temperatura se obtuvieron a través de la aplicación de métodos numéricos usando ecuaciones nodales para 6 puntos de distribución a lo largo de la longitud de la tubería con separación de 3cm, obteniéndose los siguientes datos para el ensayo 1, $T(x) = -3.0974(x) + 67.673$, para el ensayo 2, $T(x) = -3.877(x) + 75.022$ y el ensayo 3, $T(x) = -3.671(x) + 72.02$, respectivamente alcanzando valores muy aproximados a los que se midieron con los sensores que dispone el equipo modular, la diferencia entre el sistema de medición con sensores y los resultados obtenidos del método numérico es de 1.6% cumpliendo la hipótesis planteada.
- La eficiencia obtenida para cada uno de los ensayos corresponde a ensayo 1, 43.5%, para el ensayo 2, 45.39% y el ensayo 3 39.28% respectivamente a consideración de que el ultimo valor de efectividad disminuye a razón de que los caudales se equilibraron a un valor promedio de 1.05 Lit/min.

RECOMENDACIONES

- Para obtener una lectura de precisión al momento de ejecutar los ensayos experimentales se debe realizar una limpieza del sistema haciendo la purga de las líneas para eliminar sedimentos o fluidos acumulados al interior del circuito de agua del módulo experimental.
- Revisar las conexiones de los acoplamiento para los flujos al momento de instalarse
- Para una proporción adecuada de flujos máxicos o caudales se debe usar una relación equivalente de 1 a 2 o en general de k a $2nk$ con el objetivo de ir incrementando el flujo de un lado de la corriente y estabilizar la temperatura de corriente del otro fluido.
- Se debe prever un tiempo mínimo de 3 min de previa operación posterior a ello se debe registrar los parámetros.
- Comprobar el funcionamiento correcto de la cuba de agua caliente y los sensores de nivel y de temperatura antes de iniciar los experimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Freedman, B., Pryde, E. H. and Mounts., Variables affecting the yields of fatty esters from transterified vegetable oils., Journal of American Oil Chemist Society, Vol. 61, No 10, 1984, pp. 1638-1643.
- Incropera Frank P., Fundamentos de transferencia de Calor , Cuarta Edición , EditorialPrentice – Hall , México 1999.
- Keenan Y Keyes, Tablas de Propiedades Termodinámicas del vapor, Primera Edición,New-York. John Wiley Sons Inc., Noviembre 2007.
- White , F. "Mecánica de fluidos" Ed. McGraw Hill (2008)
- Cengel, Y. A.; Boles, M.A.: Termodinámica. Mc Graw-Hill, 1996
- Holman, J. P.: Transferencia de Calor, 8a edición, Mc Graw-Hill, Madrid, 1998.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación: Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio (6a. ed. --.). México D.F.: McGraw-Hil.
- Dávila, M (2006). Diseño y construcción de un intercambiador de calor de placas (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Juárez y Mendoza, K (2015). Metodología de cálculo para el diseño térmico de un intercambiador de calor de placas (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de México, México.
- Díaz y Vega, G (2017). Diseño y construcción de un intercambiador de calor de placas paralelas para el laboratorio de transferencia de calor. (Tesis de pregrado).Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

Lázaro, T y Taípe, A.(2017) .“Diseño , adaptación y operación de un sistema de calentamiento utilizando un intercambiador de calor de placas didácticos para el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería química de la universidad de Guayaquil.(tesis de doctorado). Universidad Pública de Terragona, España.

ANEXOS

ANEXO 1

Datos experimentales a caudal promedio 0.5 Lit/s y 0.72 Lit/s

dV1/dt (l/min)	dV2/dt (l/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	dQ1/dt (kW)	dQ2/dt (kW)	dQm/dt (kW)	dTm (K)	km (kW/(m ² *K))
0.5	0.75	65.2	0.2	53.1	22.6	0.2	31.5	-0.42	0.45	0.43	32	0.68
0.5	0.72	65.1	0.2	53	22.6	0.2	31.5	-0.42	0.48	0.45	32	0.71
0.5	0.71	65.1	0.3	53	22.6	0.2	31.5	-0.41	0.47	0.44	32	0.69
0.52	0.75	64.9	0.3	52.9	22.5	0.2	31.5	-0.42	0.47	0.44	31.9	0.7
0.5	0.75	64.8	0.3	52.8	22.4	0.2	31.4	-0.41	0.46	0.44	31.8	0.69
0.52	0.76	64.8	0.3	52.8	22.7	0.2	31.5	-0.42	0.47	0.45	31.7	0.7
0.51	0.77	64.6	0.3	52.8	22.7	0.2	31.5	-0.42	0.45	0.43	31.8	0.68
0.52	0.75	64.6	0.2	52.6	22.6	0.2	31.5	-0.41	0.45	0.43	31.7	0.68
0.51	0.77	64.6	0.3	52.6	22.6	0.2	31.4	-0.39	0.46	0.42	31.5	0.67
0.5	0.77	64.4	0.2	52.6	22.7	0.2	31.4	-0.4	0.46	0.43	31.4	0.68
0.48	0.76	64.3	0.3	52.5	22.7	0.2	31.3	-0.39	0.45	0.42	31.3	0.67
0.49	0.77	64.3	0.3	52.4	22.7	0.2	31.3	-0.41	0.45	0.43	31.4	0.69
0.5	0.73	64.1	0.3	52.4	22.7	0.2	31.3	-0.41	0.46	0.43	31.2	0.7
0.52	0.74	64	0.3	52.3	22.7	0.2	31.3	-0.4	0.46	0.43	31.1	0.69
0.47	0.75	63.8	0.3	52.1	22.6	0.2	31.2	-0.38	0.43	0.41	31.1	0.65

ANEXO 2

Datos experimentales a caudal promedio 0.7 Lit/s y 0.72Lit/s

dV1/dt (l/min)	dV2/dt (l/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	dQ1/dt (kW)	dQ2/dt (kW)	dQm/dt (kW)	dTm(K)	km (kW/(m ² *K))
0.76	0.77	68.8	0.2	58.6	23	0.2	34	-0.54	0.56	0.55	35.2	0.78
0.75	0.77	68.8	0.3	58.4	23	0.1	34.1	-0.53	0.56	0.54	35.2	0.77
0.77	0.73	69.1	0.2	58.8	23.1	0.2	33.9	-0.53	0.56	0.55	35.4	0.77
0.76	0.76	69.7	0.3	59	23.2	0.2	34.1	-0.57	0.56	0.56	35.7	0.79
0.77	0.77	69.9	0.3	59.3	23.2	0.2	34.2	-0.54	0.57	0.56	35.9	0.77
0.77	0.77	69.8	0.3	59.4	23.2	0.3	34.2	-0.54	0.57	0.56	35.8	0.78
0.77	0.77	69.7	0.2	59.3	23.2	0.2	34.3	-0.55	0.59	0.57	35.7	0.8
0.76	0.74	69.5	0.3	59.2	23.1	0.2	34.2	-0.55	0.59	0.57	35.6	0.8
0.75	0.73	69.5	0.3	59.2	23.1	0.2	34.2	-0.53	0.57	0.55	35.7	0.77
0.75	0.76	69.5	0.3	59.2	23.2	0.2	34.3	-0.53	0.57	0.55	35.6	0.77
0.73	0.75	69.5	0.3	59.2	23.2	0.2	34.1	-0.52	0.56	0.54	35.7	0.76
0.74	0.76	69.3	0.3	59	23.1	0.2	34.1	-0.52	0.55	0.54	35.6	0.75
0.76	0.73	69.1	0.3	58.9	23.1	0.2	34.1	-0.53	0.56	0.55	35.4	0.77
0.76	0.76	68.9	0.3	58.8	23.1	0.2	34	-0.53	0.55	0.54	35.3	0.77
0.76	0.77	68.8	0.2	58.8	23.2	0.2	34	-0.54	0.56	0.55	35.2	0.78

ANEXO 3

Datos experimentales a caudal promedio 1.01 Lit/s y 1.05 Lit/s

dV1/dt (l/min)	dV2/dt (l/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	dQ1/dt (kW)	dQ2/dt (kW)	dQm/dt (kW)
1.02	1.04	70.7	0.3	62.4	31.7	0.2	40.1	0.57	0.61	0.59
1.02	1.05	70.5	0.3	62.4	31.6	0.2	40.2	0.57	0.6	0.58
1.01	1.05	70.6	0.3	62.4	31.6	0.2	40.1	0.57	0.61	0.59
1.02	1.05	70.6	0.3	62.5	31.7	0.2	40.2	0.57	0.61	0.59
1.03	1.05	70.6	0.3	62.5	31.6	0.3	40.2	0.56	0.61	0.59
1.02	1.02	70.5	0.3	62.5	31.6	0.3	40.3	0.56	0.61	0.58
1	1.05	70.3	0.2	62.4	31.6	0.2	40.2	0.54	0.61	0.57
1	1.05	70.2	0.2	62.4	31.5	0.2	40	0.55	0.61	0.58
0.99	1.04	70.1	0.2	62.2	31.5	0.2	40.1	0.55	0.62	0.58
1.05	1.05	69.9	0.2	62.2	31.6	0.3	40	0.54	0.6	0.57
1.02	1.04	69.7	0.3	62	31.5	0.1	39.9	0.54	0.62	0.58
1.05	1.04	69.9	0.3	62	31.5	0.2	39.9	0.55	0.62	0.58
1.04	1.03	70.2	0.2	62.2	31.5	0.2	39.9	0.55	0.62	0.58
1.05	1.02	70.5	0.3	62.4	31.4	0.2	40	0.57	0.61	0.59
1.05	1.05	70.6	0.3	62.5	31.5	0.3	40.1	0.57	0.61	0.59
1.05	1.03	70.6	0.3	62.5	31.4	0.2	40	0.57	0.62	0.59
1.05	1.03	70.5	0.2	62.5	31.4	0.2	40	0.56	0.63	0.6
1.02	1.04	70.5	0.2	62.5	31.4	0.2	40	0.56	0.64	0.6
1.01	1.03	70.3	0.3	62.4	31.3	0.2	40	0.56	0.63	0.59
1.03	1.03	70.4	0.3	62.4	31.4	0.2	40	0.54	0.6	0.57

ANEXO 4

Tablas de propiedades termodinámicas de agua

Propiedades del agua saturada													
Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _{fg} , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

ANEXO 5

Registro fotográfico de equipos



Imagen de intercambiador de calor de tubo y coraza



Imagen de modulo experimental de uso para intercambiadores de calor

ANEXO 6

Registros fotográficos de experimento

Registro 1

Instalación de equipo modular y programación de software para toma de datos para intercambiador de calor de tubo y coraza.



Registro 2

Instalación de conectores de alimentación de agua caliente y fría.





ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Carlos Macedonio Montañez Montenegro

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Departamento Académico	ENERGIA, FISICA Y MECANICA					
Título:	X	Maestría:		Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa. Asesor / Unidad de Investigación revisora del trabajo de Investigación intitulado:

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EN CONDICIONES DE LABORATORIO

Del estudiante / docente:

De la escuela / departamento académico:

Constato que la investigación presentada tiene un porcentaje de similitud del % el cual se verifica con el reporte de originalidad de la aplicación Turnitin adjunto. Quién suscribe la presente, declaro el haber analizado dicho reporte y concluyo que las coincidencias detectadas no se conforman como plagio. A mi claro saber y entender, la investigación cumple con las normas de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, 03 de marzo de 2023

Firma:

Nombres y Apellidos del Asesor/presidente UI: Carlos Macedonio Montañez Montenegro

DNI: 42451038



DECLARACION JURADA DE AUTORIA

Yo, MICAELA BATRIZ HUARAZ CORNELIO

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:						
Departamento Académico:		ENERGIA, FISICA Y MECANICA				
Título:	X	Maestría:		Doctorado:		

Programa: Tesis de pregrado para titulación profesional

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación intitulado:

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA EN CONDICIONES DE LABORATORIO

presentado en 109 folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Nuevo Chimbote, 03 de marzo de 2023

Firma:

Nombres y Apellidos: MICAELA BEATRIZ HUARAZ CORNELIO

DNI: 72168147

9	cybertesis.unmsm.edu.pe	Fuente de Internet	1 %
10	qdoc.tips	Fuente de Internet	1 %
11	es.slideshare.net	Fuente de Internet	1 %
12	Submitted to Heriot-Watt University	Trabajo del estudiante	1 %
13	repositorio.uss.edu.pe	Fuente de Internet	1 %
14	eprints.uanl.mx	Fuente de Internet	< 1 %
15	ri.ues.edu.sv	Fuente de Internet	< 1 %
16	Submitted to CONACYT	Trabajo del estudiante	< 1 %
17	1library.co	Fuente de Internet	< 1 %
18	www.coursehero.com	Fuente de Internet	< 1 %
19	issuu.com	Fuente de Internet	< 1 %
20	Submitted to Universidad Andina del Cusco	Trabajo del estudiante	< 1 %

21	www.slideshare.net Fuente de Internet	< 1 %
22	todosloshechos.es Fuente de Internet	< 1 %
23	revistas.pascualbravo.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
24	Submitted to IPE Test Account Trabajo del estudiante	< 1 %
25	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	< 1 %
26	dccd.cua.uam.mx Fuente de Internet	< 1 %
27	hdl.handle.net Fuente de Internet	< 1 %
28	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo