



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA
DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN
LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS**

Izrael Pott

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, mayo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA
DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN
LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

IZAEL POTT

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 14 de noviembre 2014.

Izrael Pott

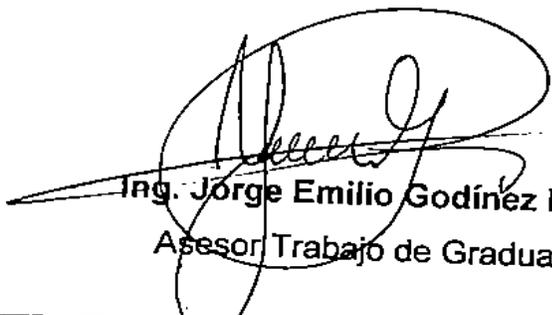
Guatemala 20 de febrero de 2017

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química
Presente

Reciba un cordial saludo y que sus actividades se realicen en forma satisfactoria.

Por medio de la presente, le comunico que he trabajado con el estudiante: Izael Pott, que se identifica con el número carné: 200580037 y CUI 3517643800101, apruebo en calidad de asesor el informe final de trabajo de graduación titulado "Implementación de un sistema de adquisición de datos para la determinación de coeficientes globales de transferencia de calor, en la unidad de intercambiadores de calor de coraza y tubos"

Sin otro particular, agradeciendo su atención a la presente, me despido.
Atentamente.


Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
Asesor Trabajo de Graduación

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874

MADE INGENIERIA
ACREDITADO
Centroamericano de Acreditación
2009-2012


ACAAI
Asociación Centroamericana de Acreditación
Proyecto de Acreditación

Guatemala, 22 de marzo de 2017.
Ref. EIQ.TG-IF.010.2017.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Daví
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 103-2014 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Izrael Pott**.
Identificado con número de carné: **2005-80037**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión Interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"D Y ENSEÑAN A TODOS"



Ing. **Otto Raúl De León De Paz**
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

Ref.EIQ.TG.019.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **IZAEL POTT** titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Wang Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

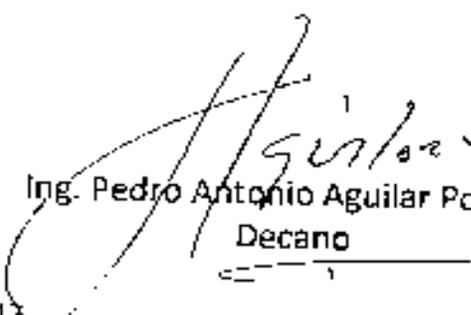




DTG. 237.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, EN LA UNIDAD DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS** presentado el estudiante universitario: **Izrael Pott**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polar
Decano



Guatemala, mayo de 2017

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme en todo momento de mi vida, y llegar a esta meta tan anhelada.
- Mis padres** Jose Pott y Alfonsa Pott Castañeda, por su amor y apoyo constante, y enseñarme a nunca perder las esperanzas.
- Mi esposa** Brenda Veronica López Gabriel, por todo el amor y paciencia, por el apoyo incondicional para alcanzar esta meta.
- Mis hijos** Kelvin e Isaac Pott, por ser mi inspiración y una gran bendición.
- Mis hermanos** Jose Luis, Miguel, Rangel y Edwin Pott, por su apoyo y siempre estar en las buenas y en las malas.
- Mi asesor** Ing. Jorge Godínez, por darme la oportunidad de aprender de sus enseñanzas y consejos en la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la bendición de la vida y guiarme siempre.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme ser parte de esta casa de estudios y darme la formación para alcanzar esta meta y otras más.
Escuela de Ingeniería Química	Por la formación brindada por profesionales de gran conocimiento.
Compañeros y amigos	Por ser buenos amigos y ser parte de mi vida. A ustedes queridos amigos: Estuardo Toledo, Estuardo Aguilar, Gerson Vásquez, Diego Simón, Lervy Monzón, Jorge Chinchilla, María José Solares, Karen Hernández, Karen Arreaza, Graciela Reyes y Eva Gramajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Transferencia de calor.....	3
2.1.1. Radiación.....	3
2.1.2. Conducción.....	4
2.1.3. Convección	5
2.2. Estados de flujo	7
2.2.1. Flujo laminar	8
2.2.2. Flujo turbulento	8
2.2.3. Número de Reynolds	9
2.3. Intercambiadores de calor de tubos y coraza	10
2.4. El coeficiente de transferencia de calor total limpio	11
2.4.1. Coeficiente transferencia de calor dentro de los tubos.....	12
2.4.1.1. Flujo laminar dentro de los tubos.....	12
2.4.1.2. Flujo turbulento dentro de los tubos.....	13

2.4.1.3.	Correlación en forma gráfica los flujos dentro de los tubos.....	14
2.4.2.	Coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza.....	15
2.4.2.1.	Diámetro equivalente del lado de la coraza.....	16
2.4.2.2.	Correlación en forma gráfica los flujos dentro de la coraza	18
2.5.	El coeficiente de transferencia de calor total de diseño	19
2.5.1.	El flujo de calor.....	20
2.5.2.	La diferencia verdadera de temperatura	20
2.6.	El factor de obstrucción.....	23
2.7.	Sensores de temperatura.....	23
2.7.1.	Termocuplas.....	24
2.7.2.	Termistores	25
2.7.3.	Termorresistencias.....	25
2.7.3.1.	Calibración del RTD de platino o PRT	26
2.7.3.2.	Conexión al puente Wheatstone	33
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	39
3.1.	Variables	39
3.2.	Delimitaciones de campo de estudio.....	40
3.3.	Recursos humanos disponibles	40
3.3.1.	Investigador.....	40
3.3.2.	Asesor	41
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	41
3.4.1.	Equipo	41
3.4.2.	Materiales.....	41

3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	42
3.5.1.	Técnica cualitativa	42
3.5.2.	Técnica cuantitativa	42
3.5.2.1.	Coeficiente de transferencia de calor total limpio.....	42
3.5.2.2.	Coeficiente de transferencia de calor total de diseño	43
3.5.2.3.	Factor de obstrucción	43
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	43
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	54
3.7.1.	Información según la temperatura medida con los RTD.....	54
3.7.2.	Información según la temperatura medida con los sensores bimetalicos.....	66
3.7.3.	Cálculos para ICCT1	74
3.8.	Análisis estadístico	92
4.	RESULTADOS	95
4.1.	Coeficientes de transferencia de calor	95
4.2.	Factores de obstrucción	96
4.3.	Puntos diseñados para la instalación de los RTD.	98
4.4.	Programa de mantenimiento y modo de operación del equipo.....	99
4.5.	Modo de operación del equipo	101
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	103
	CONCLUSIONES	109

RECOMENDACIONES 111
BIBLIOGRAFÍA..... 113
APÉNDICES..... 115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujo de calor a través de una pared.....	4
2.	Coeficiente de convección	6
3.	Flujo laminar en tubos.....	8
4.	Flujo turbulento en tubos.....	9
5.	Intercambiador de calor de tubos y coraza	10
6.	Intercambiador 1-2 con tubos en U (1-2 significa 1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos.....	11
7.	Arreglos comunes para los tubos de intercambiadores de calor de tubos y coraza.....	11
8.	Curva de transferencia de calor lado de tubos.....	14
9.	Arreglo de tubos y diámetro equivalente	16
10.	Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados.....	18
11.	Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2.....	21
12.	Factor de corrección en un intercambiador 1-2.....	22
13.	Conexión del RTD de 3 hilos en un puente Wheatstone.....	33
14.	Conexión de los 6 RTD de 3 hilos en un puente Wheatstone	37
15.	Diagrama de flujo de metodología de cálculo	49
16.	Flujo volumétrico del aceite se puede expresar en función de la altura del rotámetro	77
17.	Diagrama de equipo del sistema de intercambiadores de calor de coraza y tubos.....	98

TABLAS

I.	Coeficientes de CVD de los modelos estándar.....	27
II.	Clases de Exactitud de los RTD	28
III.	Presión de entrada del vapor en el intercambiador con sistema vapor-aceite	43
IV.	Datos de flujo del aceite en los intercambiadores de calor	44
V.	Datos de flujo del agua en el intercambiador de calor	44
VI.	Datos de operación del aceite en el ICCT1	45
VII.	Datos de operación del aceite en el ICCT2	46
VIII.	Datos de operación del agua en el intercambiador con sistema aceite-agua	47
IX.	Parámetros geométricos en sistema inglés	48
X.	Valores de temperatura	54
XI.	Valores promedio de temperatura.....	55
XII.	Flujo de volumétrico del aceite.....	55
XIII.	Propiedades del aceite y de proceso	56
XIV.	Propiedades del aceite y de proceso	56
XV.	Propiedades del aceite y de proceso	57
XVI.	Propiedades del aceite y de proceso	57
XVII.	Propiedades del aceite y de proceso	58
XVIII.	Dimensiones de los ICCT1 e ICCT2 en sistema internacional de unidades (SI)	58
XIX.	Propiedades del vapor de agua	59
XX.	Propiedades del condensado	59
XXI.	Coeficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT1	60
XXII.	Propiedades del agua en ICCT2.....	60
XXIII.	Propiedades del agua en ICCT2.....	61
XXIV.	Coeficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT2	62

XXV.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1.....	63
XXVI.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1.....	64
XXVII.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2.....	65
XXVIII.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2.....	65
XXIX.	Valores promedio de temperatura.....	66
XXX.	Propiedades del aceite y de proceso	66
XXXI.	Propiedades del aceite y de proceso	67
XXXII.	Propiedades del aceite y de proceso	67
XXXIII.	Propiedades del aceite y de proceso	68
XXXIV.	Propiedades del aceite y de proceso	68
XXXV.	Propiedades del vapor de agua	69
XXXVI.	Propiedades del vapor de agua	69
XXXVII.	Coefficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT1	70
XXXVIII.	Propiedades del agua en ICCT2	70
XXXIX.	Propiedades del agua en ICCT2	71
XL.	Coefficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT2.....	71
XLI.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1.....	72
XLII.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1.....	72
XLIII.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2.....	73
XLIV.	Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2.....	74
XLV.	Ecuación matemática para el flujo volumétrico del aceite	77

XLVI.	Confiabilidad de los datos obtenidos de factor de obstrucción con los sensores RTD	92
XLVII.	Confiabilidad de los datos obtenidos de factor de obstrucción con los sensores bimetálicos.....	93
XLVIII.	Coeficientes globales de transferencia de calor para el intercambiador de calor (ICCT) 1 y 2, y propiedad del aceite con datos de los RTD.....	95
XLIX.	Coeficientes globales de transferencia de calor para el intercambiador de calor (ICCT) 1 y 2, y propiedad del aceite con datos de los sensores bimetálicos	96
L.	Factor de obstrucción para los intercambiadores de calor 1 y 2 con datos de los RTD	97
LI.	Factor de obstrucción para los intercambiadores de calor 1 y 2 con datos de los sensores bimetálicos	97
LII.	Programa de mantenimiento para los sensores de temperatura y el intercambiador de calor	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A, A_i	Área superficial, Área superficial interior del tubo
A_o	Área superficial exterior del tubo
a_{ti}, a_{to}	Área de flujo total del interior y exterior de banco de tubos, respectivamente
c_{pW}	Calor específico del agua
h_{fg}^*	Calor latente modificado
c_{pO1}, c_{pO2}	Calor específico del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
c_{pl}	Calor específico en del condensado
A, B, C	Coefficientes de la ecuación de Callender-Van Dusen
h, h_i, h_o	Coefficiente de transferencia de calor, coeficiente de película en el interior del tubo, coeficiente de película en el exterior del tubo
dt	Cambio de temperatura
h_{i1}, h_{i2}	Coefficiente de transferencia de calor de lado interior de tubos en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
U_{D1}, U_{D2}	Coefficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
h_{o2}	Coefficiente de transferencia de calor del lado de la coraza en ICCT2
U_{C2}	Coefficiente de transferencia total limpio en ICCT2

$h_{\text{vert},20 \text{ tubos}}$	Coeficiente de transferencia de calor para la condensación sobre 20 tubos
U_{C1}, U_{C2}	Coeficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
h_{horiz}	Coeficiente de transferencia de calor para la condensación sobre un tubo horizontal
α	Coeficiente térmico del metal de platino
δ	Coeficiente de segundo orden de la ecuación CVD
β	Coeficiente de segundo orden de la ecuación CVD
k	Conductividad térmica
k_w	Conductividad térmica del agua
k_l	Conductividad térmica del condensado
k_{O1}, k_{O2}	Conductividad térmica del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
ρ_{O1}, ρ_{O2}	Densidad del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
ρ_v	Densidad del vapor
ρ_l	Densidad del condensado
ρ_{w2}	Densidad del agua en ICCT2
$\Delta t_1, \Delta t_2$	Diferencia de temperatura en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
d_i	Diámetro interior del tubo
d_o	Diámetro exterior del tubo
D_s, D_e	Diámetro interno y equivalente de la coraza, respectivamente
dQ	Diferencial de calor
b	Espaciado de deflectores
P_T	Espaciado de tubos (pitch)
h_{fg}	Entalpía de vaporización del vapor de agua

J_{HO1}, J_{HO2}	Factor para transferencia de calor del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
J_{HW}	Factor para transferencia de calor del agua en ICCT2, respectivamente
F_{t1}, F_{t2}	Factor de corrección de diferencia de temperatura para ICCT1 e ICCT2
r	Factor veces mayor
Q	Flujo de calor
I_1	Flujo de corriente en ramo 1
I_2	Flujo de corriente en ramo 2
\dot{V}_o	Flujo volumétrico del aceite
\dot{V}_w	Flujo volumétrico del agua
\dot{m}_w	Flujo másico del agua
R	Grupo temperatura
S	Grupo temperatura
dt/dx	Gradiente de temperatura
$^{\circ}C$	Grado Celsius
L	Longitud.
P_{sig}	Libra-fuerza por pulgada cuadrada manométrica
m	Metro
mV	Milivoltios
mm	Milímetro
$MLDT$	Media logarítmica de la diferencia de temperatura
G_{sw}	Masa velocidad del agua
Re_w	Número de Reynolds de flujo del agua en ICCT2
Re	Número de Reynolds
Re_{O1}, Re_{O2}	Número de Reynolds de flujo del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
n	Numero de pasos

Ω	Ohmios
w	Peso del flujo del fluido (kg/s)
R_T	Resistencia del RTD a una temperatura T ()
R_{100°	Resistencia del RTD a 100 °C ()
$R_{0^\circ C}$	Resistencia del RTD a 0 °C ()
R_{TH}	Resistencia del RTD a la temperatura T_H
R_w	Resistencia del alambre del RTD
R_{di}, R_{do}, R_{do}	Resistencia térmica o factor de obstrucción de los lodos en el interior del tubo, en el exterior del tubo y total, respectivamente
C'	Sección libre entre tubos
T_1, T_2	Temperatura de entrada y salida del fluido caliente, respectivamente
t_1, t_2	Temperatura de entrada y salida del fluido frío, respectivamente
t_{sat}	Temperatura de saturación del vapor
t_s	Temperatura de pared del tubo
t_f	Temperatura de película de condensado
$t, t_{eO1}, t_{sO1}, t_{eO2}, t_{sO2}$	Temperatura, Temperatura de entrada y salida del aceite en ICCT1, respectivamente. Temperatura de entrada y salida del aceite en ICCT2, respectivamente.
t_{eW2}, t_{sW2}	Temperatura de entrada y salida del agua del ICCT2, respectivamente.
t_{eV1}, t_{sV1}	Temperatura de entrada y salida del vapor del ICCT1, respectivamente
$\bar{t}_{eO1}, \bar{t}_{sO1}, \bar{t}_{eO2}, \bar{t}_{sO2}$	Temperatura promedio de entrada y salida del aceite en ICCT1, respectivamente. Temperatura promedio

	de entrada y salida del aceite en ICCT2, respectivamente
$\bar{t}_{01}, \bar{t}_{02}$	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
\bar{t}_w	Temperatura promedio de flujo del agua en ICCT2
$\hat{\tau}, \hat{\tau}_o, \hat{\tau}_w$	Tiempo de flujo, tiempo de flujo del aceite y del agua, respectivamente.
Q_1, Q_2	Transferencia de calor en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
v_o	Velocidad lineal del aceite
V, V_w, V_o	Volumen, volumen del agua y aceite, respectivamente.
μ_{01}, μ_{02}	Viscosidad del aceite en ICCT1 e ICCT2, respectivamente
μ_i	Viscosidad dinámica del condensado
μ_w	Viscosidad dinámica del agua

GLOSARIO

Caída de voltaje	Pérdida de voltaje debido a la resistencia en los dispositivos eléctricos.
Calor	Es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.
Coeficiente de transferencia de calor	Es la constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y la fuerza impulsora termodinámica, la diferencia de temperatura.
Intercambiador de calor	Un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos a distintas temperaturas.
Factor de obstrucción	Es la resistencia térmica introducida por el depósito de basura o incrustaciones en un intercambiador de calor.
Puente Wheatstone	Un circuito constituido por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo uno de ellas la resistencia bajo medida.
Temperatura	Es la energía cinética traslacional promedio que poseen las moléculas de una sustancia en determinado estado de agregación.

RESUMEN

En el presente informe de trabajo de investigación se instalaron sensores de temperatura con resistencia de platino o RTD (del inglés, *Resistance Temperature Detectors*) para las entradas y salidas de los fluidos en el intercambiador de calor de coraza y tubos (ICCT) ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos. Se determinaron medidas de temperatura con el fin de evaluar el rendimiento del intercambiador de calor de coraza y tubos hallando los valores de sus coeficientes globales de transferencia de calor y finalmente los factores de obstrucción.

Se procedió a evaluar los valores de temperatura de proceso del intercambiador de calor con los termómetros bimetálicos. Luego, se verificó que los sensores de temperatura RTD son los más adecuados para las condiciones del proceso. Los puntos adecuados de instalación se mantuvieron en las mismas posiciones donde estaban los sensores bimetálicos, con una inmersión de aproximadamente 3 pulgadas (0,0762 m) dentro de los cabezales y coraza.

Se determinó que los valores de factor de obstrucción obtenidos con los datos de temperatura del sensor bimetálico son mayores que el valor requerido, pero levemente mayor en comparación con los valores obtenidos con los RTD. La diferencia de los valores de factor de obstrucción se debió mayormente a la influencia del fenómeno de cavitación, presión de vapor de entrada inestable y los cálculos. Se implementó un programa de mantenimiento y procedimientos de manejo del equipo con el fin de mejorar el funcionamiento del equipo y la obtención de resultados.

OBJETIVOS

General

Implementación de un sistema de adquisición de datos para la determinación de coeficientes globales de transferencia de calor en la unidad de intercambiadores de calor de coraza y tubos.

Específicos

1. Evaluar el desempeño actual de los intercambiadores de calor de coraza y tubos.
2. Diseñar los puntos adecuados para la instalación de los nuevos sensores de temperatura.
3. Evaluar el estado de desempeño de los intercambiadores de calor con los nuevos sensores instalados.
4. Implementar un programa de mantenimiento para los sensores de temperatura y el intercambiador de calor.

HIPÓTESIS

Es posible hallar el desempeño del intercambiador de coraza y tubos utilizando datos de temperatura más exacta obtenida con los nuevos sensores de temperatura y otros parámetros de operación como flujo, presión y tiempo, y hallar una diferencia con el desempeño hallado utilizando los termómetros actuales.

Hipótesis nula

H_0 : No existe diferencia entre el desempeño del intercambiador de calor de coraza y tubos cuando se toman las medidas con el sensor de temperatura actual y con los nuevos sensores de temperatura.

H_0 : No es posible diseñar los puntos más adecuados para la instalación de los nuevos sensores, dependiendo del tipo de sensor, tipo de fluido y temperaturas.

Hipótesis alternativa

H_a : Existe diferencia entre el desempeño del intercambiador de calor de coraza y tubos cuando se toman las medidas con el sensor de temperatura actual y con los sensores de temperatura nuevos.

H_a : Es posible diseñar los puntos adecuados para la instalación de los nuevos sensores, dependiendo del tipo de sensor, tipo de fluido y temperaturas.

INTRODUCCIÓN

La temperatura es un parámetro crítico en las industrias de procesos químicos para mantener la calidad del producto final. El intercambiador de calor es el equipo que permite la transferencia de calor entre dos fluidos con un amplio rango de diferencia de temperatura, sin permitir que se mezclen. Los cambios de temperatura entre fluidos durante el proceso son datos esenciales que deben medirse con la mejor exactitud y rapidez a través de termómetros adecuados para el equipo.

El ingeniero encargado del proceso y diseño del equipo debe saber escoger los sensores de temperatura que mejor se adecúen a las condiciones del proceso y cuando darles mantenimiento. Datos de temperatura con exactitud aceptables permitirán evaluar el desempeño real del intercambiador de calor de coraza y tubos determinando los coeficientes globales de transferencia de calor. Los valores correctos de los coeficientes globales de transferencia de calor permiten obtener el dato de factor de obstrucción de diseño del equipo y, así, obtener la tolerancia permitida al intercambiador para poder darle servicio de mantenimiento después de estar en servicio por algún tiempo.

El monitoreo adecuado de la temperatura permite establecerlos periodos de mantenimiento para la unidad del intercambiador de calor de coraza y tubo, y evitar las pérdidas causadas por programación inadecuada de limpieza del equipo.

1. ANTECEDENTES

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, actualmente, no cuentan con un sistema de adquisición de datos hecho de sensores de temperatura con resistencia de platino que desarrollan un sistema de medida con mayor exactitud y precisión. Aún no se han hecho estudios sobre el mejoramiento de la toma de datos con este sistema de sensores de temperatura en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Transferencia de calor

“El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.”¹ En ingeniería, la transferencia de calor es la ciencia que tiene el interés de la razón o rapidez de la transferencia de calor. La transferencia de calor existe solamente si hay una diferencia en temperatura entre dos sistemas debido a que esta diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor, y no puede haber transferencia neta de calor entre dos sistemas que estén a la misma temperatura.

La temperatura es una forma de energía debido al movimiento (cinético) de las partículas, objetos con mayor energía en sus partículas tienden a tener mayor temperatura que los que tienen menor energía en sus partículas. Hay tres mecanismos básicos de la transferencia de calor, estos son la radiación, conducción y convección.

2.1.1. Radiación

“La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.”² Este es el único

¹CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 2

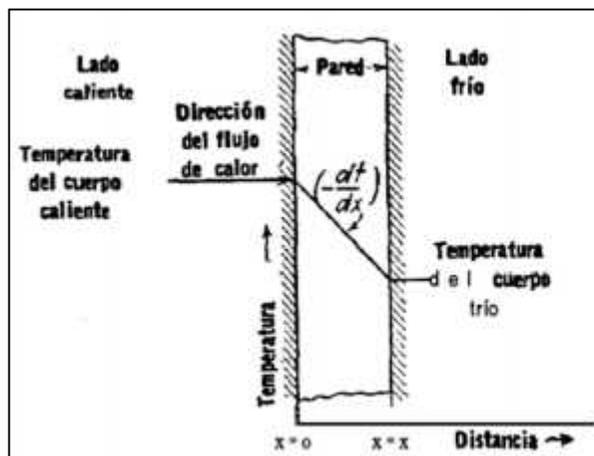
²Ibíd

proceso de transferencia de calor que no requiere la intervención de un medio, se puede transmitir el calor a través del vacío.

2.1.2. Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un material estacionario, puede ser una pared (véase figura 1.) con superficie isotérmica y cuerpo homogéneo e isotrópico.

Figura 1. Flujo de calor a través de una pared



Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 14.

Donde:

t = temperatura en cualquier punto de la pared ($^{\circ}\text{C}$)

x = espesor de la pared en dirección del flujo de calor (m)

El flujo de calor dQ está dado por la siguiente ecuación:

$$dQ = kA \left(-\frac{dt}{dx} \right) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 14.

Donde:

dQ = flujo de calor (W)

A = área superficial de la pared (m^2)

k = conductividad térmica del material de la pared (J/msK)

$-dt/dx$ = gradiente de temperatura (K/m)

La conductividad térmica k del material es determinada experimentalmente, es una constante de proporcionalidad de la ecuación 1, a mayor valor de k mejor conductor de calor y viceversa.

2.1.3. Convección

“La convección es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido.”³ Si se considera un recipiente con agua, este se calienta por la parte inferior, el agua cercana a la superficie inferior tiende a calentarse y se vuelve menos denso lo cual le permite ascender hacia la parte fría superior de agua y transmite su calor conforme asciende, este proceso se denomina convección natural o libre. Al agitar el agua con algún agitador, se produce convección forzada. La expresión que define el mecanismo de transferencia de calor por convección es la siguiente:

$$dQ = hAdt \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 14.

³CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa* p. 1

Donde:

dQ = flujo de calor (W)

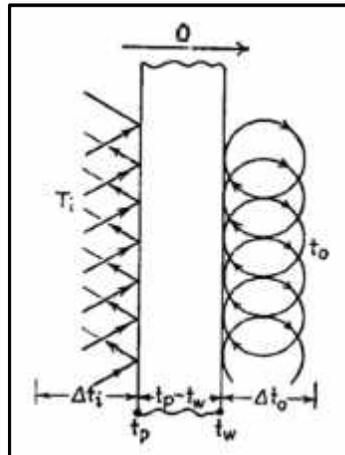
h = coeficiente de transferencia de calor (J/sm^2K)

A = área de la superficie (m^2)

dt = cambio de temperatura (K)

Si se supone la transferencia de calor de una tubería al aire, esta transferencia se efectúa por medio de la combinación de radiación y convección libre. La formación de una capa de aire ficticia en la pared del tubo produce una resistencia que debe ser medida experimentalmente. Se mide la temperatura del aire, la temperatura de superficie del tubo y el calor transferido desde el tubo, de acuerdo con la cantidad de vapor condensado. Considérese la pared de la tubería con las capas ficticias formadas en ambos lados:

Figura 2. **Coeficiente de convección**



Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 44.

Donde:

Q = calor transferido (W)

T_i = temperatura del fluido caliente en la parte interior (K)

Δt_i = diferencia de temperatura entre el fluido caliente en la parte interior y la pared del tubo interior (K).

t_p = temperatura interior de la pared del tubo (K)

t_w = temperatura exterior de la pared del tubo (K)

t_o = temperatura del fluido frío en el exterior (K)

Δt_o = diferencia de temperatura entre el fluido frío en el exterior y la pared del tubo exterior (K)

La transferencia de calor esta expresada con la siguiente ecuación:

$$Q = h_i A_i \Delta t_i = h_o A_o \Delta t_o \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 45.

Donde:

Q = calor transferido (W)

h_i = coeficiente de película en interior del tubo (J/sm^2K)

h_o = coeficiente de película en exterior del tubo (J/sm^2K)

A_i = área superficial interior del tubo (m^2)

A_o = área superficial exterior del tubo (m^2)

2.2. Estados de flujo

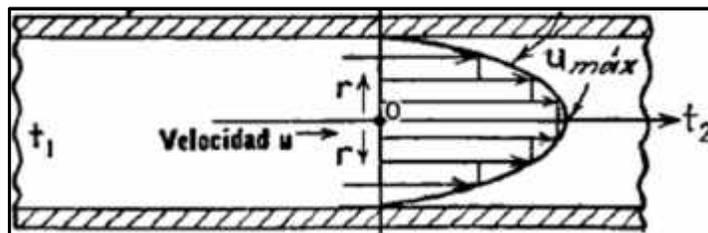
En un flujo donde una partícula se mueve más rápido que la otra, existe un gradiente de velocidad, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas. Las fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento pero, simultáneamente, la

viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas, se pueden producir diferentes estados de flujo.

2.2.1. Flujo laminar

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas del fluido fluyen en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo, esto se conoce como flujo laminar, es decir, las partículas se desplazan en forma de capas o láminas, como se ilustra en la figura 3:

Figura 3. Flujo laminar en tubos

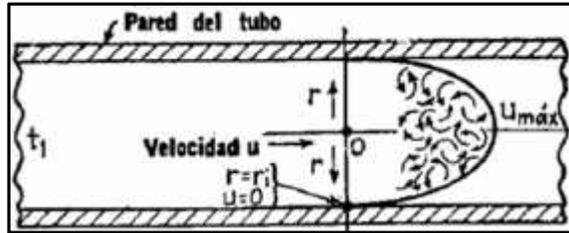


Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 48.

2.2.2. Flujo turbulento

La fricción entre partículas aumenta al aumentar el gradiente de velocidad y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto y, debido a la rotación, las partículas cambian de trayectoria. En virtud de los cambios de trayectorias, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Este tipo de flujo se denomina turbulento (véase la figura 4).

Figura 4. Flujo turbulento en tubos



Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 48.

2.2.3. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un valor numérico que relaciona el diámetro del tubo, velocidad del fluido, densidad y viscosidad del fluido. La relación es la siguiente:

$$Re = \frac{\rho v d_i}{\mu} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 48.

Donde:

Re = número de Reynolds

d_i = diámetro del tubo (m)

v = velocidad de flujo del fluido (m/s)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

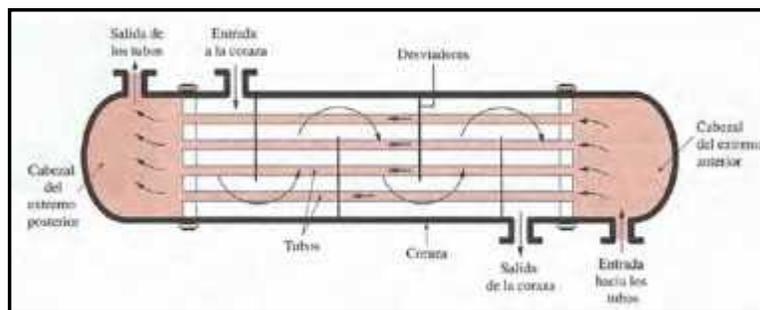
μ = viscosidad del fluido (kg/ms)

O. Reynolds determinó que, para flujo laminar, el número de Reynolds se encontraba en $Re < 2100$. Para flujos turbulentos, se encontraba en $Re > 2100$.

2.3. Intercambiadores de calor de tubos y coraza

El intercambiador de calor de tubo y coraza es un equipo que permite la transferencia de calor entre dos corrientes de proceso, haciendo pasar un fluido a través de los tubos y el otro fluido a través de la coraza, de esta manera se evita que los dos fluidos se mezclen. La figura 5 ilustra un esquema de las diferentes partes y flujo de fluidos en un intercambiador de calor tubos y coraza.

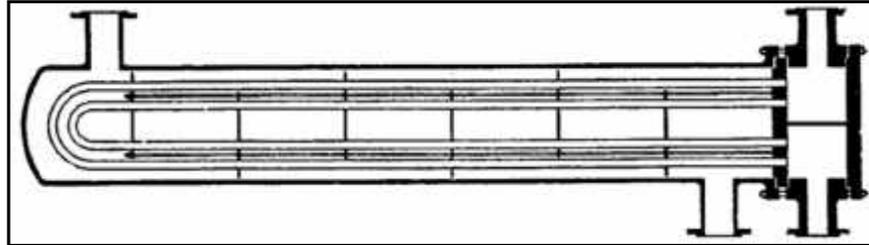
Figura 5. Intercambiador de calor de tubos y coraza



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de Calor y Masa*. p. 631.

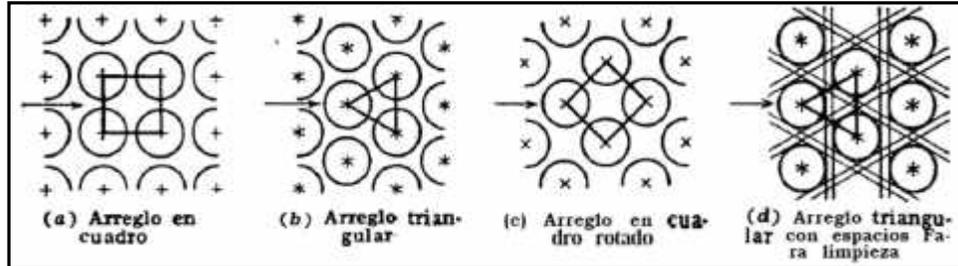
El intercambiador 1-2 mostrado en la figura 6 está diseñado con tubos que se doblan en forma de U y se ajustan en el espejo o cabezal de tubos. Los tubos se pueden dilatar, se le pueden instalar desviadores o deflectores entre los tubos con arreglo cuadrado o triangular, como se ilustra en la figura 7. Los tubos del intercambiador de calor pueden ser de acero, cobre, metal Muntz, latón, 70-30 cobre-níquel, aluminio bronce, aluminio y acero inoxidable. En el diseño de intercambiadores de calor los tubos de $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada de diámetro exterior son los más utilizados.

Figura 6. **Intercambiador 1-2 con tubos en U (1-2 significa 1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos)**



Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 168.

Figura 7. **Arreglos comunes para los tubos de intercambiadores de calor de tubos y coraza**



Fuente: KERN, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 160.

2.4. El coeficiente de transferencia de calor total limpio

Los coeficientes de transferencia de calor dentro del intercambiador de tubos y coraza se dividen en dos, dentro del tubo (h_i) y el otro en la coraza (h_o). El valor del coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza tiende a aumentar al tener un arreglo de tubos triangular, que uno cuadrado, también al agregar deflectores. En pocas palabras, el aumento en turbulencia del flujo

aumenta el valor del coeficiente de transferencia de calor. En la actualidad, para determinar el valor de los coeficientes de película del lado de la coraza (cuando el banco de tubos emplea deflectores con espaciados aceptables entre tubos, deflectores y corazas) y lado de los tubos, se utilizan correlaciones de datos industriales confiables. El valor del coeficiente de transferencia de calor total limpio está dado por la siguiente expresión:

$$U_C = \frac{h_i \frac{d_i}{d_o} h_o}{h_i \frac{d_i}{d_o} + h_o} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.135.

Donde:

U_C = coeficiente de transferencia de calor total limpio (J/sm^2K)

h_i = coeficiente de transferencia de calor en el interior de tubos (J/sm^2K)

h_o = coeficiente de transferencia de calor del fluido del lado de la coraza (J/sm^2K)

d_i = diámetro interior del tubo (m)

d_o = diámetro exterior del tubo (m)

2.4.1. Coeficiente transferencia de calor dentro de los tubos

2.4.1.1. Flujo laminar dentro de los tubos

La correlación utilizada para el flujo laminar dentro de los tubos es la planteada por Sieder y Tate ($Re < 2100$):

$$\frac{h_i D}{k} = 1,86 \left[\left(\frac{d_i G}{\mu} \right) \left(\frac{c \mu}{k} \right) \left(\frac{d_i}{L} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 133.

Donde:

h_i = coeficiente de transferencia de calor en el interior de tubos (J/sm²K)

c = calor específico del fluido a la temperatura del fluido (J/kgK)

d_i = diámetro interior del tubo (m)

k = conductividad térmica del material (J/smK)

G = velocidad de masa (kg/sm²)

μ = viscosidad del fluido a la temperatura del fluido (kg/ms)

μ_w = viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del tubo (kg/ms)

L = longitud del tubo o trayectoria (m)

2.4.1.2. Flujo turbulento dentro de los tubos

La correlación utilizada para el flujo turbulento dentro de los tubos es la planteada por Sieder y Tate (Re > 2300):

$$\frac{h_i D}{k} = 0,027 \left(\frac{c_i G}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 133.

Donde:

h_i = coeficiente de transferencia de calor en el interior de tubos (J/sm²K)

c = calor específico del fluido a la temperatura del fluido (J/kgK)

d_i = diámetro interior del tubo (m)

k = conductividad térmica del material (J/smK)

G = velocidad de masa (kg/sm²)

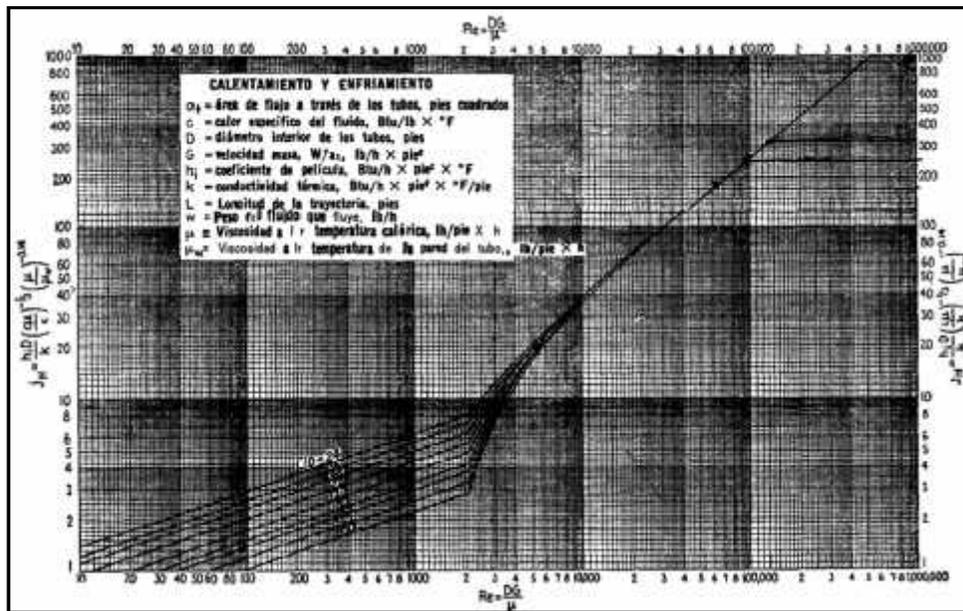
μ = viscosidad del fluido a la temperatura del fluido (kg/ms)

μ_w = viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del tubo (kg/ms)

2.4.1.3. Correlación en forma gráfica los flujos dentro de los tubos

La representación gráfica, $j_H = \left(\frac{h_i d_i}{k}\right) \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14}$ como ordenada y $\frac{iG}{\mu}$ como abscisa, de las ecuaciones aplicables en estado de flujo laminar y turbulento dentro del tubo se ilustra de la siguiente forma:

Figura 8. Curva de transferencia de calor lado de tubos



Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 939.

El valor del coeficiente de transferencia de calor en el interior de tubos está dado por la siguiente expresión:

$$h_i = j_H * \frac{k}{d_i} * \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 133.

Donde:

h_i = coeficiente de transferencia de calor en el interior de tubos (J/sm²K)

c_p = calor específico del fluido a la temperatura del fluido (J/kgK)

d_i = diámetro interior del tubo (m)

k = conductividad térmica del material (J/smK)

μ = viscosidad del fluido a la temperatura del fluido (kg/ms)

μ_w = viscosidad del fluido a la temperatura de la pared del tubo (kg/ms)

j_H = factor j (adimensional)

Donde, se supone la temperatura de la pared de tubo igual a la temperatura promedio del fluido interior debido a que la pared del tubo se considera delgado, lo cual permite expresar $\frac{\mu}{\mu_w} = 1$.

2.4.2. Coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza

La presencia de deflectores y arreglo triangular o cuadrado del banco de tubos del lado de la coraza, se asume que el flujo del fluido del lado de la coraza siempre es turbulento. Para valores de Reynolds de 2000 a 1 000 000, se puede utilizar la siguiente ecuación que representa con bastante exactitud el comportamiento de los datos:

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left(\frac{D_e G_s}{\mu} \right)^{0,55} \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 171.

Donde:

h_o = coeficiente de transferencia de calor del fluido del lado de la coraza (J/sm²K)

c = calor específico del fluido del lado de la coraza a la temperatura del fluido (J/kgK)

D_e = diámetro equivalente del lado de la coraza (m)

k = conductividad térmica del material (J/smK)

G_s = velocidad de masa (kg/sm^2)

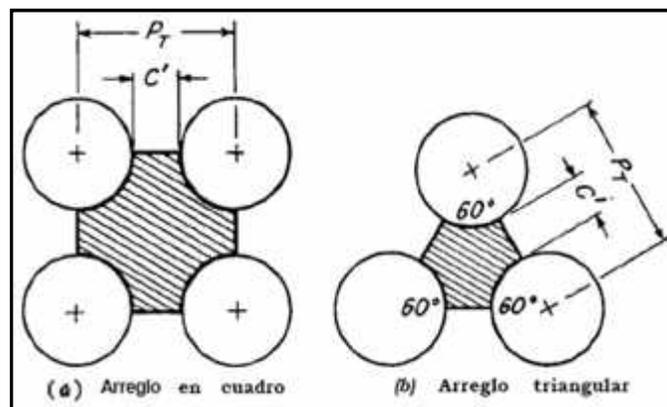
μ = viscosidad del fluido del lado de la coraza a la temperatura del fluido (kg/ms)

μ_w = viscosidad del fluido del lado de la coraza a la temperatura de la pared del tubo (kg/ms)

2.4.2.1. Diámetro equivalente del lado de la coraza

El diámetro equivalente del lado de la coraza es cuatro veces el radio hidráulico obtenido por el arreglo dispuesto en el cabezal de tubos, como se puede observar en la siguiente ilustración:

Figura 9. Arreglo de tubos y diámetro equivalente



Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 173.

- Diámetro equivalente para arreglo en cuadrado:

$$D = \frac{4 \cdot \left(P_T^2 - \frac{\pi d_0^2}{4} \right)}{\pi d_0} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 172.

Donde:

D_e = diámetro equivalente (m)

P_T = espaciado de los tubos (m)

d_0 = diámetro exterior del tubo (m)

- Diámetro equivalente para arreglo en triangulo:

$$D = \frac{4 \cdot \left(\frac{1}{2} P_T + 0,86 P_T - \frac{\pi d_0^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi d_0} \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 172.

Donde,

D_e = diámetro equivalente (m)

P_T = espaciado de los tubos (m)

d_0 = diámetro exterior del tubo (m)

- Velocidad de masa del lado de la coraza

$$G_s = w \frac{P_T}{D_s \cdot C' b} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 172.

Donde:

G_s = velocidad de masa (kg/sm^2)

P_T = espaciado de los tubos (m)

D_s = diámetro interior de la coraza (m)

C' = sección libre entre tubos (m)

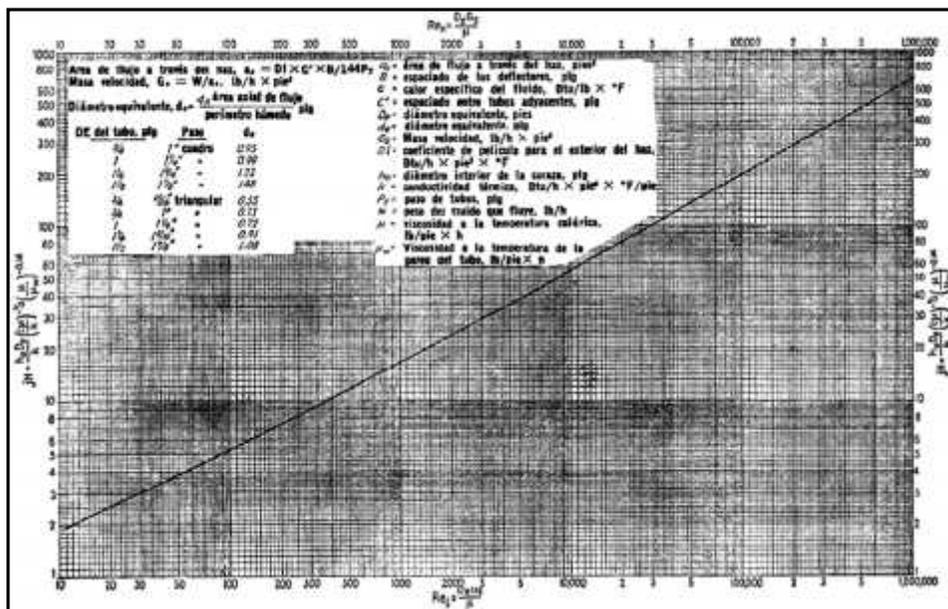
b = espaciado de los deflectores (m)

w = peso del flujo del fluido (kg/s)

2.4.2.2. Correlación en forma gráfica los flujos dentro de la coraza

Todos los datos que se ilustran en la siguiente gráfica están dentro de un régimen de flujo turbulento.

Figura 10. Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados



Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 944.

2.5. El coeficiente de transferencia de calor total de diseño

“El coeficiente de transferencia de calor total de diseño, designado por U_D , también llamado coeficiente total de lodos, proporciona las bases en las cuales el equipo debe ser hecho en última instancia.”⁴ El valor de U_D proporciona información de la superficie óptima de transferencia de calor del intercambiador para que después del servicio de aproximadamente un año o año y medio deba limpiarse.

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_{di} + R_{do} = \frac{1}{U_C} + R \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.136.

Donde:

U_C = coeficiente de transferencia de calor total limpio (J/sm^2K)

R_{di} = resistencia térmica de los lodos en el interior del tubo (sm^2K/J)

R_{do} = resistencia térmica de los lodos en el exterior del tubo (sm^2K/J)

R = resistencia térmica total de los lodos del tubo (sm^2K/J)

Después de calcular el valor de U_C , se puede proceder a calcular el valor de U_D utilizando la ecuación de Fourier utilizando temperaturas observadas durante el periodo de operación del intercambiador de calor:

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot t} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.175.

Donde:

Q = flujo de calor (J/s)

U_D = coeficiente de transferencia de calor total de diseño (J/sm^2K)

⁴ KERN, Donald, *Procesos de transferencia de calor*. p. 136.

A = área de transferencia de calor determinado con los parámetros geométricos (m²)

t= la diferencia verdadera de temperatura (K)

2.5.1. El flujo de calor

El flujo de calor entre los fluidos dentro del tubo y la coraza esta expresada por la siguiente expresión de balance de calor:

$$Q = UA \quad t = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1) \quad \text{[Ecuación 15]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.175.

Donde:

Q = flujo de calor (J/s)

W = peso del flujo del fluido caliente (kg/s)

C_p = calor específico del fluido caliente (J/kgK)

T₁ = temperatura de entrada del fluido caliente (K)

T₂ = temperatura de salida del fluido caliente (K)

w = peso del flujo del fluido frío (kg/s)

c_p = calor específico del fluido frío (J/kgK)

t₂ = temperatura de salida del fluido frío (K)

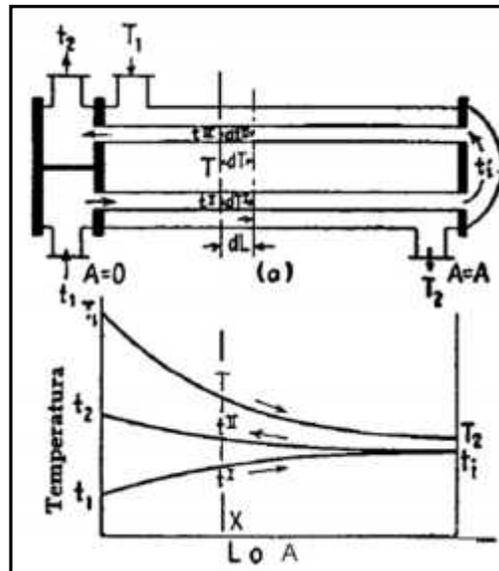
t₁ = temperatura de entrada del fluido frío (K)

2.5.2. La diferencia verdadera de temperatura

El valor de la diferencia de temperatura para un intercambiador de calor de tubos y coraza 1-2, tiene un paso por la coraza y dos pasos por los tubos, lo cual no le permite al valor de la media logarítmica de la diferencia de

temperatura, abreviada por MLDT, dar el resultado correcto para la combinación de flujo contracorriente-paralelo, como se ilustra en el siguiente diagrama:

Figura 11. Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2



Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 180

Donde el valor del MLDT está dado de la siguiente forma:

$$MLDT = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln(T_1 - t_2) / (T_2 - t_1)} \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.116.

Donde:

MLDT =media logarítmica de la diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

La ecuación nueva creada por Nagle y Bowman, Mueller y Nagle incluye un factor corrección para la MLDT como funciones de los grupos temperatura S con R como parámetros:

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad [\text{Ecuación 17}]$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad [\text{Ecuación 18}]$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.933.

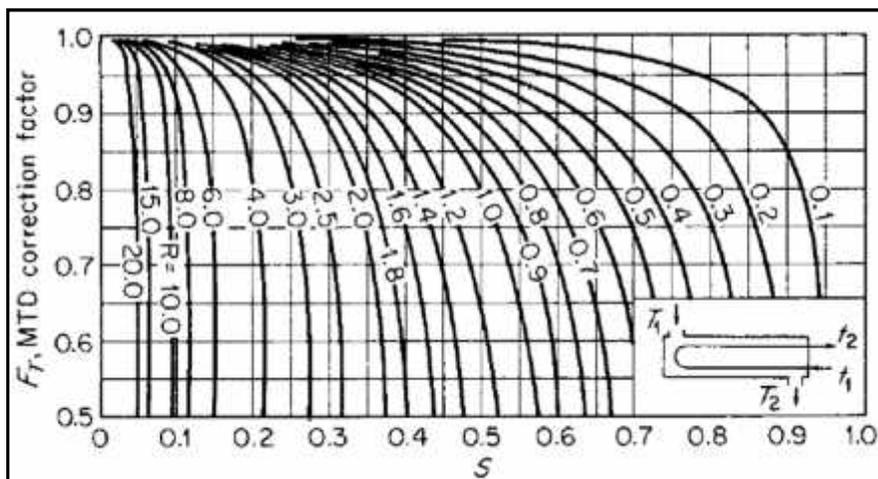
Donde:

R = grupo temperatura (adimensional)

S = grupo temperatura (adimensional)

Con los valores de R y S, se puede proceder a la siguiente figura elaborada por la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares (TEMA) para hallar el valor del factor de corrección F_T .

Figura 12. **Factor de corrección en un intercambiador 1-2**



Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 933.

El valor verdadero de temperatura está dado por la siguiente ecuación:

$$t = F_T(\text{MLDT}) \quad [\text{Ecuación 19}]$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.179.

Donde:

t = valor verdadero de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

F_T = factor de corrección de temperatura (adimensional)

2.6. El factor de obstrucción

El factor de obstrucción, designado por R_d , es el parámetro que permite diseñar el intercambiador de calor con un exceso de área superficial de transferencia de calor suficiente para que funcione el intercambiador, aproximadamente por un año, antes de limpiarse. El factor de obstrucción se obtiene de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_C} \quad [\text{Ecuación 20}]$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.138.

Donde:

R_d = factor de obstrucción ($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

U_D = coeficiente de transferencia de calor total de diseño ($\text{J}/\text{sm}^2\text{K}$)

U_C = coeficiente de transferencia de calor total limpio ($\text{J}/\text{sm}^2\text{K}$)

2.7. Sensores de temperatura

Los procesos en la industria deben ser controlados de alguna manera, y esta necesidad muchas veces también incluye la medición de la temperatura,

un parámetro crítico para mantener la calidad de un producto. Se dispone de una gran variedad de sensores de temperatura para realizar las mediciones de la temperatura. El ingeniero debe decidir cuál de los sensores debe seleccionar para cada situación en particular.

2.7.1. Termocuplas

Una termocupla es un transductor de temperatura, constituido por dos conductores (alambres), que desarrollan una fuerza electromotriz (FEM) que es función de la diferencia de temperatura entre sus uniones, una caliente ubicada en el lugar de medida, y una fría tomada como referencia. Las termocuplas se fabrican con metales puros o sus aleaciones, y se usan para medir temperaturas que van desde los aproximadamente 80 grados hasta aproximadamente los 1800 grados centígrados, con termocuplas estándares, con aleaciones especiales pueden llegarse a temperaturas superiores a los 3000 grados centígrados.

A pesar de los avances efectuados con otros sensores de temperatura, las termocuplas continúan siendo los más usados debido al intervalo de temperatura en el cual pueden utilizarse, su bajo costo y su versatilidad. La desventaja más relevante es que las termocuplas miden diferencias de temperatura y no temperatura absoluta, por lo que debe usarse una junta de referencia y afecta en la exactitud de la medida.

Posiblemente, el mayor problema de las termocuplas sea el hecho de que su salida pueda variar artificialmente o que la señal pueda perderse parcialmente, de modo que, muchas veces, la lectura errónea no pueda ser detectada en forma inmediata.

2.7.2. Termistores

Se fabrican de compuestos de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos. Los termistores sirven para la medición o detección de temperatura tanto de gases como en líquido y en sólidos. Su desventaja es su falta de estabilidad en el tiempo y su gran dispersión en comparación con las RTD, que pueden fabricarse con valores de resistencias superiores, Pt 1000 y Pt 500, con mayores exactitudes y valores normalizados universalmente que garantizan su intercambiabilidad, sin calibración previa. En comparación con las termocuplas y los RTD, el termistor no ofrece ventajas de exactitud de salida y estabilidad.

Su aplicación más frecuente es como sensor de temperatura para mediciones rápidas en sondas manuales que acompañan a los termómetros portátiles electrónicos, hoy más difundidos. Su desventaja es su falta de estabilidad en el tiempo y su gran dispersión en comparación con las termorresistencias, que pueden fabricarse con valores de resistencias superiores, Pt 1000 y Pt 500, con mayores exactitudes y valores normalizados universalmente, que garantizan su intercambiabilidad sin calibración previa.

2.7.3. Termorresistencias

La termorresistencia o RTD trabaja según el principio de que en la medida que varía la temperatura su resistencia varía, y la magnitud de la modificación puede relacionarse con la variación de la temperatura, el valor de la resistencia aumenta con el aumento de la temperatura. Los materiales utilizados para realizar los arrollamientos del RTD son, fundamentalmente, el platino, el níquel, níquel-hierro, el cobre y el tungsteno. El platino encuentra aplicación dentro de un amplio rango de temperaturas y es el material más exacto y más estable.

La gran ventaja del níquel es su capacidad de linealidad, suministrando una salida que es lineal con la temperatura. Las RTD de cobre presentan la relación más lineal de resistencia – temperatura entre todas las RTD, pero tiene la desventaja de un rango estrecho de temperaturas que va desde los -200 °C hasta los 150 °C y una baja resistividad. La demanda de RTD de níquel y de cobre en las industrias de proceso ha sido limitada, puesto que la gran mayoría de las nuevas instalaciones de RTD se hacen con sensores de platino de 100 ohmios a 0 °C.

2.7.3.1. Calibración del RTD de platino o PRT

Los RTD de platino o PRT se pueden calibrar de dos maneras, por caracterización y por prueba de tolerancia.

La calibración por caracterización es más utilizada en las industrias si se desea obtener mayor exactitud, donde se definen nuevos valores para los coeficientes de calibración como característica del sensor que se calibra. Los datos de resistencia que se obtienen a varias temperaturas se ajustan a una expresión matemática. La caracterización se puede llevar a cabo con varias ecuaciones, las más utilizadas son la serie de la escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90), la ecuación de Callendar-Van Dusen (CVD) y los polinomios de tercero a quinto orden.

La prueba de tolerancia se utiliza para aplicaciones industriales de baja exactitud. Los valores de resistencia medidos se comparan con valores definidos a temperaturas específicas. Los valores de resistencia definidos son ilustrados por las curvas modelo más utilizados como ASTM 1137 (del inglés: *american standard for testing materials*) de EEUU o la norma internacional IEC 60751:2008 (del inglés: *international electrotechnical commission*). Los valores

de los coeficientes determinados por modelos estándar se ilustran en la siguiente tabla:

Tabla I. **Coeficientes de CVD de los modelos estándar**

Estándar	Coeficiente de temperatura ()	A	B	C
IEC 60751 ASTM 1137	0,003850	$3,9083 \times 10^{-3}$	$-5,775 \times 10^{-7}$	$-4,183 \times 10^{-12}$

Fuente: FLUKE CALIBRATION. *Cómo calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT).*

<http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/how-calibrate-rtd-or-pla>.

Consulta: 1 de marzo 2016.

Los valores de las clases de exactitud para los modelos estándar se ilustran en la siguiente tabla:

Tabla II. **Clases de Exactitud de los RTD**

Estándar	IEC 60751	ASTM 1137
CLASE A	$\pm[0,15+(0,002*T)]$ °C	$\pm[0,13+(0,0017*T)]$ °C
CLASE B	$\pm[0,30+(0,005*T)]$ °C	$\pm[0,25+(0,0042*T)]$ °C

Fuente: FLUKE CALIBRATION. *Cómo calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT).*

<http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/how-calibrate-rtd-or-pla>.

Consulta: 1 de marzo 2016.

Los sensores de temperatura RTD de platino tienen un comportamiento casi lineal de la forma expresada según la expresión de Callender-Van Dusen (CVD):

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right] \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Fuente: WIEGAND, Alexander. *Callender Van-Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers.*

http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf.

Consulta: 4 de marzo 2016.

El coeficiente térmico α se refiere al valor de la pendiente normalizada en el rango de temperatura de 0 °C a 100 °C, expresada de la siguiente forma:

$$= \frac{R_{100} - R_0}{100 - 0} \quad \text{[Ecuación 22]}$$

Fuente: WIEGAND, Alexander. *Callender Van-Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers.*

http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf.

Consulta: 4 de marzo 2016.

Donde:

α = el coeficiente térmico del metal de platino ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

R_T = la resistencia del RTD a una temperatura T ()

R_{100} = resistencia del RTD a 100 $^{\circ}\text{C}$ ()

R_0 = resistencia del RTD a 0 $^{\circ}\text{C}$ ()

El modelo lineal de primer orden se expresa de la siguiente forma:

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha T \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Fuente: Acromag, Incorporated. *Criteria for temperature sensor selection of T/C and rtd sensor types.*

https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf

Consulta: 4 de marzo 2016.

Se introdujo el término de segundo orden delta δ , la cual permite una mejor aproximación basada en la diferencia entre la temperatura actual T_H (una temperatura máxima H, punto de ebullición de la glicerina, en el caso de esta investigación) y la temperatura T calculada solo con el modelo lineal de primer orden que solo es válido de 0 – 100 $^{\circ}\text{C}$. Con delta, el polinomio resistencia-temperatura puede ser utilizado con mayor exactitud para calcular la resistencia por medio de la expresión ilustrada en la siguiente página:

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha T - R_0 \alpha \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) \quad [\text{Ecuación 24}]$$

Fuente: Acromag, Incorporated. *Criteria for temperature sensor selection of T/C and rtd sensor types.*

https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf

Consulta: 4 de marzo 2016.

Delta δ se obtiene empíricamente con la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{T_H \frac{(R_{T_H} - R_0)}{R_0 \alpha}}{\left(\frac{T_H}{100} - 1 \right) \frac{T_H}{100}} \quad [\text{Ecuación 25}]$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

= constante de la ecuación CVD ($^{\circ}\text{C}$)

T_H = valor de temperatura del punto de ebullición de la glicerina ($^{\circ}\text{C}$)

R_{T_H} = resistencia del RTD a la temperatura T_H ($^{\circ}\text{C}$)

R_0 = resistencia del RTD a 0°C ()

= el coeficiente térmico del metal de platino ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

El coeficiente de segundo orden β se introdujo para la conversión de temperaturas negativas ($T < 0^{\circ}\text{C}$), se basa en la disparidad entre la temperatura actual T_L (una temperatura mínima) y la temperatura calculada utilizando α y δ solamente. La temperatura que se midió en la presente investigación fue de $T > 0^{\circ}\text{C}$, entonces $\beta = 0$, la expresión final para este estudio toma la forma:

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) \right] \quad [\text{Ecuación 26}]$$

Fuente: Acromag, Incorporated. *Criteria for temperature sensor selection of T/C and rtd sensor types.*

https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf.

Consulta: 4 de marzo 2016.

La forma más ordenada por simplicidad y ampliamente utilizada de la ecuación 20 es de la siguiente forma:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)) \quad \text{[Ecuación 27]}$$

Fuente: GARCÍA PÉREZ, Miguel Ángel. *Instrumentación Electrónica*

<https://books.google.com/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&lpg=PP1&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q&f=false>.

Consulta: 4 de marzo 2016.

Ecuación propuesta por Callender (1867-1930) para temperaturas de 0 °C – 661 °C y Van Dusen para temperaturas hasta de -200 °C. Los coeficientes A, B, C se obtienen empíricamente mediante medidas a 0, 100 y 287,5 °C (punto de ebullición de la glicerina, en el caso de esta investigación). El valor de C=0 para T> 0 °C.

La ecuación CVD para T> 0 °C es la siguiente:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad \text{[Ecuación 28]}$$

Fuente: WIEGAND, Alexander. *Callender Van-Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers.*

http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf.

Consulta: 4 de marzo 2016.

Se reordena la ecuación para obtener valores de temperatura en función de R_T :

$$0 = R_0BT^2 + R_0AT + (R_0 - R_T) \quad \text{[Ecuación 29]}$$

Fuente: elaboración propia.

La resolución de la ecuación cuadrática se expresa de la siguiente forma:

$$T = \frac{-R_0A + \sqrt{R_0^2A^2 - 4(R_0B)(R_0 - R_T)}}{2(R_0B)} \quad [\text{Ecuación 30}]$$

Fuente: elaboración propia.

Los valores de los coeficientes A y B se obtienen de las siguientes expresiones:

$$A = + \frac{\alpha \cdot \delta}{100} \quad [\text{Ecuación 31}]$$

$$B = - \frac{\alpha \delta}{100^2} \quad [\text{Ecuación 32}]$$

Fuente: WIEGAND, Alexander. *Callender Van-Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers.*

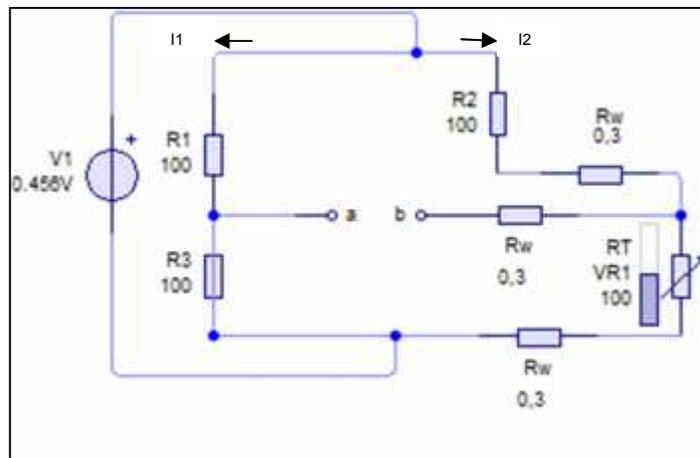
http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf.

Consulta: 4 de marzo 2016.

2.7.3.2. Conexión al puente Wheatstone

La conexión al puente Wheatstone se elabora de la siguiente manera con la ayuda del programa de *software* Livewire.

Figura 13. Conexión del RTD de 3 hilos en un puente Wheatstone



Fuente: elaboración propia.

El flujo de corriente I1 y I2 a través de las ramas se expresan de la siguiente forma:

$$I_1 = \frac{V1}{R_1 + R_3} \quad \text{[Ecuación 33]}$$

$$I_2 = \frac{V1}{R_2 + R_w + R_T + R_w} \quad \text{[Ecuación 34]}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

I₁ = flujo de corriente en ramo 1 (mA)

I_2 = flujo de corriente en ramo 2 (mA)

V_1 = fuente de voltaje (mV)

R_1 = resistencia 1 ()

R_2 = resistencia 2 ()

R_T = resistencia del RTD ()

R_w = resistencia del alambre ()

Por medio de divisor de voltaje,

$$V_a = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) V_1 \quad \text{[Ecuación 35]}$$

$$V_b = \left(\frac{R_T + R_w}{R_2 + R_w + R_T + R_w} \right) V_1 \quad \text{[Ecuación 36]}$$

Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al Análisis de Circuitos*. p.229

Consulta: 6 de marzo de 2016

Donde,

V_a = lectura de voltaje en el punto a (mV)

V_b = lectura de voltaje en el punto b (mV)

Como puente balanceado, con $R_T = R_0$:

$$V_a = V_b \quad \text{[Ecuación 37]}$$

$$\frac{R_0 + R_w}{R_2 + R_0 + 2R_w} \approx \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad \text{[Ecuación 38]}$$

$$\frac{R_2 + R_w}{R_0 + R_w} = \frac{R_1}{R_3} = r \quad \text{[Ecuación 39]}$$

Donde:

r = factor veces mayor

R_0 = resistencia del RTD a 0°C ()

Al variar el valor de la temperatura, el valor de la resistencia del RTD varía, se sustituye el valor de R_0 con R_T y $V_a \neq V_b$, se crea una diferencia de potencial V_s entre los puntos a y b, su valor se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_s = V_b - V_a \quad \text{[Ecuación 40]}$$

$$V_s = \left(\frac{R_T + R_w}{R_2 + R_T + 2R_w} \right) V_1 - \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) V_1 \quad \text{[Ecuación 41]}$$

Fuente: GARCÍA PÉREZ, Miguel Ángel. *Instrumentación Electrónica*
<https://books.google.com/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&lpg=PP1&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q&f=false>.

Consulta: 4 de marzo 2016.

Se sustituye R_T de la ecuación 27, y se convierte R_1 , R_2 y R_3 como múltiplos de R_0 :

$$R_1 = R_2 = rR_0 \quad \text{[Ecuación 42]}$$

$$R_3 = R_0 \quad \text{[Ecuación 43]}$$

Fuente: PÉREZ GARCÍA, Miguel A. *Instrumentación Electrónica*.
<https://books.google.com/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&lpg=PP1&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q&f=false>.

Consulta: 4 de marzo de 2016

$$V_s = \left(\frac{R_0(1+AT+BT^2)+R_w}{rR_0+R_0(1+AT+BT^2)+2R_w} \right) V_1 - \left(\frac{R_0}{rR_0+R_0} \right) V_1 \quad \text{[Ecuación 44]}$$

$$V_s = \left(\frac{(1+AT+BT^2)+\frac{R_w}{R_0}}{r+(1+AT+BT^2)+2\frac{R_w}{R_0}} \right) V_1 - \left(\frac{1}{r+1} \right) V_1 \quad \text{[Ecuación 45]}$$

Fuente: elaboración propia.

Expresada en función cuadrática:

$$T^2 B \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] + T A \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] + \left[\frac{V_s}{V_1} (r^2 + 2r + 2r \frac{R_w}{R_0} + 2 \frac{R_w}{R_0} + 1) - \frac{R_w}{R_0} (r - 1) \right] = 0 \quad [\text{Ecuación 46}]$$

Fuente: elaboración propia.

La solución de T en función de las demás variables:

$$T = \frac{-A \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] \pm \sqrt{\left(A \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] \right)^2 - 4 \left(B \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] \right) \left(\left[\frac{V_s}{V_1} (r^2 + 2r + 2r \frac{R_w}{R_0} + 2 \frac{R_w}{R_0} + 1) - \frac{R_w}{R_0} (r - 1) \right] \right)}}{2 \left(B \left[\frac{V_s}{V_1} r + \frac{V_s}{V_1} - r \right] \right)} \quad [\text{Ecuación 47}]$$

Fuente: elaboración propia.

La ecuación 47 se puede expresar solamente en función de la diferencia de potencial V_s que surge del puente Wheatstone al variar la resistencia del RTD, sustituyendo los valores de las condiciones de la figura 12 utilizada en la investigación:

$$r = 1 \text{ (adimensional)}$$

$$R_0 = 100$$

$$R_w = 0,3$$

$$V_1 = 0,456 \text{ V}$$

$$A = 3,9083 \times 10^{-3}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7}$$

$$T = \frac{-0,0039083 \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \pm \sqrt{\left(0,0039083 \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right)^2 - 4 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right) \left(\left[\frac{125}{57} V_s (4,012) \right] \right)}}{2 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right)}$$

[Ecuación 48]

Fuente: elaboración propia.

De las 2 raíces distintas, las soluciones de temperaturas aceptables están dadas por la ecuación siguiente:

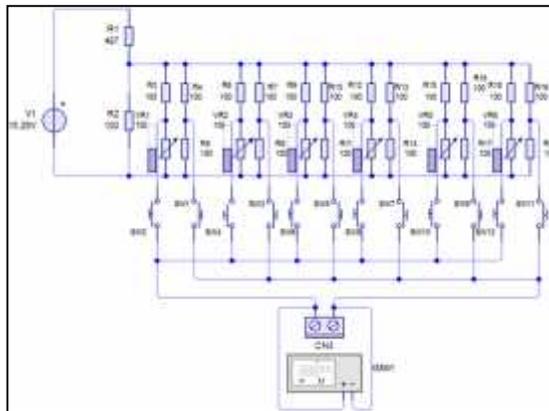
$$T = \frac{-0,0039083 \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] - \sqrt{\left(0,0039083 \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right)^2 - 4 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right) \left(\left[\frac{125}{57} V_s (4,012) \right] \right)}}{2 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \left[\frac{250}{57} V_s - 1 \right] \right)}$$

[Ecuación 49]

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ilustra la conexión de los RTD (elaborado con el programa de *software* Livewire) en la presente investigación:

Figura 14. **Conexión de los 6 RTD de 3 hilos en un puente Wheatstone**



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

La temperatura de entrada y salida de los fluidos de operación del proceso se determinaron con los sensores de temperatura instalados en las dos unidades de intercambiador de coraza y tubos. En total, se necesitan seis sensores de temperatura, dos en la unidad vapor-aceite y cuatro en la unidad agua-aceite.

Para calcular el área de transferencia de calor de las unidades, se utilizaron los datos tabulados de diámetro exterior del tubo y las longitudes de trayectoria de cada tubo.

Para determinar la velocidad de flujo de cada fluido, se midieron los caudales de cada fluido con la ayuda de contadores de galón y rotámetros.

Para calcular el diámetro equivalente del lado de la coraza se utilizaron los datos de espaciado del centro de los tubos y diámetro exterior del tubo, tabulados en una hoja de datos.

Para determinar la masa velocidad se utilizaron los datos de espacio entre tubos, espacio entre deflectores y el diámetro interior de los tubos.

Los coeficientes de transferencia de calor del lado de tubos y lado de coraza se determinaron con los valores de las variables como diámetro interior del tubo, calor específico del fluido y longitud de la trayectoria de flujo.

El factor de obstrucción se obtuvo con los valores de coeficiente de transferencia de calor total limpio y diseño.

3.2. Delimitaciones de campo de estudio

La investigación tiene el objetivo de verificar el desempeño del intercambiador de calor con los termómetros actuales y con los termómetros nuevos, y también hallar los mejores puntos de medida de temperatura, dependiendo del tipo de sensor elegido. Se implementó un programa de mantenimiento para los sensores de temperatura. El campo de estudio se limita a los intercambiadores de calor de coraza y tubos, concentrándose en la enseñanza para el estudiante de ingeniería química.

3.3. Recursos humanos disponibles

3.3.1. Investigador

Izrael Pott encargado de llevar a cabo la investigación, mejoramiento del equipo, instalación de sistema de medición de temperatura y toma de datos para el análisis del informe final.

3.3.2. Asesor

Ingeniero Químico Jorge Emilio Godínez Lemus, encargado de asesorar y aportar los conocimientos esenciales para la mejora en los procedimientos y análisis de la investigación.

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Equipo

Unidad de 2 intercambiadores calor de tubos y coraza 1-2 (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos en U) del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

- Bomba centrífuga
- 6 sensores de temperatura RTD
- Panel de lectura electrónica
- Dos manómetros
- Cuenta galones
- Tanque
- Rotámetro
- Cronómetro
- balanza

3.4.2. Materiales

- Aceite de motor (20W50)
- Agua
- Vapor saturado
- Silicón térmico

- Libros de flujo de fluidos de diversos autores
- Libros de electrónica de diversos autores
- Libros de transferencia de calor de diversos autores

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

3.5.1. Técnica cualitativa

La técnica cualitativa se basó en la observación de la naturaleza del equipo con el que se trabajó y se aplicó el método científico para estudiar los fenómenos observados y realizar las mejoras del mismo.

- Observación de fuga del cabezal de vapor-aceite.
- Observación de la calibración del rotámetro para el flujo del aceite.
- Observación de la inestabilidad del rotámetro (creación de burbujas) y la creación del pozo térmico del sistema de circulación del aceite.
- Observación de la instalación de los sensores.
- Observación de los empaques en ambos cabezales de vapor-aceite y agua-aceite.

3.5.2. Técnica cuantitativa

3.5.2.1. Coeficiente de transferencia de calor total limpio

La determinación del coeficiente de transferencia de calor total limpio consiste en hallar los valores de los coeficientes de transferencia de calor dentro del tubo y del lado de la coraza. Para la evaluación de cada valor se necesitaron los valores de diámetros de tubo, diámetro equivalente de coraza, calor específico, viscosidades y velocidad de masa.

3.5.2.2. Coeficiente de transferencia de calor total de diseño

La determinación del coeficiente de transferencia de calor total de diseño consiste en, primero, hallar el valor de coeficiente de calor total limpio y luego por medio de corrida de flujos de proceso se determinaron los cambios de temperaturas reales. También se determinó el área superficial de los tubos midiendo sus parámetros geométricos.

3.5.2.3. Factor de obstrucción

El factor de obstrucción se obtuvo por medio de la diferencia de los recíprocos del coeficiente de transferencia de calor total limpio y de diseño.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Tabla III. **Presión de entrada del vapor en el intercambiador con sistema vapor-aceite**

Puntos	Presión (Psig)
Entrada	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos de flujo del aceite en los intercambiadores de calor**

Lectura rotámetro	Tiempo de flujo o (min,s,ms)	Volumen V_o (m ³)
50	02,03,13	0,01
100	00,53,26	0,01
140	00,37,25	0,01
180	04,36,44	0,10
225	03,17,94	0,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos de flujo del agua en el intercambiador de calor**

Corrida	Volumen de agua, V_w (m ³)	Tiempo w (min, s, ms)
Válvula abierta completamente	0,1	3,00,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos de operación del aceite en el ICCT1**

Lectura rotámetro	Temperatura y caída de voltaje de entrada		Temperatura y caída de voltaje de salida	
	Bimetálico $t_{eO1}(^{\circ}\text{C})$	RTD (mV)	Bimetálico, $t_{sO1}(^{\circ}\text{C})$	RTD (mV)
70	73	28,8	87	33,2
	74	29	83	31,8
	74	29	85	32,5
130	78	30,3	84	32,3
	78	30,4	85	32,5
	78	30,5	84	32,5
180	80	31,2	85	32,8
	81	31,3	85	32,7
	81	31,4	85	32,7
220	82	31,7	86	32,8
	82	31,6	86	32,9
	81	31,5	85	32,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos de operación del aceite en el ICCT2**

Lectura rotámetro	Temperatura y voltaje de entrada		Temperatura y voltaje de salida	
	Bimetálico $t_{eO_2}(^{\circ}C)$	RTD (mV)	Bimetálico, $t_{sO_2}(^{\circ}C)$	RTD (mV)
70	87	33,2	73	28,6
	83	31,8	73	28,7
	85	32,5	72	28,5
130	84	32,3	77	30,1
	85	32,5	77	30,1
	84	32,5	77	30,2
180	85	32,8	80	31
	85	32,7	80	31
	85	32,7	80	31
220	86	32,8	81	31,3
	86	32,9	81	31,3
	85	32,6	81	31,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos de operación del agua en el intercambiador con sistema aceite-agua**

Lectura rotámetro	Temperatura y voltaje de entrada		Temperatura y voltaje de entrada	
	Bimetálico $t_{eW1} (^{\circ}\text{C})$	RTD (mV)	Bimetálico, $t_{sW1} (^{\circ}\text{C})$	RTD (mV)
70	21	9,8	24	10,9
	21	9,8	24	10,9
	22	9,9	23	10,4
130	22	9,9	23	10,4
	21	9,9	23	10,4
	22	9,9	23	10,4
180	21	9,9	23	10,6
	22	9,9	23	10,6
	21	9,9	23	10,6
220	21	9,9	24	10,9
	22	10	24	11,1
	21	9,9	24	11,1

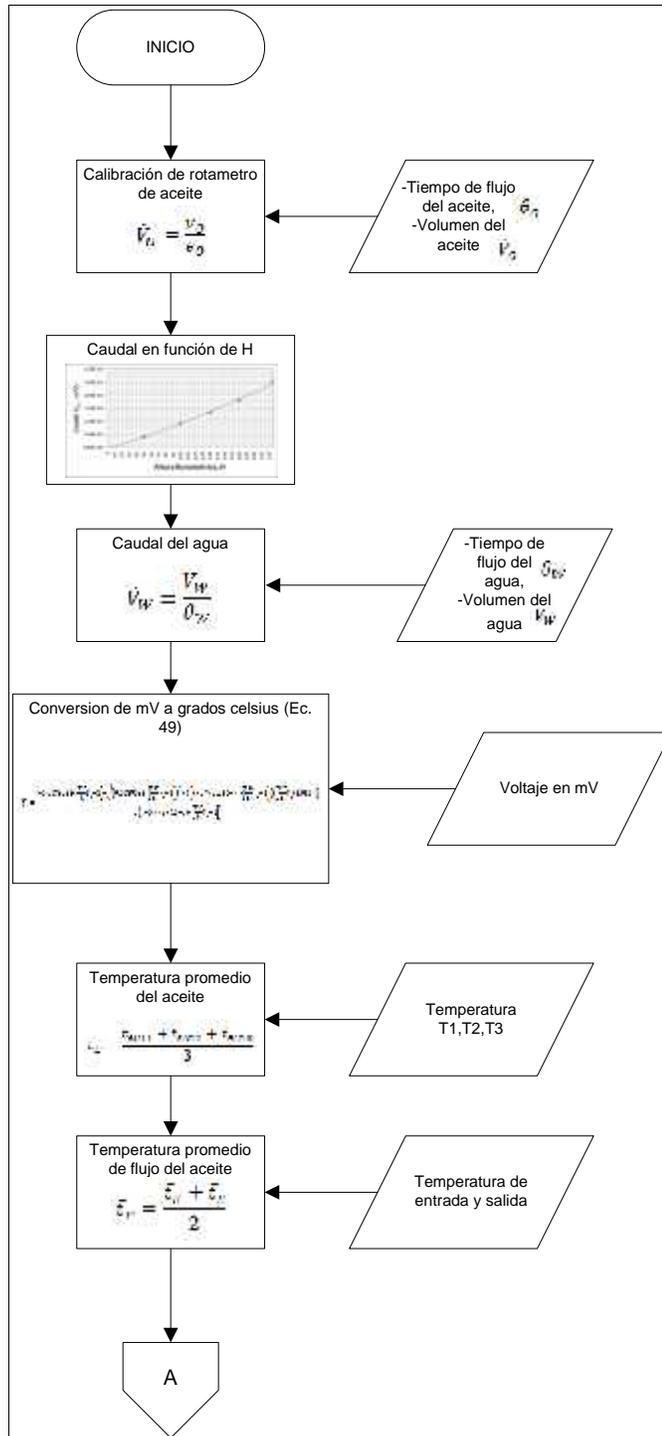
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Parámetros geométricos en sistema inglés**

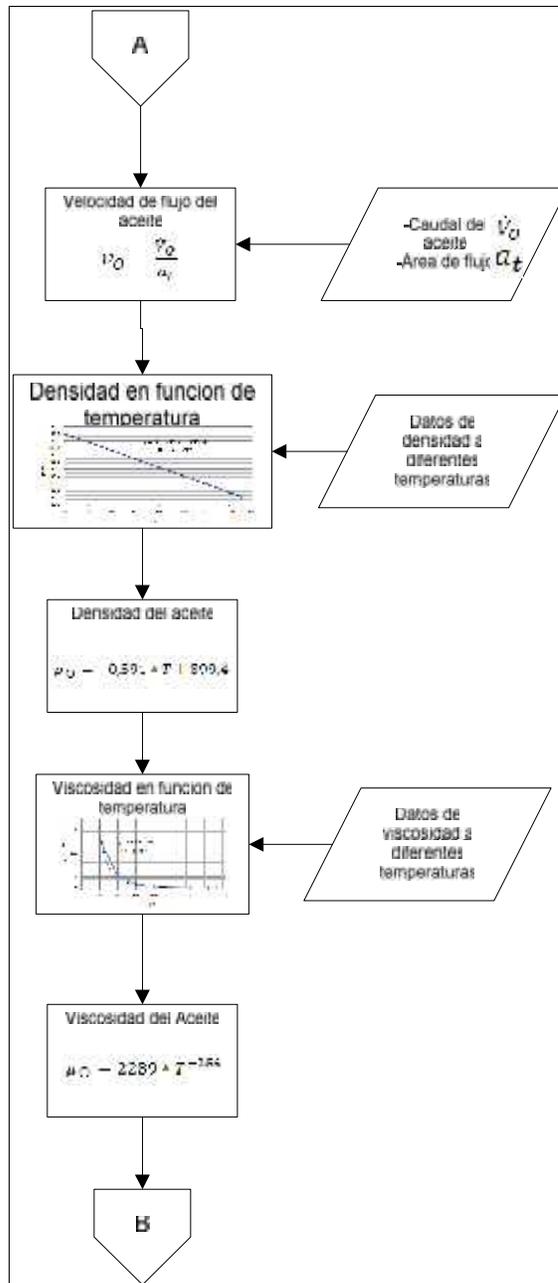
Sistema	Intercambiador					
	ICCT1			ICCT2		
Diámetro interno de tubos, d_i , (plg)	3/8			3/8		
Diámetro externo de tubos, d_o , (plg)	1/2			1/2		
Longitud de tubos L, (plg)	32	33		32	33	
Conductividad del tubo k, (Btu-plg/h · pie ² · °F)	108			108		
Diámetro de interno de coraza D_s , (plg)	6' 3/8''			6' 3/8''		
Espaciado de deflectores B, (plg)	12	10	6	12	10	6
Espaciado de tubos (<i>pitch</i>) P_T , (plg)	13/16			13/16		
Sección libre entre tubos C' , (plg)	5/16			5/16		
Número de pasos n	2			2		

Fuente: elaboración propia.

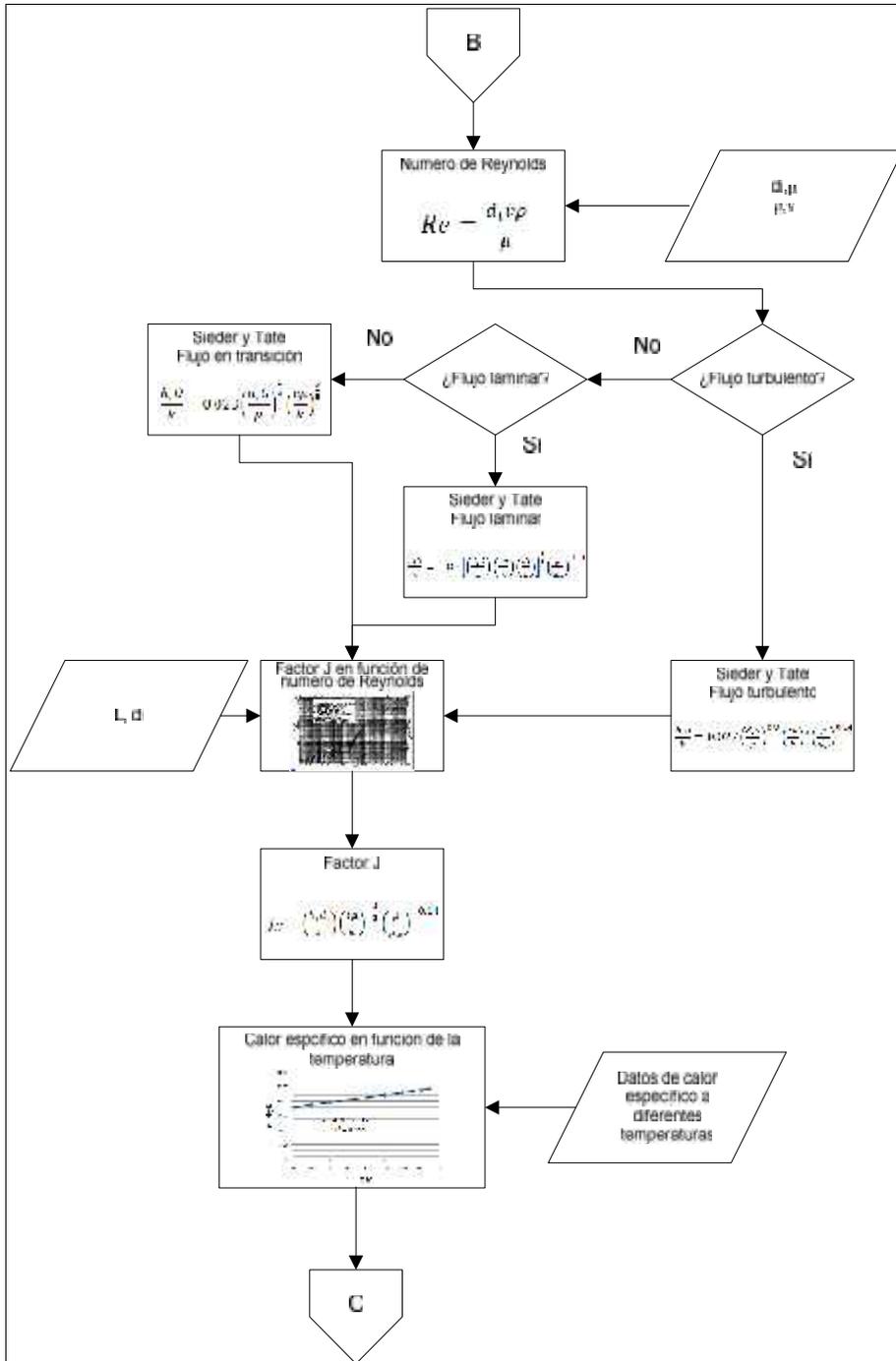
Figura 15. Diagrama de flujo de metodología de cálculo



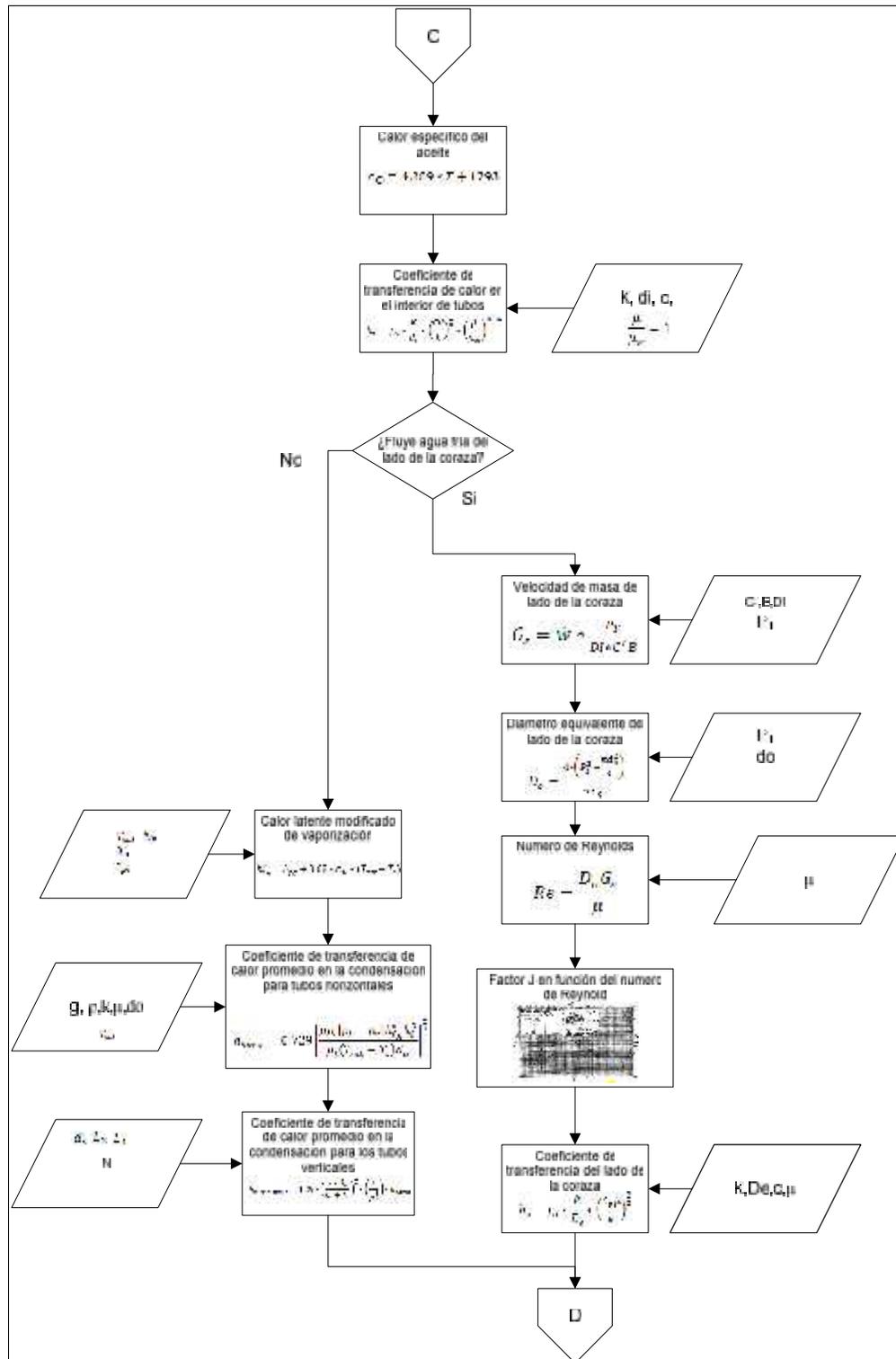
Continuación de figura 15.



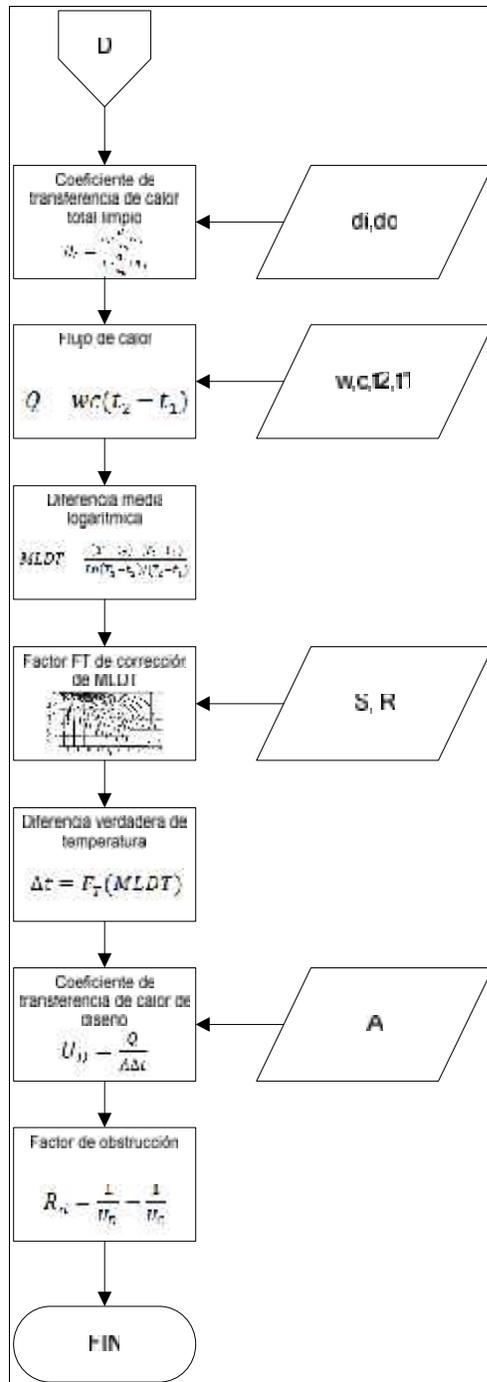
Continuación de figura 15.



Continuación de figura 15.



Continuación de figura 15.



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

3.7.1. Información según la temperatura medida con los RTD

Tabla X. Valores de temperatura

Lectura Rotámetro	Temperatura en ICCT1(aceite) (°C)		Temperatura en ICCT2 (aceite)(°C)		Temperatura en ICCT2 (agua) (°C)		Temperatura en ICCT1 (vapor de agua) (°C)	
	t _{eO1}	t _{sO1}	t _{eO2}	t _{sO2}	t _{eW2}	t _{sW2}	t _{eV1}	t _{sV1}
70	75,0	88,6	88,6	74,4	23,1	25,9	133,7	120,0
	75,6	84,2	84,2	74,7	23,1	25,9	133,7	120,0
	75,6	86,4	86,4	74,1	23,4	24,6	133,7	120,0
130	79,6	85,8	85,8	79,0	23,4	24,6	133,7	119,7
	79,9	86,4	86,4	79,0	23,4	24,6	133,7	119,5
	80,2	86,4	86,4	79,3	23,4	24,6	133,7	119,6
180	82,4	87,4	87,4	81,8	23,4	25,1	133,7	119,3
	82,7	87,1	87,1	81,8	23,4	25,1	133,7	119,0
	83,0	87,1	87,1	81,8	23,4	25,1	133,7	119,0
220	83,9	87,4	87,4	82,7	23,4	25,9	133,7	118,0
	83,6	87,7	87,7	82,7	23,6	26,4	133,7	118,0
	83,3	86,7	86,7	83,0	23,4	26,4	133,7	118,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Valores promedio de temperatura**

Lectura rotámetro	Temperatura en ICCT1(aceite) (°C)		Temperatura en ICCT2 (aceite) (°C)		Temperatura en ICCT2 (agua) (°C)	
	t_{eO1}	t_{sO1}	t_{eO2}	t_{sO1}	t_{eW2}	t_{sW2}
70	75,4	86,4	86,4	74,4	23,2	25,5
130	79,9	86,2	86,2	79,1	23,4	24,6
180	82,7	87,2	87,2	81,8	23,4	25,1
220	83,6	87,3	87,3	82,8	23,5	26,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Flujo de volumétrico del aceite**

Lectura rotámetro	Flujo V_0 (m ³ /s)
50	0,00008121
100	0,00018780
140	0,00026850
180	0,00036170
225	0,00050520

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico V_0 (m ³ /s)	Área de flujo total de banco de tubos a_{ti} (m ²)	Velocidad lineal del aceite v_0 (m/s)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 t_{01} (°C)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT2 t_{02} (°C)
70	0,00012714	0,000694	0,18329	80,9	80,4
130	0,00026609	0,000694	0,38359	83,1	82,7
180	0,00039231	0,000694	0,56555	84,9	84,5
220	0,00049843	0,000694	0,71852	85,4	85,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Densidad del aceite en ICCT1 ρ_{01} (kg/m ³)	Densidad del aceite en ICCT2 ρ_{02} (kg/m ³)	Viscosidad del aceite en ICCT1 μ_{01} (kg/ms)	Viscosidad del aceite en ICCT2 μ_{02} (kg/ms)
70	851,6	851,9	0,0298	0,0303
130	850,3	850,5	0,0279	0,0283
180	849,2	849,5	0,0264	0,0268
220	848,9	849,1	0,0260	0,0263

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pO1} (J/kgK)	Calor específico en ICCT2 C_{pO2} (J/kgK)	Número de Reynolds de flujo Re_{O1} ICCT1 (adimensional)	Número de Reynolds de flujo Re_{O2} ICCT2 (adimensional)
70	2140	2138	49	48
130	2149	2148	110	108
180	2157	2155	171	169
220	2159	2158	221	218

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Factor J_{HO1} ICCT1 (adimensional)	Factor J_{HO2} ICCT2 (adimensional)	conductividad térmica k_{O1} ICCT1 (W/m.K)	conductividad térmica k_{O2} ICCT2 (W/m.K)
70	1,5	1,5	0,13794	0,13797
130	2	1,9	0,13780	0,13783
180	2,3	2,2	0,13768	0,13771
220	2,5	2,4	0,13765	0,13767

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Propiedades del aceite y de proceso**

Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT1 h_{i1} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT2 h_{i2} (W/m ² .°C)
170	171
222	212
251	241
271	262

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Dimensiones de los ICCT1 e ICCT2 en sistema internacional de unidades (SI)**

Sistema	ICCT1			ICCT2		
Diámetro interno de tubos, d_i , (m)	0,009398			0,009398		
Diámetro externo de tubos, d_o , (m)	0,0127			0,0127		
Longitud de tubos, L (m)	0,8128			0,8382		
Material del tubo, k, (W/mK)	15,6			15,6		
Diámetro de coraza, D_s , (m)	0,161925			0,161925		
Espaciado de los deflectores, B, (m)	0,3048	0,254	0,1524	0,3048	0,254	0,1524
Espaciado de los tubos(<i>pitch</i>), P_T (m)	0,0206375			0,020638		
Sección libre entre tubos, C, (m)	0,0079375			0,007938		
Número de pasos n	2			2		
Diámetro equivalente, D_e , (m)	0,03			0,03		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Propiedades del vapor de agua**

Lectura rotámetro	Temperatura de saturación t_{sat} (°C)	Temperatura de pared t_s (°C)	Temperatura de película t_f (°C)	Densidad del vapor ρ_v (kg/m ³)	Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)
70	98,44	80,9	89,7	0,57	2 261
130	98,44	83,1	90,8	0,57	2 261
180	98,44	84,9	91,7	0,57	2 261
220	98,44	85,4	91,9	0,57	2 261

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Propiedades del condensado**

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 c_{pl} (J/kgK)	Conductividad térmica k_l (W/m.K)	viscosidad dinámica μ_l (Pa.s)	Densidad del condensado ρ_l (kg/m ³)	calor latente modificado h_{fg}^* (J/kg)
70	4 205,7	0,6749	0,000316	965,5	2 311 096
130	4 206,8	0,6753	0,000312	964,9	2 305 028
180	4 207,7	0,6757	0,000309	964,4	2 299 715
220	4 207,9	0,6758	0,000308	964,2	2 298 234

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coeficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT1**

Lectura rotámetro	Coeficiente de transferencia de calor para la condensación sobre un tubo horizontal ICCT1 h_{horiz} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor para la condensación sobre 20 tubos ICCT1 $h_{vert,20\ tubos}$ (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1 U_{C1} (W/m ² .°C)
70	12 709	2 730	120,5
130	13 161	2 827	155,4
180	13 623	2 927	174,7
220	13 766	2 957	188,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Propiedades del agua en ICCT2**

Lectura rotámetro	Temperatura promedio de flujo t_w (°C)	Densidad en ICCT2 ρ_w (kg/m ³)	Calor específico C_{pW} (J/kg.K)	Conductividad térmica k_w (W/m.K)	Viscosidad dinámica μ_w (Pa.s)
70	24,3	997,1	4 182,4	0,606	0,00091
130	24,0	997,2	4 182,6	0,605	0,00092
180	24,2	997,1	4 182,5	0,606	0,00091
220	24,8	997,0	4 182,1	0,607	0,00090

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Propiedades del agua en ICCT2**

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico V_w (m ³ /s)	Flujo másico m_w (kg/s)	Masa velocidad G_{sw} (kg/sm ²)	Numero de Reynolds Re_w (adimensional)	Factor J_{Hw} (adimensional)
70	0,00055371	0,5521	37,394	1 230	17,8
130	0,00055371	0,5521	37,397	1 220	17,8
180	0,00055371	0,5521	37,395	1 228	17,8
220	0,00055371	0,5520	37,390	1 246	18,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Coefficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT2**

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor en la coraza ICCT2 h_{o2} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia total limpio en ICCT2 U_{C2} (W/m ² .°C)
70	665	106,4
130	664	126,9
180	665	140,7
220	668	150,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1**

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_1 (W)	Área de transferencia de calor $a_{to}(m^2)$	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT($^{\circ}C$)
70	2 548	0,4876	45,9
130	3 070	0,4876	43,0
180	3 220	0,4876	40,7
220	3 338	0,4876	39,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1**

Lectura rotámetro	R (adimensional)	S (adimensional)	Factor de corrección F_{t1} (adimensional)	Diferencia de temperatura t_1 (°C)	Coeficiente de transferencia de calor total de diseño ICCT1 U_{D1} (W/m ² .°C)
70	1,2	0,2	0,99	45,4	115
130	2,3	0,1	0,99	42,6	148
180	3,1	0,1	0,99	40,3	164
220	4,2	0,1	0,99	39,2	175

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2**

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_2 (W)	Área de transferencia de calor a_{i0} (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	2 779	0,4876	56,0
130	3 466	0,4876	58,6
180	3 885	0,4876	60,3
220	4 093	0,4876	60,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2**

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_{t2}	Diferencia de temperatura t_2 (°C)	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2 U_{D2} (W/m ² .°C)
70	5,6	0,03	1	56,0	102
130	5,7	0,02	1	58,6	121
180	3,0	0,03	1	60,2	132
220	1,6	0,04	0,99	59,6	141

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Información según la temperatura medida con los sensores bimetalicos

Tabla XXIX. Valores promedio de temperatura

Lectura rotámetro	Temperatura en ICCT1 (aceite) (°C)		Temperatura en ICCT2 (aceite) (°C)		Temperatura en ICCT2 (agua) (°C)	
	t_{eO1}	t_{sO1}	t_{eO2}	t_{sO2}	t_{eW2}	t_{sW2}
70	74	85	85	73	21	23
130	78	84	84	77	22	23
180	81	85	85	80	21	23
220	82	85	85	81	21	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Propiedades del aceite y de proceso

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico V_0 (m ³ /s)	Área de flujo total de banco de tubos a_{ti} (m ²)	Velocidad lineal del aceite v_0 (m/s)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 t_{01} (°C)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT2 t_{02} (°C)
70	0,00012714	0,000694	0,18329	79	79
130	0,00026609	0,000694	0,38359	81	81
180	0,00039231	0,000694	0,56555	83	83
220	0,00049843	0,000694	0,71852	84	83

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Densidad del aceite en ICCT1 ρ_{01} (kg/m ³)	Densidad del aceite en ICCT2 ρ_{02} (kg/m ³)	Viscosidad del aceite en ICCT1 μ_{01} (kg/ms)	Viscosidad del aceite en ICCT2 μ_{02} (kg/ms)
70	853	853	0,031	0,032
130	851	852	0,030	0,030
180	850	851	0,028	0,028
220	850	850	0,027	0,028

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{p01} (J/kgK)	Calor específico en ICCT2 C_{p02} (J/kgK)	Número de Reynolds de flujo Re_{01} ICCT1 (adimensional)	Número de Reynolds de flujo Re_{02} ICCT2 (adimensional)
70	2 130	2 130	47	46
130	2 140	2 140	100	100
180	2 150	2 150	200	200
220	2 150	2 150	200	200

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Propiedades del aceite y de proceso**

Lectura Rotámetro	Factor J_{HO1} ICCT1 (adimensional)	Factor J_{HO2} ICCT2 (adimensional)	Conductividad térmica k_{O1} ICCT1 W/m.K	Conductividad térmica k_{O2} ICCT2 W/m.K
70	1,5	1,5	0,1380	0,1381
130	2	1,9	0,1379	0,1380
180	2,3	2,2	0,1378	0,1378
220	2,5	2,4	0,1378	0,1378

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Propiedades del aceite y de proceso**

Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT1 h_{i1} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT2 h_{i2} (W/m ² .°C)
170	170
230	220
260	250
280	270

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Propiedades del vapor de agua**

Lectura rotámetro	Temperatura de saturación T_{sat} (°C)	Temperatura de pared t_s (°C)	Temperatura de película t_F (°C)	Densidad del vapor ρ_v (kg/m ³)	Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)
70	98,44	79	89	0,57	2 261
130	98,44	81	90	0,57	2 261
180	98,44	83	91	0,57	2 261
220	98,44	84	91	0,57	2 261

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Propiedades del vapor de agua**

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pl} (J/kgK)	Conductividad térmica k_l (W/m.K)	viscosidad dinámica μ_l (Pa.s)	Densidad ρ_l (kg/m ³)	calor latente modificado h_{fg}^* (J/kg)
70	4 205	0,675	0,00032	966	2 315 710
130	4 206	0,675	0,00032	965	2 310 310
180	4 207	0,675	0,00031	965	2 305 140
220	4 207	0,675	0,00031	965	2 303 520

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Coefficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT1**

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre un tubo horizontal ICCT1 h_{horiz} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre 20 tubos ICCT1 $h_{vert,20 tubos}$ (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1 U_{C1} (W/m ² .°C)
70	12410	2670	122
130	12760	2740	158
180	13150	2830	177
220	13290	2850	191

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Propiedades del agua en ICCT2**

Lectura rotámetro	Temperatura promedio de flujo t_w (°C)	Densidad en ICCT2 ρ_w (kg/m ³)	Calor específico C_{pw} (J/kg.K)	Conductividad térmica k_w (W/m.K)	Viscosidad dinámica μ_w (Pa.s)
70	22	997,5	4184	0,602	0,00096
130	22	997,6	4184	0,602	0,00096
180	22	997,5	4184	0,602	0,00096
220	23	997,4	4183	0,603	0,00095

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Propiedades del agua en ICCT2**

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico V_w (m ³ /s)	Flujo másico m_w (kg/s)	Masa velocidad G_{sw} (kg/sm ²)	Número de Reynolds Re_w (adimensional)	Factor J_{Hw} (adimensional)
70	0,00055371	0,5523	37,41	1 200	17,4
130	0,00055371	0,5524	37,41	1 200	17,3
180	0,00055371	0,5523	37,41	1 200	17,4
220	0,00055371	0,5523	37,41	1 200	17,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Coefficientes de transferencia de calor total limpio en ICCT2**

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor del lado de la coraza ICCT2 h_{o2} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia total limpio en ICCT2 U_{C2} (W/m ² .°C)
70	660	108
130	650	129
180	660	142
220	660	152

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1**

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_1 (W)	Área de transferencia de calor $a_{to}(m^2)$	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT($^{\circ}C$)
70	2580	0,4876	48
130	3010	0,4876	45
180	3210	0,4876	43
220	3360	0,4876	42

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1**

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_{t1}	Diferencia de temperatura $t_1(^{\circ}C)$	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1 $U_{D1}(W/m^2.^{\circ}C)$
70	1,2	0,2	0,99	47	113
130	2,3	0,1	0,99	44	139
180	3,1	0,1	0,99	42	156
220	4,1	0,1	0,99	41	168

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2**

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_2 (W)	Área de transferencia de calor a_{to} (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	2850	0,4876	56
130	3490	0,4876	59
180	3880	0,4876	60
220	4140	0,4876	60

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Valores para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2**

Lectura rotámetro	R (Adimensional)	S (Adimensional)	Factor de corrección F_{t2} (Adimensional)	Diferencia de temperatura $t_2(^{\circ}\text{C})$	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2 $U_{D2}(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
70	9,0	0,02	1	56	104
130	5,4	0,02	1	59	122
180	2,9	0,03	1	60	132
220	1,6	0,04	0,99	60	142

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Cálculos para ICCT1

Con base a los valores de temperaturas tomadas en las tres repeticiones para las temperaturas, se realizan los siguientes cálculos:

- Cálculo de conversión de caída de voltaje en voltios (V) de la tabla VI a un valor de temperatura en $^{\circ}\text{C}$

$$T = \frac{-0,0039083 \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1\right] - \sqrt{\left(0,0039083 \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1\right]\right)^2 - 4 \cdot \left(-5,775 \times 10^{-7}\right) \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1\right] \cdot \left(\left[\frac{125}{57} V_s (4,012)\right]\right)}}{2 \cdot \left(-5,775 \times 10^{-7}\right) \cdot \left[\frac{250}{57} V_s - 1\right]}$$

[Ecuación 49]

Donde:

V_s = caída de voltaje (V)

Se sustituye un valor de caída de voltaje en la ecuación:

$$T = \frac{-0,0039083 \cdot \left[\frac{250 + 28,8}{57 + 1000} V - 1 \right] - \sqrt{\left(0,0039083 \cdot \left[\frac{250 + 28,8}{57 + 1000} V - 1 \right] \right)^2 - 4 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \cdot \left[\frac{250 + 28,8}{57 + 1000} V - 1 \right] \right) \left(\left[\frac{125 + 28,8}{57 + 1000} V - (4,012) \right] \right)}}{2 \left((-5,775 \times 10^{-7}) \cdot \left[\frac{250 + 28,8}{57 + 1000} V - 1 \right] \right)}$$

$$T = 75,0$$

Con el procedimiento anterior, se calcularon los demás valores de temperatura para cada corrida.

- Promedio de temperaturas para las corridas 1, 2, y 3 en la lectura 70 del rotámetro.

$$t_{e01} = \frac{t_{e011} + t_{e012} + t_{e013}}{3} \quad \text{[Ecuación 50]}$$

Donde:

t_{e01} = temperatura promedio de las corridas in ICCT1 (°C)

t_{e011} = temperatura de entrada del aceite en ICCT1, corrida 1 (°C)

t_{e012} = temperatura de entrada del aceite en ICCT1, corrida 2 (°C)

t_{e013} = temperatura de entrada del aceite en ICCT1, corrida 3 (°C)

Se sustituyen los valores de temperatura en la ecuación:

$$t_{e01} = \frac{75,0 + 75,6 + 75,6}{3}$$

$$t_{e01} = 75,4$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de temperatura promedio.

- Cálculo de flujo volumétrico del aceite y calibración de rotámetro.

$$V_0 = \frac{v_0}{\theta_0} \quad \text{[Ecuación 51]}$$

Donde,

V_0 = flujo volumétrico del aceite ($\frac{m^3}{s}$)

v_0 = volumen de aceite (m^3)

θ_0 = tiempo de flujo (s)

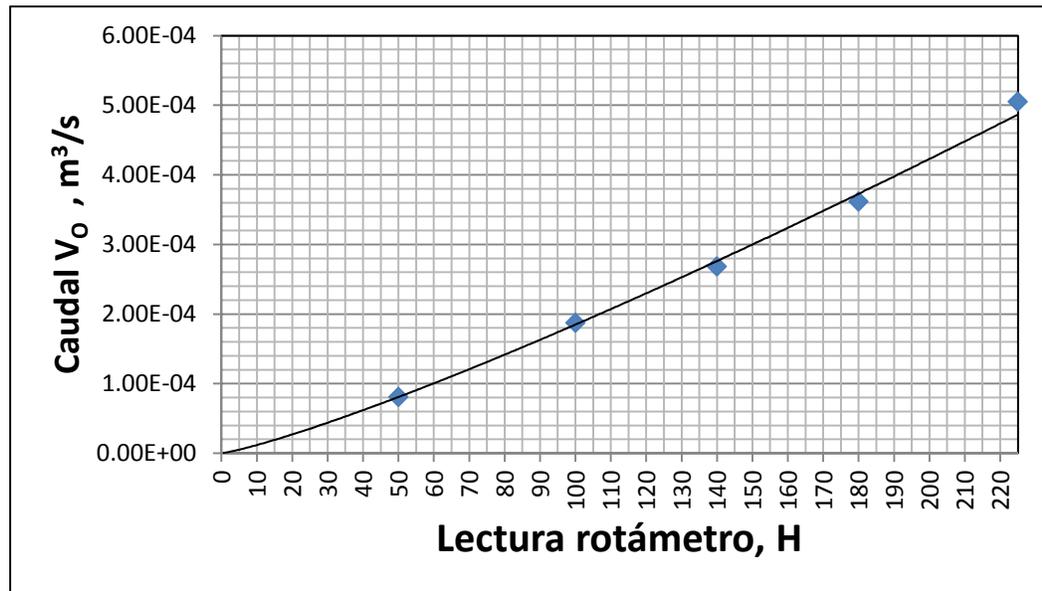
Se sustituyen los valores correspondientes de la lectura 50 del rotámetro en la ecuación:

$$V_0 = \frac{0,01 \frac{m^3}{min}}{2 \frac{min}{60} + 3,13s}$$

$$V_0 = 0,00008121 \frac{m^3}{s}$$

En forma gráfica, el flujo volumétrico del aceite se puede expresar en función de la lectura del rotámetro como se indica en la siguiente figura:

Figura 16. **Flujo volumétrico del aceite se puede expresar en función de la altura del rotámetro**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Ecuación matemática para el flujo volumétrico del aceite**

Ecuación	Correlación	Intervalo de validez
$V_0 = 8E-07 * H^{1,193}$	0,998	0 - 220

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo del flujo volumétrico a la altura de 70 del rotámetro.

$$V_0 = 8E-07 * H^{1,193} \quad \text{[Ecuación 51]}$$

Donde:

V_0 = flujo volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

H = altura del rotámetro (mm)

$$V_0 = 8E-07 * 70^{1,193}$$

$$V_0 = 0,00012714 \frac{m^3}{s}$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de flujo volumétrico del aceite.

- Cálculo del área de flujo total del banco de tubos.

$$a_t = \frac{N \cdot a_f}{n} \quad \text{[Ecuación 52]}$$

Donde:

a_t = área de flujo total del banco de tubos (m^2)

N = número de tubos (adimensional)

$a_{f/t}$ = área de flujo por tubo (m^2 /tubo)

n = número de pasos por la coraza (adimensional)

Se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación:

$$a_t = \frac{20 \text{ tubos} \cdot \frac{(\pi \cdot (0,009398m)^2)}{4}}{2 \text{ tubo}}$$
$$a_t = 0,000694 m^2$$

- Cálculo de la velocidad lineal de flujo del aceite.

$$v_o = \frac{\dot{V}_o}{a_t} \quad \text{[Ecuación 53]}$$

Donde:

a_t = área de flujo total del banco de tubos (m^2)

\dot{V}_o = flujo volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

v_o = velocidad lineal ($\frac{m}{s}$)

Se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación:

$$v_o = \frac{0,000127 \frac{m^3}{s}}{0,000694 m^2}$$

$$v_o = 0,18329 \frac{m}{s}$$

- Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 en la lectura de 70 del rotámetro.

$$\bar{T}_{o1} = \frac{\bar{t}_{e01} + \bar{t}_{s01}}{2} \quad \text{[Ecuación 54]}$$

Donde:

\bar{T}_{o1} = temperatura promedio de flujo ($^{\circ}C$)

\bar{t}_{e01} = temperatura promedio de las corridas in ICCT1 ($^{\circ}C$)

\bar{t}_{e02} = temperatura promedio de las corridas in ICCT2 ($^{\circ}C$)

Se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación:

$$\bar{T}_{01} = \frac{75,4 + 86,4}{2}$$

$$\bar{T}_{01} = 80,9$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de temperatura.

- Número de Reynolds en ICCT1 en la lectura de 70 del rotámetro.

$$Re = \frac{v_o \rho_o}{\mu_o} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

Re = número de Reynolds

d_i = diámetro del tubo (m)

v_o = velocidad de flujo del fluido (m/s)

ρ_o = densidad del fluido (kg/m^3)

μ_o = viscosidad del fluido (kg/ms)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$Re = \frac{(0,009398\text{m}) \left(0,13329 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \left(851,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{0,0298 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 49$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de número de Reynolds para cada corrida.

- Determinación del factor J_H en la lectura de 70 del rotámetro en ICCT1.
Se utiliza la figura 8, se determina J_H utilizando el valor del número de Reynold y L/d_i .

$$J_H = 1,5$$

- Cálculo del valor del coeficiente de transferencia de calor h_i en la lectura de 70 del rotámetro en ICCT1.

$$h_i = j_H * \frac{k}{d_i} * \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$h_i = 1,5 \frac{0,13794 \frac{W}{m.K}}{0,009398m} \left(\frac{2140 \frac{J}{kgK} * 0,0298 \frac{kg}{m^3}}{0,13797 \frac{W}{m.K}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_i = 170 \frac{W}{m^2.K}$$

- Temperatura de película de condensado

$$T_F = \frac{(T_{sat} + T_s)}{2} \quad \text{[Ecuación 55]}$$

Donde,

T_F = temperatura de película de condensado ($^{\circ}C$)

T_{sat} = temperatura de saturación del vapor ($^{\circ}C$)

T_s = temperatura de la superficie del tubo ($^{\circ}C$)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$T_F = \frac{(98,44 + 80,9)}{2}$$

$$T_F = 89,7$$

- Cálculo del calor latente modificado.

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68 \cdot c_{pl} \cdot (T_{sat} - T_s) \quad \text{[Ecuación 56]}$$

Donde:

h_{fg}^* = calor latente modificado de vaporización (J/kg)

c_{pl} = capacidad calorífica a la temperatura promedio de película (J/kg.°C)

h_{fg} = calor latente del agua a la temperatura de saturación (J/kg)

T_{sat} = temperatura de saturación del vapor (°C)

T_s = temperatura de la superficie del tubo (°C)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$h_{fg}^* = 2\,261\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 0,68 \cdot 4\,205,7 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot (98,44 - 80,9)$$

$$h_{fg}^* = 2\,311\,096 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor promedio para un tubo horizontal, dado que $v \gg v_s$, $[\rho_l - \rho_v] \approx \rho_l$, las propiedades del líquido se determinan a la temperatura promedio de la película de condensado.

$$h_{horiz} = 0,729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}^* k^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s)^3} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{[Ecuación 57]}$$

Fuente: Cengel, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 605.

Donde:

h_{horiz} = coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película sobre las superficies exteriores de un tubo horizontal $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)$

g = aceleración gravitacional $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$

ρ_l = densidades del líquido (kg/m^3)

ρ_v = densidades del vapor (kg/m^3)

μ_l = viscosidad del líquido (kg/ms)

k = conductividad térmica del líquido $(\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

T_{sat} = temperatura de saturación del vapor $(^\circ\text{C})$

T_s = temperatura de la superficie del tubo $(^\circ\text{C})$

d_o = diámetro exterior del tubo (m)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$h_{\text{horiz}} = 0,729 \left[\frac{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * (965,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})^2 * 2311,096 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * (0,6749 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}})^3}{0,000316 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} * (98,44 - 80,9) 0,0127\text{m}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$h_{\text{horiz}} = 12\,709 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ}$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor promedio para N tubos verticales.

$$h_{\text{vert,N tubos}} = 1,29 * \left(\frac{2 * d_o}{L_1 + L_2} \right)^{\frac{1}{4}} * \left(\frac{1}{N^4} \right) * h_{\text{horiz}} \quad \text{[Ecuación 58]}$$

Fuente: Cengel, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. p. 605.

Donde:

$h_{\text{vert,Ntubos}}$ = coeficiente de transferencia de calor promedio en la condensación en película para todos los tubos en una hilera vertical $\left(\frac{W}{m^2.K}\right)$

h_{horiz} = coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película sobre las superficies exteriores de un tubo horizontal $\left(\frac{W}{m^2.K}\right)$

L_1 = longitud de la tubería 1 (m)

L_2 = longitud de la tubería 2 (m)

N = número de tubos (adimensional)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$h_{\text{vert,Ntubos}} = 1,29 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,0127\text{m}}{0,8129\text{m} + 0,8382\text{m}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{1}{20^{\frac{1}{4}}} \right) \cdot 12\,781,956 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ}$$

$$h_{\text{vert,20 tubos}} = 2\,730 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ}$$

$$h_{o1} = 2\,730 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ}$$

- Diámetro equivalente para arreglo en cuadrado.

$$D = \frac{4 \cdot \left(P_T^2 - \frac{\pi d_o^2}{4} \right)}{\pi d_o} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 172.

Donde:

D_e = diámetro equivalente (m)

P_T = espaciado de los tubos (m)

d_o = diámetro exterior del tubo (m)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$D = \frac{4 \left((0,0206\text{m})^2 - \frac{\pi(0,0127\text{m})^2}{4} \right)}{0,0127\text{m}}$$

$$D = 0,03 \text{ m}$$

- Velocidad de masa del agua del lado de la coraza

$$G_s = w \frac{P_T}{D_i \cdot C' \cdot B} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 172.

Donde:

G_s = velocidad de masa (kg/sm^2)

P_T = espaciado de los tubos (m)

D_i = diámetro interior de la coraza (m)

C' = sección libre entre tubos (m)

B = espaciado de los deflectores (m)

w = peso del flujo del fluido (kg/s)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$G_s = 0,55209 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \frac{0,0206\text{m}}{0,1619\text{m} \cdot 0,0079375\text{m} \cdot 0,2370\text{m}}$$

$$G_s = 37,394 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

- Número de Reynolds en ICCT2 del lado de la coraza.

$$Re = \frac{D_e G_s}{\mu} \quad \text{[Ecuación 59]}$$

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p. 142.

Donde:

D_e = Diámetro equivalente (m)

μ = viscosidad del fluido (kg/ms)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$Re = \frac{(0,03\text{m}) \left(37,39 \frac{\text{kg}}{\text{s.m}^3}\right)}{0,000911 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 1\,230$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de número de Reynolds para cada corrida.

- Determinación del factor J_H en la lectura de 70 del rotámetro en ICCT2. Se utiliza la figura 10, se determina J_H utilizando el valor del número de Reynold.

$$J_H = 17,9$$

- Cálculo del valor del coeficiente de transferencia de calor h_{o2} en la lectura de 70 del rotámetro en ICCT2.

$$h_{o2} = j_H * \frac{k}{D_e} * \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$h_{o2} = 17,8 \frac{0,606 \frac{W}{m \cdot K}}{0,03 m} \left(\frac{4 182,4 \frac{J}{kg \cdot K} * 0,00091 \frac{kg}{m \cdot s}}{0,606 \frac{W}{m \cdot K}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_{o2} = 665 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1.

$$U_{C1} = \frac{h_i \frac{d_i}{d_o} h_{o1}}{h_i \frac{d_i}{d_o} + h_{o1}} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$U_{C1} = \frac{170 \frac{W}{m^2 \cdot K} * \frac{0,009398 m}{0,0127 m} * 2 730 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}{170 \frac{W}{m^2 \cdot K} * \frac{0,009398 m}{0,0127 m} + 2 730 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$U_{C1} = 120,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ}$$

Con el procedimiento anterior, se calcularon los demás valores para cada corrida.

- Cálculo del flujo de calor entre los fluidos dentro del tubo y la coraza.

$$Q = wc(t_2 - t_1) = V_{O \ O1} * c_{pO1} * (t_2 - t_1)$$

[Ecuación 15]

Fuente: Kern, Donald. *Procesos de Transferencia de Calor*. p.175.

Donde:

Q = flujo de calor (J/s)

w = flujo másico del fluido (kg/s)

c = calor específico del fluido frío (J/kgK)

t₂ = temperatura de salida del fluido (K)

t₁ = temperatura de entrada del fluido (K)

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$Q = 0,000127 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 851,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2140 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (86,4 - 75,4)$$
$$Q = 2548 \text{ W}$$

- Cálculo del área de transferencia de calor en el interior de los tubos.

$$A_s = d_i * (10 L_1 + 10 L_2) \quad [\text{Ecuación 60}]$$

Fuente: elaboración propia.

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$A_s = 0,009398 \text{ m} (10 \cdot 8128 \text{ m} + 10 \cdot 0,8382 \text{ m})$$
$$A_s = 0,4876 \text{ m}^2$$

- Cálculo del valor de la media logarítmica de la diferencia de temperatura en ICCT1.

$$\text{MLDT} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln((T_1 - t_2)/(T_2 - t_1))} \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$MLDT1 = \frac{(133,7 - 86,4) - (120 - 75,4)}{\ln(133,7 - 86,4) / (120 - 75,4)}$$

$$MLDT1 = 45,9$$

- Cálculo del verdadero valor de la media logarítmica de la diferencia de temperatura en ICCT1.

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$S = \frac{86,4 - 75,4}{133,7 - 75,4}$$

$$S = 0,2$$

$$R = \frac{133,7 - 120}{86,4 - 75,4}$$

$$R = 1,2$$

De la figura 12 se obtiene el valor del factor de corrección $F_T=0,99$.

El valor verdadero de temperatura esta expresada en la siguiente ecuación:

$$t = F_T(MLDT) \quad \text{[Ecuación 19]}$$

$$t = 0,99 \cdot 45,9$$

$$t = 45,4$$

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor de diseño para el ICCT1.

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot t} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$U_D = \frac{2,548 \text{ W}}{0,4876 \text{ m}^2 \cdot 45,4}$$

$$U_D = 115 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ}$$

- Cálculo del factor de obstrucción para el ICCT1.

$$R = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_c} \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$R = \frac{1}{114,99 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}} - \frac{1}{120,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$R = 0,00040 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ}{\text{W}}$$

Con el procedimiento anterior se calcularon los demás valores de factor de obstrucción de cada corrida.

- Cálculo de la incertidumbre

La incertidumbre de la magnitud indirectas como $R=f(X,Y,Z)$, donde R es función de otras magnitudes directas X, Y, Z, medidos directamente con sus incertidumbres directas. La incertidumbre de la medida indirecta está dada por la siguiente expresión:

$$R = \left| \frac{\partial R}{\partial X} \right| \Delta X + \left| \frac{\partial R}{\partial Y} \right| \Delta Y + \left| \frac{\partial R}{\partial Z} \right| \Delta Z \quad [\text{Ecuación 61}]$$

Fuente: STEWART, James, *Cálculo. Trascendentes tempranas*. p.913.

Por ejemplo, para el cálculo de la incertidumbre de la medida indirecta del número de Reynolds:

$$Re = \left| \frac{v_o \rho_o}{\mu} \right| * \Delta d_i + \left| \frac{d_i \rho_o}{\mu} \right| * \Delta v_o + \left| \frac{-d_i v_o \rho_o}{\mu^2} \right| * \Delta \mu_o + \left| \frac{d_i v_o}{\mu_o} \right| * \Delta \rho_o$$

Donde:

$$v_o = 0,18329 \pm 0,00001 \text{ m/s}$$

$$\rho_o = 851,6 \pm 0,3 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_o = 0,0298 \pm 0,0005 \text{ kg/ms}$$

$$d = 0,009398 \text{ (dato teórico)}$$

Se sustituyen los valores correspondientes:

$$\begin{aligned}
Re = & \left| \frac{0,18329 \frac{m}{s} * 851,6 \frac{kg}{m^3}}{0,0298 \frac{kg}{ms}} \right| * 0 + \left| \frac{0,009398m \ 851,6 \frac{kg}{m^3}}{0,0298 \frac{kg}{ms}} \right| * 0,00001 \frac{m}{s} \\
& + \left| \frac{-0,009398 m * 0,18329 \frac{m}{s} * 851,6 \frac{kg}{m^3}}{\left(0,0298 \frac{kg}{ms}\right)^2} \right| * 0,0005 \frac{kg}{ms} \\
& + \left| \frac{0,009398m \ 0,18329 \frac{m}{s}}{0,0298 \frac{kg}{ms}} \right| * 0,3 \frac{kg}{m^3} \\
Re = & 1
\end{aligned}$$

Con el procedimiento anterior, se calcularon los demás valores de incertidumbres necesarios.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico utilizado se basó en juzgar la confiabilidad de la medida de tendencia central de los datos de factor de obstrucción obtenidos con los datos de temperatura de los sensores RTD y bimetálicos.

Tabla XLVI. **Confiabilidad de los datos obtenidos de factor de obstrucción con los sensores RTD**

unidad	Media aritmética $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right)$	Desviación estándar $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right)$	Coficiente de variación (%)	Valor aceptado $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right)$
ICCT1	0,00038	0,00004	9,6	0,0003
ICCT2	0,00042	0,00004	8,7	0,0003

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Confiabilidad de los datos obtenidos de factor de obstrucción con los sensores bimetálicos**

unidad	Media aritmética ($\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$)	Desviación estándar ($\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$)	Coefficiente de variación (%)	Valor aceptado ($\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$)
ICCT1	0,00076	0,00007	8,9	0,0003
ICCT2	0,00044	0,00009	21,2	0,0003

Fuente: elaboración propia.

Debido a que los valores de obstrucción son diferentes, se acepta la hipótesis alternativa: Existe diferencia entre el desempeño del intercambiador de calor de coraza y tubos cuando se toman las medidas con el sensor de temperatura actual y con los sensores de temperatura nuevos. Los datos obtenidos son confiables debido a que el coeficiente de variación es bajo, y no existe diferencia de gran magnitud para ambos sensores.

4. RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes resultados de coeficiente globales de transferencia de calor para los ICCT1 e ICCT2, como se ilustra en la siguiente tabla:

4.1. Coeficientes de transferencia de calor

Tabla XLVIII. **Coeficientes globales de transferencia de calor para el intercambiador de calor (ICCT) 1 y 2, y propiedad del aceite con datos de los RTD**

Lectura rotámetro	Velocidad lineal del aceite v_o (m/s)	$\frac{\rho \cdot v_o \cdot D}{\mu}$ T_f (°C)	Reynolds Re_1 (Adimensional)	Prandtl Pr_1 (Adimensional)	U_{C1} (W/m ² ·°C)	U_{D1} (W/m ² ·°C)	$U_1 (U_{C1} - U_{D1})$ (W/m ² ·°C)	$\frac{U_1 \cdot D}{k}$ T_f (°C)	Reynolds Re_2 (Adimensional)	Prandtl Pr_2 (Adimensional)	U_{C2} (W/m ² ·°C)	U_{D2} (W/m ² ·°C)	$U_2 (U_{C2} - U_{D2})$ (W/m ² ·°C)
70	0,18329	80,9	49	463	120,5	115	5,5	80,4	48	470	106,4	102	4,4
130	0,38359	83,1	110	435	155,4	148	7,4	82,7	108	441	126,9	121	5,9
180	0,56555	84,9	171	413	174,7	164	10,7	84,5	169	419	140,7	132	8,7
220	0,71852	85,4	221	407	188,1	175	13,1	85,0	218	412	150,1	141	9,1

Fuente: elaboración propia.

Donde:

U_{C1} , U_{C2} =Coeficiente global limpio en intercambiador de calor 1 y 2, respectivamente.

U_{D1} , U_{D2} =Coeficiente global sucio (diseño) en intercambiador de calor 1 y 2, respectivamente.

\bar{T}_1, \bar{T}_2 = temperatura promedio de flujo del aceite en intercambiador 1 y 2, respectivamente.

Tabla XLIX. **Coefficientes globales de transferencia de calor para el intercambiador de calor (ICCT) 1 y 2, y propiedad del aceite con datos de los sensores bimetálicos**

Lectura rotámetro	Velocidad lineal del aceite v_o (m/s)	$\frac{v_o \cdot \rho \cdot D}{\mu}$ (Adimensional)	Reynolds Re_1 (Adimensional)	Prandtl Pr_1 (Adimensional)	U_{C1} (W/m ² ·°C)	U_{D1} (W/m ² ·°C)	$U (U_{C1} - U_{D1})$ (W/m ² ·°C)	$\frac{U \cdot D}{k}$ (Adimensional)	Reynolds Re_2 (Adimensional)	Prandtl Pr_2 (Adimensional)	U_{C2} (W/m ² ·°C)	U_{D2} (W/m ² ·°C)	$U (U_{C2} - U_{D2})$ (W/m ² ·°C)
70	0,18329	79	47	485	122	113	9	79	46	495	108	104	4
130	0,38359	81	104	459	158	139	19	81	102	465	129	122	7
180	0,56555	83	162	436	177	156	21	83	160	441	142	132	10
220	0,71852	84	209	429	191	168	23	83	206	435	152	142	10

Fuente: elaboración propia.

4.2. Factores de obstrucción

Se obtuvieron los siguientes factores de obstrucción determinados por medio de los datos de temperatura obtenidos con los sensores RTD y los bimetálicos.

Tabla L. **Factor de obstrucción para los intercambiadores de calor 1 y 2 con datos de los RTD**

Lectura rotámetro	R _{d1}	R _{d1}	R _{d2}	R _{d2}
	ICCT1 (m ² .°C/W)	ICCT1 (m ² .°C/W)	ICCT2 (m ² .°C/W)	ICCT2 (m ² .°C/W)
70	0,00040	±0,00006	0,0004	±0,0001
130	0,00033	±0,00005	0,00037	±0,00009
180	0,00037	±0,00005	0,00045	±0,00008
220	0,00041	±0,00005	0,00044	±0,00008

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Factor de obstrucción para los intercambiadores de calor 1 y 2 con datos de los sensores bimetálicos**

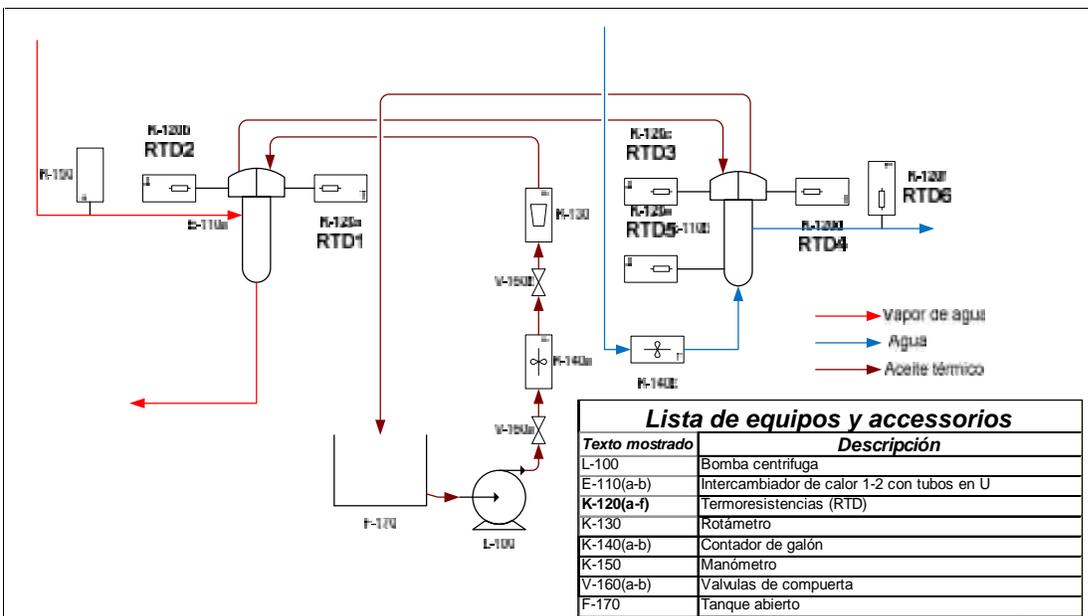
Lectura rotámetro	R _{d1}	R _{d1}	R _{d2}	R _{d2}
	ICCT1 (m ² .°C/W)	ICCT1 (m ² .°C/W)	ICCT2 (m ² .°C/W)	ICCT2 (m ² .°C/W)
70	0,0007	±0,0005	0,0003	±0,0009
130	0,0009	±0,0003	0,0004	±0,0007
180	0,0008	±0,0003	0,0006	±0,0006
220	0,0007	±0,0003	0,0004	±0,0006

Fuente: elaboración propia.

4.3. Puntos diseñados para la instalación de los RTD.

A continuación, se ilustra en la figura 17 los puntos adecuados para la instalación de los RTD.

Figura 17. Diagrama de equipo del sistema de intercambiadores de calor de coraza y tubos



Fuente: elaboración propia.

4.4. Programa de mantenimiento y modo de operación del equipo

Tabla LII. Programa de mantenimiento para los sensores de temperatura y el intercambiador de calor

Conexiones eléctricas	<ul style="list-style-type: none">• Verificar terminales flojas y oxidadas de los sensores y multímetro.• Verificar el multímetro se encuentre en posición apagado.• Verificar interruptor principal de alimentación al equipo este en posición apagado si el equipo no está en uso.
Calibración de los sensores	<ul style="list-style-type: none">• Tomar medidas de caídas de voltaje para los 6 sensores de temperatura haciendo circular el aceite y el agua en el sistema. Estos datos se deberán tomar a 3 lecturas de rotámetro, uno mínimo, medio y máximo. Los valores de temperatura obtenidas se comparan con los valores de temperatura (obtenidos del tanque) con el sensor de temperatura láser que se tiene en el laboratorio de operaciones unitarias. El sensor que presente una temperatura con disparidad mayor al de la tolerancia a esa temperatura, debe ser calibrado según los pasos se explican en la teoría.
Fugas de aceite	<ul style="list-style-type: none">• Verificar los puntos de conexión de los sensores a los cabezales y tubos.• Verificar los codos, uniones de la tubería.• Verificar que los empaques de los cabezales estén libre de rastros de aceite.

Continuación de la tabla LII.

<p>Flujos y cavitación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la presencia de pozo térmico por cavitación tomando temperaturas cada 5 minutos por 20-25 minutos, con flujo total del aceite y manteniendo la dirección de descarga del aceite dirigida hacia la pared del tanque. • Verificar los tiempos de flujos a diferentes lecturas de rotámetro para el aceite. • Verificar la presencia de burbujas de aire en el rotámetro y su estabilidad a diferentes alturas.
<p>Inestabilidad del manómetro</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la estabilidad del manómetro para el flujo de vapor.
<p>Sellos (fibra de asbestos comprimido vulcanizado)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que los sellos de los cabezales estén libres de aceite y sin deformación. • Se recomienda elaborar plantillas de acetato para obtener las medidas de los sellos, como se ilustra en el apéndice 5. • Reemplazar sellos deformados por el calor, y atornillarlo a las juntas uniformemente y siguiendo el patrón diametral escalonado.
<p>Limpieza del aceite</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar la existencia de exceso de partículas en el aceite, filtrarlo si es necesario, por medio de una extensión de tubería con un filtro en un extremo para evitar tocar el aceite. • Verificar que no haya aceite atrapado en la tubería. Si lo hay, proponer instalar una válvula de alivio de vacío.

Fuente: elaboración propia.

4.5. Modo de operación del equipo

- Se mantienen las válvulas de compuerta cerradas, la descarga del motor y la de manejo del rotámetro.
- Se enciende la bomba de agua y se le permite circular gradualmente, abriendo completamente la válvula de compuerta. Se mide el tiempo en que fluyen $0,1 \text{ m}^3$ de agua.
- Se pone el interruptor principal de alimentación eléctrica en posición de encendido y, luego, se presiona el botón de encendido del motor para la bomba de aceite. Se permite circular el aceite gradualmente abriendo la válvula de compuerta de descarga más cerca a la bomba de agua, luego, la válvula de compuerta de control de lectura de rotámetro hasta llegar a la lectura de rotámetro requerido.
- Se hace pasar lentamente vapor al sistema, abriendo la válvula de control de flujo de vapor, hasta llegar a la presión manométrica deseada.
- Se enciende el multímetro de la caja de control de sensores RTD y se ajusta el selector rotativo en la posición de la escala DCV en 200m (las lecturas serán en mV).
- Se toma lectura de mV del multímetro para el RTD1 después de presionar simultáneamente los primeros dos botones alineados verticalmente de la caja de control. Después de tomar la lectura, se liberan los botones y se presionan los siguientes 2 para RTD2, y así consecutivamente.

- Se cambia la lectura del rotámetro con la válvula de compuerta hasta llegar a la segunda altura y se repite el paso 6.
- Después de tomar las lecturas de caídas de voltaje a las lecturas de rotámetro requerido, se cierra gradualmente el flujo de vapor.
- Se cierran gradualmente las válvulas de compuerta para el flujo de aceite y, luego, se apaga el motor y se pone en la posición de apagado el interruptor principal del sistema.
- Se cierra gradualmente la válvula de compuerta para el flujo del agua y, luego, se apaga el motor de la bomba de agua.
- Los valores de mV obtenidos se introducen a la ecuación 49 para obtener el valor de la temperatura.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La tabla XLVIII ilustra los valores de coeficientes globales de transferencia de calor para el intercambiador de calor de coraza y tubos (ICCT) 1 y 2, obtenidos con los datos de temperatura de los RTD. Los valores en ICCT1 suelen ser mayores a los del ICCT2 debido a que existe mayor transferencia de calor en el ICCT1, la diferencia de temperatura entre fluidos es mayor en ICCT1 que en ICCT2. El valor de coeficientes globales limpio y sucio tiende a aumentar, cuando se incrementa la velocidad lineal del aceite (fluido patrón), indicando que al tender a un flujo turbulento favorece la transferencia de calor.

La tabla XLIX ilustra los valores de coeficientes globales de transferencia de calor obtenidos con los datos de temperatura de los sensores bimetálicos. Los valores tienden a ser mayores que los determinados con los RTD. Los valores de temperaturas adquiridas de los fluidos fueron menores a los valores de los RTD, pero se detectó una mayor transferencia de calor, según los valores de coeficientes globales. La transferencia de calor fue mayor debido a la presencia del fenómeno de cavitación que aportó calor al aceite y los efectos de los cálculos realizados, afectados, principalmente, al determinar los valores de los coeficientes individuales interior del tubo que fueron de mayor magnitud debido a la conductividad térmica que resulta ser mayor a menores temperaturas.

Los factores de obstrucción obtenidos con los datos de temperatura de los sensores de temperatura RTD permitieron observar que la precisión y exactitud es muy importante al momento de análisis de este parámetro y de diseño de un equipo de proceso.

La tabla L ilustra los resultados de factor de obstrucción del ICCT1 y ICCT2, con valores cercanos al valor de obstrucción combinado de 0,0003 para cada ICCT. Los valores de incertidumbre permiten expresar los resultados obtenidos con una mejor exactitud, con valores de incerteza en promedio de 14% y 22%. Los valores de error relativo, en promedio, se mantienen en 37% y 52% para el ICCT1 e ICCT2, respectivamente. Estos factores de obstrucción además de indicar que el equipo es aceptable para el proceso, para poder llevar a cabo un periodo de mantenimiento razonable, permiten mantener un diseño de equipo a bajo costo para el proceso.

La tabla LI ilustra los resultados de factor de obstrucción de los ICCT1 e ICCT2 obtenidos con los datos de temperatura de los sensores bimetálicos. Los valores tienden a ser mayor que los obtenidos con los sensores RTD, resultando con un error relativo promedio de 177% y 58% para el ICCT1 e ICCT2 respectivamente. Las incertidumbres se encuentran con valores promedio de 47% y 175% para ICCT1 e ICCT2, respectivamente. Este valor puede indicar que el diseño del equipo es aceptable para el proceso, pero indica un exceso de superficie que puede elevar los costos de inversión durante la construcción del equipo y para diseños futuros.

Con respecto a la precisión y confiabilidad de los resultados, se observó que los valores de coeficiente de variación para los factores de obstrucción obtenidos con ambos sensores no tienen mucha diferencia. En ICCT1, se obtuvo 9,6% para los RTD y 8,9% para los sensores bimetálicos, lo cual indica que existe mayor precisión con los sensores bimetálicos. En ICCT2, se obtuvo 8,7% para los RTD y 21,2% para los sensores bimetálicos, donde los RTD resultan con mayor precisión. Las diferencias se debieron mayormente a la inestabilidad de presión de vapor, cavitación y variación de lecturas de caída de voltaje al presionar los botones normalmente abiertos en la caja de control.

La figura 17 ilustra los puntos de instalación de los sensores RTD. Los RTD 1 y 2 están indicados como accesorios K-120a y K-120b, respectivamente. Ambos RTD se encuentran instalados al cabezal del ICCT1 (indicado como E-110a, intercambiador 1-2 con tubos en U), el RTD 1 detecta la temperatura de entrada del aceite al ingresar al sistema de intercambiadores de calor, pasa por los 20 tubos y, luego, regresa al cabezal nuevamente; su temperatura es medida por el RTD 2. Los sensores RTD 3 y 4, ambos instalados al cabezal del ICCT2, se encuentran indicados como accesorios K-120c y K-120d. El RTD 3 mide nuevamente la temperatura de entrada del aceite proveniente del ICCT1, circula por los 20 tubos del ICCT2 y luego regresa al cabezal nuevamente y se mide su temperatura con el RTD 4.

Los RTD 5 y 6 son indicados como accesorios K-120e y K-120f, respectivamente. El RTD 5 mide la temperatura de entrada del agua (a temperatura ambiente) que ingresa por la parte inferior de la coraza del ICCT2, después, sale por la tubería donde se encuentra instalado el RTD 6, la cual mide la temperatura de salida del agua.

La instalación de los RTD en los cabezales y corazas de los intercambiadores de calor de coraza y tubos (ICCT) se mantuvieron en los mismos puntos de medida en las que estaban los sensores bimetálicos, insertados de forma perpendicular al flujo del fluido (creando el coeficiente de transferencia de calor máximo), para mantener un mejor contacto y detección de temperatura de los fluidos. Se logró la inmersión de la sonda (con un diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada) de los RTD a una profundidad de, aproximadamente, 3 pulgadas (0,0762m) en los cabezales y las corazas de los ICCT.

La tabla LII indica los pasos a seguir durante el mantenimiento de los sensores RTD instalados y el equipo intercambiador de calor de coraza y tubos (ICCT).

Las conexiones flojas pueden afectar las lecturas de caída de voltaje, resultando con lecturas de temperatura erróneas. Esta falla que se detectó en el RTD3. Para evitar lecturas erróneas se propuso la calibración de los sensores siguiendo los pasos de calibración utilizados en la investigación, una combinación calibración por caracterización y tolerancia. Primero se definen empíricamente los valores de los coeficientes de calibración, como característica del sensor que se calibra. Después de obtener los valores de los coeficientes A y B de la ecuación de Van-Dusen, se comparan los valores de temperatura obtenidas con los coeficientes determinados y los coeficientes de las curvas estándar de ASTM 1137 y IEC 60751; se determina la clase también.

La caja de control ilustra medidas de caída de voltaje debido a que se intentó instalar un sistema de conversión de señal, de caída de voltaje a lecturas digitales de temperatura por medio del módulo MSP-EXP430G2, de la marca Texas Instruments. Se logró la generación de la señal, pero resultaban ser aleatoriamente inestables y erróneas. Al final, se propuso obtener lecturas de caída de voltaje para poder ingresarlas a la ecuación (49) de temperatura determinada para los RTD.

Se propuso detectar fugas de aceite del equipo porque al principio presentó problema de mezclado de los fluidos, aceite-condensado y aceite-agua. Las mezclas eran más comunes en los cabezales debido a que los sellos se encontraban vencidos. Los puntos de conexión de tuberías con medidor de flujo, motor y principalmente los codos, son otros puntos de fuga del aceite por

los efectos de calentamiento y enfriamiento. Esto suele afectar los sellos de los motores de combustión interna.

La causa del fenómeno de pozo térmico se detectó cuando se encontró que la descarga directa del aceite de forma perpendicular a la superficie del aceite en el tanque desencadenaba el efecto de cavitación en la bomba de aceite. Esto causaba el calentamiento gradual de la bomba, tuberías, los ICCT, y, principalmente, la inestabilidad del rotámetro (se le adherían burbujas de aire). Para evitar la cavitación se desvió la descarga del aceite hacia la pared del tanque.

Cuando se alimentó vapor saturado al equipo, se observó que la presión era muy inestable, variando entre el rango de 20 psig y 30 psig. Fue muy difícil mantener una presión cercana a los 30 psig. Para corregir esta anomalía se necesitaría un nuevo regulador de presión. Los sellos se tuvieron que realizar con plantillas de acetato debido a su diseño interior y a que no tienen un tamaño estándar de brida.

Es muy difícil filtrar el aceite. Con el tiempo, el sistema de tanque y tubería liberan herrumbre, causando que el aceite siempre se vea contaminado de partículas. La mejor corrección para este problema sería reemplazar el tanque y las tuberías de hierro galvanizado por unas hechas de cobre.

Por último, el aceite se quedaba atrapado en la tubería, lo cual puede aumentar las incrustaciones en las tuberías de los ICCT. Para solucionar este caso, se puede instalar una válvula de alivio de vacío en el punto más alto del equipo y una bomba hidráulica manual para descargar el aceite al tanque.

CONCLUSIONES

1. Los coeficientes globales de transferencia de calor y los factores de obstrucción obtenidos por medio de los datos de temperatura de los RTD son inferiores a los valores obtenidos con los sensores bimetálicos, los RTD con un error relativo promedio del factor de obstrucción de 37% y 52% para ICCT1 e ICCT2, respectivamente, y los sensores bimetálicos con un error relativo promedio de 177% y 58% para el ICCT1 e ICCT2, respectivamente.
2. Los puntos de instalación de los RTD se mantuvieron en la misma posición donde se encontraban los sensores bimetálicos, manteniendo una inmersión de la sonda de cada sensor aproximadamente 3 pulgadas (0,0762 m) en los cabezales y la coraza de los ICCT, para lograr la detección óptima de la temperatura del fluido.
3. El programa de mantenimiento se basó en las observaciones de las anomalías que presentaba el equipo cuando se trabajó con él. El propósito es aplicar medidas preventivas y correctivas para evitar que se vuelvan a presentar.

RECOMENDACIONES

1. Cambiar el regulador de presión de vapor para mantener lecturas de presión de vapor aceptables durante las prácticas que los estudiantes llevarán a cabo en el laboratorio de operaciones unitarias.
2. Para evitar que el estudiante cambie constantemente la dirección de descarga del aceite, se debe instalar un codo de 135 grados que dirija la descarga hacia la pared del tanque para evitar la cavitación de la bomba.
3. Instalar una válvula de alivio para vacío en el punto más alto del equipo y una bomba hidráulica manual para descargar el aceite que quede atrapado en los ICCT y tuberías.
4. Instalar un sistema de conversión de señal de caída de voltaje a lecturas digitales de temperatura para facilitar las lecturas de temperatura del equipo.
5. Reconstruir el sistema de circulación del aceite con material de cobre, para mantener el aceite siempre limpio y una larga vida útil del equipo.
6. Actualizar los valores de coeficientes globales de transferencia de calor cada 5 años.
7. Utilizar otros fluidos patrón (accesibles) para determinar sus coeficientes globales de transferencia calor limpio y sucio en el equipo.

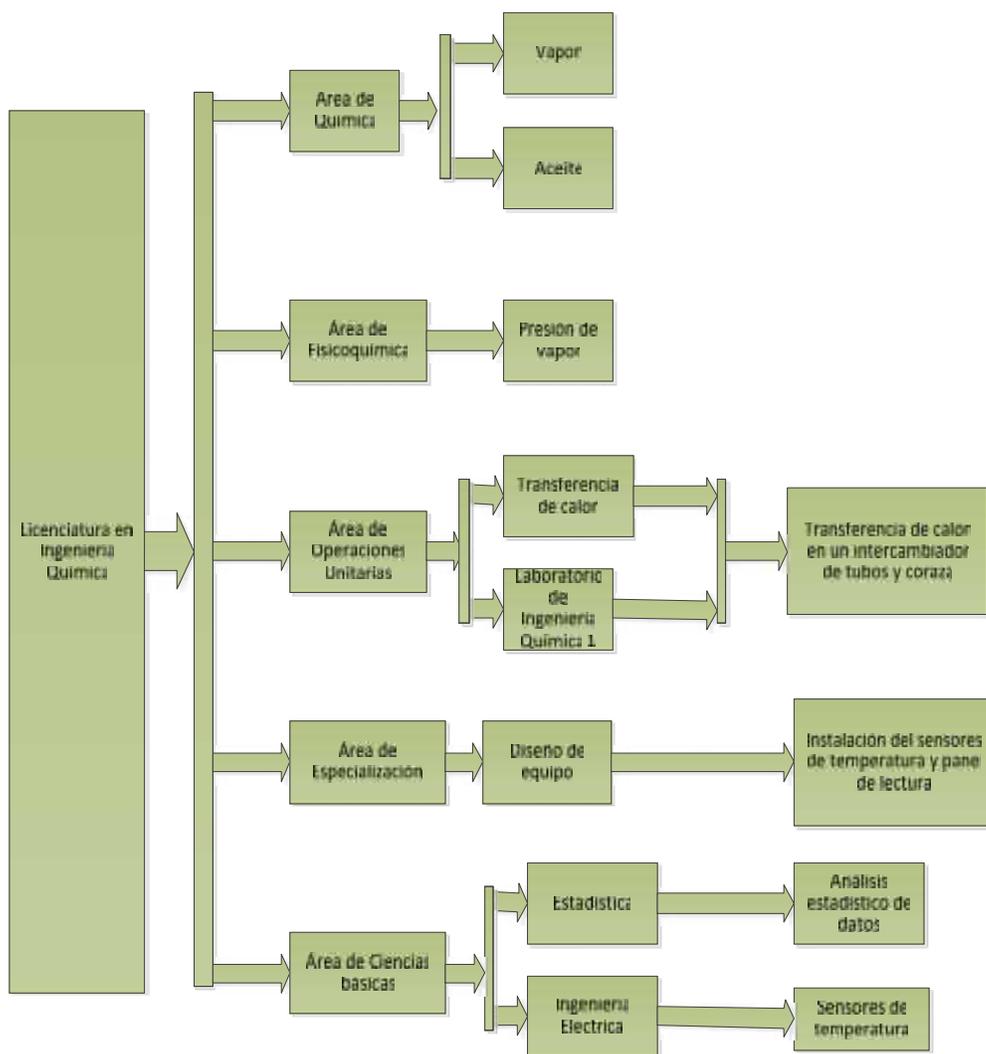
BIBLIOGRAFÍA

1. ACROMAG, *Criteria for temperature sensor selection of T/C and rtd sensor types.* [en línea] [_https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf_](https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf). [Consulta: 4 de marzo de 2016].
2. BOYLESTAD, Robert. *Introducción al Análisis de Circuitos*, Ing. Carlos Mendoza Barraza (trad). 4ta Ed. México. Pearson educación. 2004. 229 p. ISBN 970-26-0448-6.
3. CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. Ericka Jasso Hernán D´Borneville (trad). 4ta Ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 2011 945p. ISBN 978-607-15-0540-8.
4. FLUKE CALIBRATION, *Cómo calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT)* [en línea]. [_http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/how-calibrate-rtd-or-pla_](http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/how-calibrate-rtd-or-pla_). [Consulta: 3 de marzo de 2016].
5. KERN, Donald, *Procesos de transferencia de calor*. 31a. reimpresión, México: Continental, 1999. 978p ISBN 968-26-10400.

6. PÉREZ GARCÍA, Miguel A. *Instrumentación Electrónica*, [en línea] Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, ediciones Paraninfo, S.A. 2014. [_https://books.google.com/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&lpg=PP1&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q&f=false_](https://books.google.com/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&lpg=PP1&hl=es&pg=PR11#v=onepage&q&f=false). [consulta: 4 de marzo de 2016]
7. STEWART, James, *Cálculo. Trascendentes Tempranas*. Andrés Sestier Bouclier (trad). 4a ed. International Thompson Editores, S.A. de C.V. 2002. 1151p ISBN 970-686-127-0.
8. WIEGAND, Alexander, *Callender Van-Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers*. [en línea] [_http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf_](http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_en_co_59667.pdf). [Consulta: 6 de marzo de 2016].

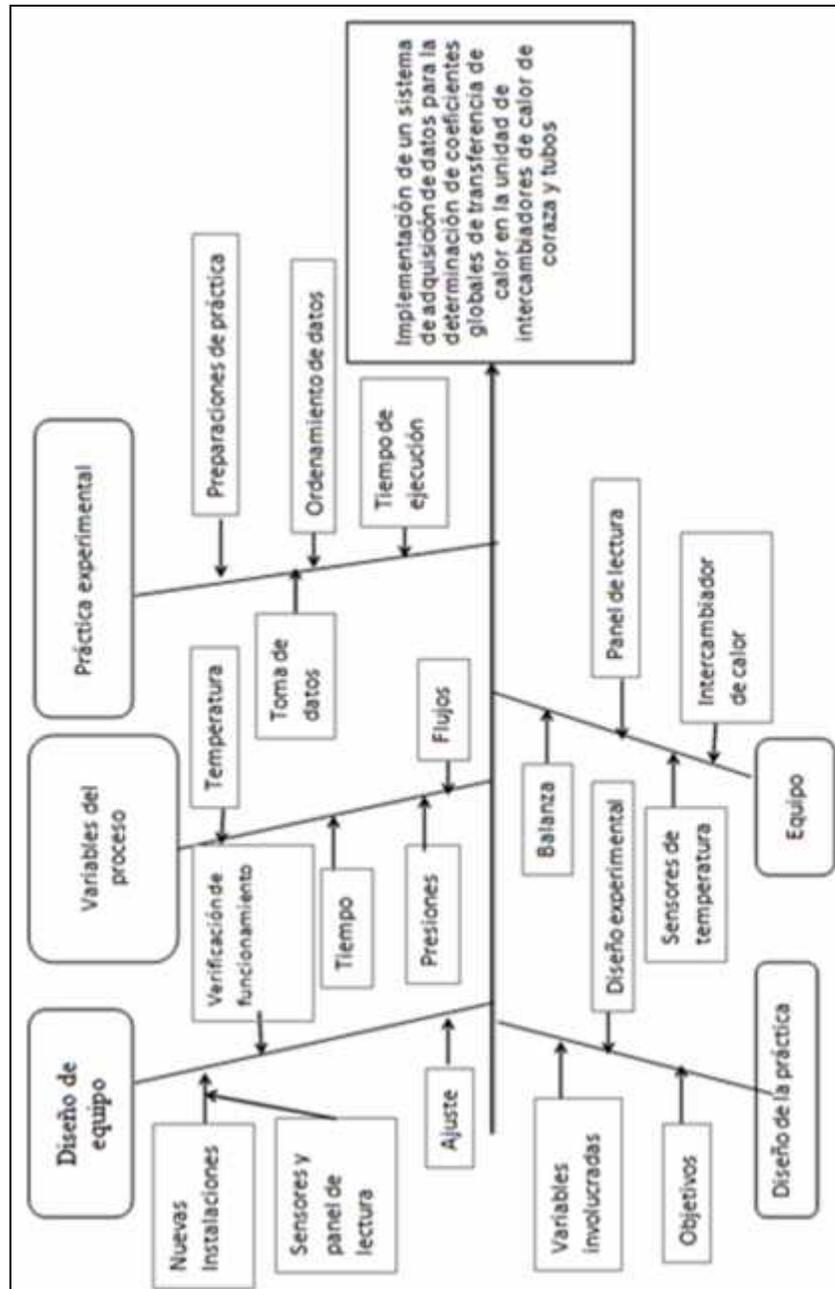
APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Tabulación de las incertezas calculadas a partir de datos de temperatura obtenidos con los RTD**

Incertezas tabla XI

Lectura rotámetro	ICCT1 (aceite) Caída de voltaje (mV)		ICCT2 (aceite) Caída de voltaje (mV)		ICCT2 (agua) Caída de voltaje (mV)	
	t_{eO1}	t_{sO1}	t_{eO2}	t_{sO1}	t_{eW2}	t_{sW2}
70	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
130	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
180	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
220	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XII

Lectura rotámetro	flujo (m ³ /s)
50	0,00000001
100	0,00000004
140	0,00000007
180	0,00000001
225	0,00000003

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XIII

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico \dot{V}_0 (m ³ /s)	Área de flujo total de banco de tubos a_t (m ²)	Velocidad lineal del aceite v_0 (m/s)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 \bar{T}_{01} (°C)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT2 \bar{T}_{02} (°C)
70	0,00000001		0,00001	0,5	0,5
130	0,00000004		0,00005	0,5	0,5
180	0,00000007		0,00010	0,5	0,5
220	0,00000001		0,00002	0,6	0,5

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XIV

Lectura rotámetro	Densidad del aceite en ICCT1 ρ_{01} (kg/m ³)	Densidad del aceite en ICCT2 ρ_{02} (kg/m ³)	Viscosidad del aceite en ICCT1 μ_{01} (kg/ms)	Viscosidad del aceite en ICCT2 μ_{02} (kg/ms)
70	0,3	0,3	0,0005	0,0005
130	0,3	0,3	0,0005	0,0005
180	0,3	0,3	0,0004	0,0004
220	0,3	0,3	0,0004	0,0004

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XV

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pO1} (J/kgK)	Calor específico en ICCT2 C_{pO2} (J/kgK)	Numero de Reynolds de flujo Re_{O1} ICCT1 (adimensional)	Numero de Reynolds de flujo Re_{O2} ICCT2 (adimensional)
70	2	2	1	1
130	2	2	2	2
180	2	2	3	3
220	2	2	4	4

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XVI

Lectura rotámetro	Factor J_{HO} ICCT1 (adimensional)	Factor J_{HO} ICCT2 (adimensional)	conductividad térmica k ICCT1 W/m.K	conductividad térmica k ICCT2 W/m.K
70			0,00003	0,00003
130			0,00004	0,00004
180			0,00004	0,00004
220			0,00004	0,00004

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XVII

Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT1 h_{i1} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT2 h_{i2} (W/m ² .°C)
1	1
1	1
2	1
2	2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XIX

Lectura rotámetro	Temperatura de saturación T_{sat} (°C)	Temperatura de pared T_s (°C)	Temperatura de película T_F (°C)	Densidad del vapor ρ_v (kg/m ³)	Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)
70		0,5	0,5	0,01	1
130		0,5	0,5	0,01	1
180		0,5	0,5	0,01	1
220		0,6	0,6	0,01	1

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XX

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pl} (J/kgK)	Conductividad térmica K_l (W/m.K)	viscosidad dinámica μ_l (Pa.s)	Densidad ρ_l (kg/m ³)	calor latente modificado h_{fg}^* (J/kg)
70	0,5	0,0002	0,000002	0,3	8
130	0,5	0,0002	0,000002	0,3	7
180	0,5	0,0002	0,000002	0,3	7
220	0,6	0,0002	0,000002	0,3	7

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXI

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre un tubo horizontal ICCT1 h_{horiz} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre 20 tubos ICCT1 $h_{vert,20\ tubos}$ (W/m ² .°C)	coeficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1 U_{C1} (W/m ² .°C)
70	10	3	0,1
130	10	3	0,1
180	10	3	0,2
220	10	3	0,2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXII

Lectura rotámetro	Temperatura promedio de flujo \bar{T}_w (°C)	Densidad en ICCT2 ρ_{w2} (kg/m ³)	Calor específico c_{pw} (J/kg.K)	Conductividad térmica k_w (W/m.K)	Viscosidad dinámica μ_w (Pa.s)
70	0,5	0,1	0,3	0,001	0,00001
130	0,5	0,1	0,3	0,001	0,00001
180	0,5	0,1	0,3	0,001	0,00001
220	0,5	0,1	0,3	0,001	0,00001

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXIII

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico \dot{V}_w (m ³ /s)	Flujo másico \dot{m}_w (kg/s)	Masa velocidad G_{sw} (kg/sm ²)	Numero de Reynolds Re_w (adimensional)	Factor J_{Hw} (adimensional)
70	0,00000003	0,0001	0,007	20	
130	0,00000003	0,0001	0,007	20	
180	0,00000003	0,0001	0,007	20	
220	0,00000003	0,0001	0,007	20	

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXIV

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor del lado de la coraza ICCT2 h_{o2} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia total limpio en ICCT2 U_{C2} (W/m ² .°C)
70	3	0,6
130	3	0,8
180	4	0,8
220	4	0,9

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXV

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_1 (W)	Área de transferencia de calor (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	4		0,3
130	5		0,3
180	5		0,3
220	5		0,3

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXVI

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_t	Diferencia de temperatura t (°C)	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1 U_{D1} (W/m ² .°C)
70				0,3	1
130				0,3	1
180				0,3	1
220				0,3	1

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXVII

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_2 (W)	Área de transferencia de calor (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	4		0,3
130	6		0,3
180	6		0,3
220	6		0,3

Fuente: elaboración propia.

Incetezas tabla XXVIII

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_t	Diferencia de temperatura t (°C)	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2 U_{D2} (W/m ² .°C)
70				0,3	1
130				0,3	1
180				0,3	1
220				0,3	1

Fuente: elaboración propia.

Incetezas tabla L

Lectura Rotámetro	R_{d1} ICCT1 (m ² .°C/W)	R_{d2} ICCT2 (m ² .°C/W)
70	0,00006	0,0001
130	0,00005	0,00009
180	0,00005	0,00008
220	0,00005	0,00008

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Tabulación de las incertezas calculadas a partir de datos de temperatura obtenidos con los sensores bimetálicos**

Incertezas tabla XXIX

Lectura rotámetro	ICCT1 (aceite)		ICCT2 (aceite)		ICCT2 (agua)	
	T_e (°C)	T_s (°C)	T_e (°C)	T_s (°C)	T_e (°C)	T_s (°C)
70	2	2	2	2	2	2
130	2	2	2	2	2	2
180	2	2	2	2	2	2
220	2	2	2	2	2	2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXX

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico \dot{V}_o (m ³ /s)	Área de flujo total de banco de tubos a_t (m ²)	Velocidad lineal del aceite v_o (m/s)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT1 \bar{T}_{O1} (°C)	Temperatura promedio de flujo del aceite en ICCT2 \bar{T}_{O2} (°C)
70	0,00000001		0,00001	4	4
130	0,00000004		0,00005	4	4
180	0,00000007		0,00010	4	4
220	0,00000001		0,00002	4	4

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXI

Lectura rotámetro	Densidad del aceite en ICCT1 ρ_{O1} (kg/m ³)	Densidad del aceite en ICCT2 ρ_{O2} (kg/m ³)	Viscosidad del aceite en ICCT1 μ_{O1} (kg/ms)	Viscosidad del aceite en ICCT2 μ_{O2} (kg/ms)
70	2	2	0,004	0,004
130	2	2	0,004	0,004
180	2	2	0,003	0,004
220	2	2	0,003	0,003

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXII

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pO1} (J/kgK)	Calor específico en ICCT2 C_{pO2} (J/kgK)	Numero de Reynolds de flujo Re_{O1} ICCT1 (adimensional)	Numero de Reynolds de flujo Re_{O2} ICCT2 (adimensional)
70	20	20	6	6
130	20	20	10	10
180	20	20	20	20
220	20	20	30	30

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXIII

Lectura rotámetro	Factor J_{HO} ICCT1 (adimensional)	Factor J_{HO} ICCT2 (adimensional)	conductividad térmica k ICCT1 W/m.K	conductividad térmica k ICCT2 W/m.K
70			0,0003	0,0003
130			0,0003	0,0003
180			0,0003	0,0003
220			0,0003	0,0003

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXIV

Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT1 h_{i1} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia de calor lado de tubos ICCT2 h_{i2} (W/m ² .°C)
10	10
10	10
10	10
10	10

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXV

Lectura rotámetro	Temperatura de saturación T_{sat} (°C)	Temperatura de pared T_s (°C)	Temperatura de película T_F (°C)	Densidad del vapor ρ_v (kg/m ³)	Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)
70		4	4	0,07	10
130		4	4	0,07	10
180		4	4	0,07	10
220		4	4	0,07	10

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXVI

Lectura rotámetro	Calor específico en ICCT1 C_{pl} (J/kgK)	Conductividad térmica K_l (W/m.K)	viscosidad dinámica μ_l (Pa.s)	Densidad ρ_l (kg/m ³)	calor latente modificado h_{fg}^* (J/kg)
70	4	0,002	0,00001	2	70
130	4	0,002	0,00001	2	60
180	4	0,002	0,00001	2	60
220	4	0,002	0,00001	2	50

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XXXVII

Lectura rotámetro	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre un tubo horizontal ICCT1 h_{horiz} (W/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor para la condensación sobre 20 tubos ICCT1 $h_{vert,20\ tubos}$ (W/m ² .°C)	coeficiente de transferencia de calor total limpio en ICCT1 U_{C1} (W/m ² .°C)
70	90	20	1
130	90	20	1
180	90	20	1
220	90	20	1

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XXXVIII

Lectura rotámetro	Temperatura promedio de flujo t_w (°C)	Densidad en ICCT2 ρ_{w2} (kg/m ³)	Calor específico C_{pw} (J/kg.K)	Conductividad térmica k_w (W/m.K)	Viscosidad dinámica μ_w (Pa.s)
70	4	0,9	2	0,007	0,00009
130	4	0,9	2	0,007	0,00009
180	4	0,9	2	0,007	0,00009
220	4	0,9	2	0,007	0,00009

Fuente: elaboración propia.

Incerezas tabla XXXIX

Lectura rotámetro	Flujo volumétrico \dot{V}_w (m ³ /s)	Flujo másico \dot{m}_w (kg/s)	Masa velocidad G_{sw} (kg/sm ²)	Numero de Reynolds Re_w (adimensional)	Factor J_{Hw} (adimensional)
70	0,00000003	0,0005	0,04	100	
130	0,00000003	0,0005	0,04	100	
180	0,00000003	0,0005	0,04	100	
220	0,00000003	0,0005	0,04	100	

Fuente: elaboración propia.

Incetezas tabla XL

Lectura rotámetro	Coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza ICCT2 h_{o2} (W/m ² .°C)	Coeficiente de transferencia total limpio en ICCT2 U_{C2} (W/m ² .°C)
70	20	6
130	20	7
180	20	7
220	20	7

Fuente: elaboración propia.

Incetezas tabla XLI

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_1 (W)	Área de transferencia de calor (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	30		2
130	30		2
180	40		2
220	40		2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XLII

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_t	Diferencia de temperatura t (°C)	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT1 U_{D1} (W/m ² .°C)
70				2	6
130				2	8
180				2	9
220				2	10

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XLIII

Lectura rotámetro	Transferencia de calor en ICCT1 Q_2 (W)	Área de transferencia de calor (m ²)	Media logarítmica de la diferencia de temperatura MLDT (°C)
70	30		2
130	40		2
180	40		2
220	40		2

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla XLIV

Lectura rotámetro	R	S	Factor de corrección F_t	Diferencia de temperatura t ($^{\circ}\text{C}$)	coeficiente de transferencia de calor total de diseño en ICCT2 U_{D2} ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)
70				2	5
130				2	5
180				2	6
220				2	6

Fuente: elaboración propia.

Incertezas tabla LI

Lectura rotámetro	R_{d1} ICCT1 ($\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	R_{d2} ICCT2 ($\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
70	0,0005	0,0009
130	0,0003	0,0007
180	0,0003	0,0006
220	0,0003	0,0006

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Imágenes de desarmado del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos**



Equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos



El empaque del ICCT2 (aceite-agua) estaba vencido, lo cual causó la mezcla del agua con el aceite

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 5.



Espejo del ICCT2



Cabezal del ICCT2.



Espejo del ICCT2 y los 20 tubos con deflectores



Interior de la coraza del ICCT2

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 5.



Parte superior del ICCT1



Empaque vencido del ICCT1



Empaque vencido del ICCT1



Cabezal del ICCT1



Espejo con tubos del ICCT1



Espejo con tubos del ICCT1

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 5.



Interior de la coraza del ICCT1



Preparación de plantilla para elaboración de los empaques

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias,
Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Apéndice 6. **Pruebas hidrostáticas de los cabezales del ICCT1 e ICCT2**



Cabezal y espejo del ICCT1



Graduación de la presión hidrostática



Fugas de agua por goteo



Fuga de agua a presión



Raspado de pintura en el área de fuga



Aplicación de resina Epoxy

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 6.



Cabezal del ICCT1 no pasa la prueba hidrostática



Cabezal del ICCT2 pasa la prueba hidrostática, no se observan fugas del lado del cabezal y de los pernos.



Empaque de asbesto grafitado se descompone después de humedecerse

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 6.



Sellado de fuga con Quicksteel (resina de epoxy) No pasa la prueba



Puntos de fuga

Soldadura con aluminio



No pasa la prueba hidrostática

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 6.



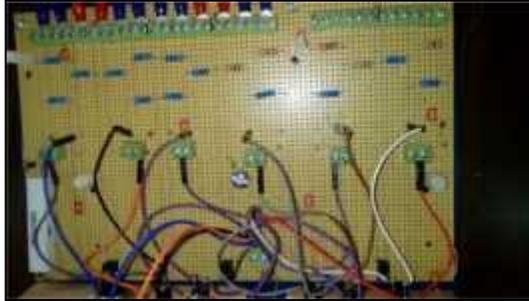
Nuevo cabezal construido para el ICCT1 con nuevo tipo de sello térmico (fibra de asbestos comprimido vulcanizado)



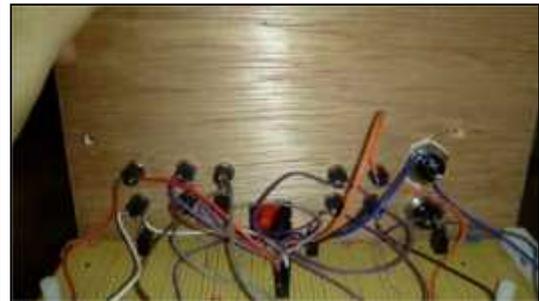
Nuevo cabezal instalado al espejo para la prueba hidrostática, pasa la prueba

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Apéndice 7. **Tablero de control**



Circuito de puentes wheatstone



Interruptores normalmente abiertos



Tablero de control

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Apéndice 8. Hoja de datos del equipo

DATOS INTERCAMBIADOR DE CALOR COBAZA Y TUBOS DE ACERO	
DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Carcasa	—
Fase	1
Diámetro Externo	6 1/2"
Diámetro Interno	6 3/8"
Largo	44"
Ancho	18"
Diámetro de Cabezal	2 1/8"
Bushing	1 1/2"
Diámetro de Salida	4 1/2"
Tubo	20'
Fase	2
Calibre	18BWG
Diámetro Externo	1 1/2"
Diámetro Interno	3/8"
Espesor	1/16"
Ángulo Cuadrado	13 1/2"
Área	0.1078pp ²

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Largo	32' y 33'
Deflectores	
Espaciamiento entre deflectores	12", 10" y 6"
Superficie interna de longitud	0.1300 pie ² /pie
Información Adicional	—
MWP SHELL F.V. TO 60 PSIG	TUBO S 100 PSI
TEMP SHELL 600°F	TUBO S 360°F
MFG 815660	1966

Hoja de datos del equipo

Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Apéndice 9. **Puntos diseñados para la instalación de los RTD**

Sensores RTD 1 y 2 instalados al cabezal del ICCT1.



Sensores RTD 3 y 4 instalados al cabezal del ICCT2, sensor RTD 6 en lado de descarga del agua de circulación de la coraza del ICCT2.



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 9.

Sensor RTD 5 instalado en el punto de entrada del agua fría en la coraza del ICCT2.



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Apéndice 10. Calibración de los sensores RTD

La calibración por caracterización produjo los siguientes valores de resistencia para cada sensor RTD.

Medición de la resistencia de los sensores en los puntos de temperatura indicados

RTD	Punto de ebullición del agua (100 °C) ()	Agua a 0 °C ()	Glicerina en su punto de ebullición (287,5 °C) ()
1	138,6	100	206
2	138,7	100	207
3	138,6	100	207
4	138,8	100	206
5	138,6	100	207
6	138,6	100	206

Fuente: elaboración propia

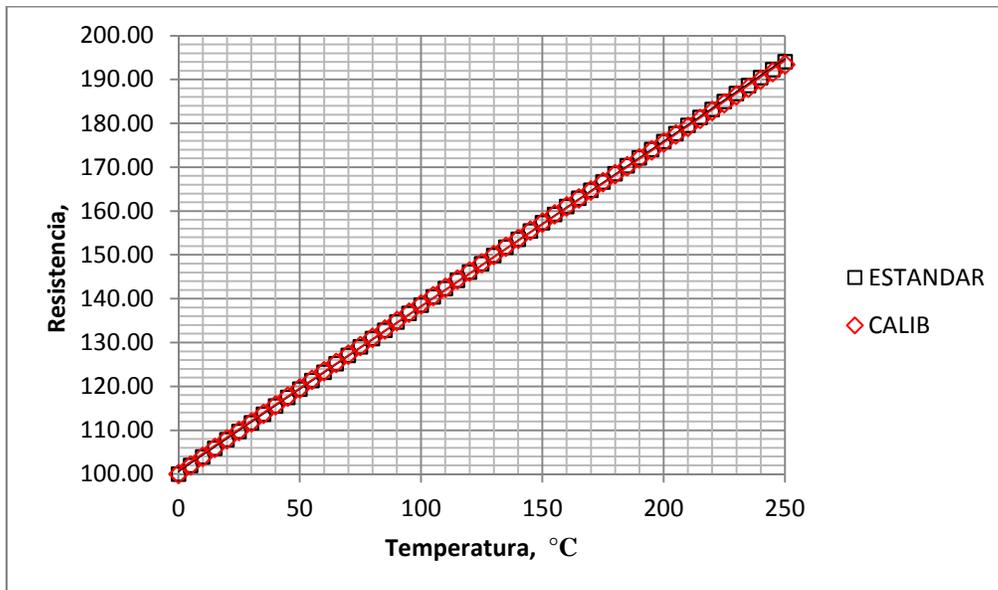
Valores de constantes obtenidos empíricamente para cada RTD

PT100			A	B
1	0,003860	2,391	0,003952	-0,0000009229
2	0,003870	2,043	0,003949	-0,0000007907
3	0,003860	1,910	0,003934	-0,0000007374
4	0,003880	2,654	0,003983	-0,0000001030
5	0,003860	1,910	0,003934	-0,0000007374
6	0,003860	2,391	0,003952	-0,0000009229
Promedio	0,003865	2,217	0,003951	-0,0000008568

Fuente: elaboración propia

Continuación del apéndice 10.

Resistencia en función de temperatura para las curvas de estandarización y la curva elaborada con el RTD calibrado (CALIB).



Fuente: elaboración propia.

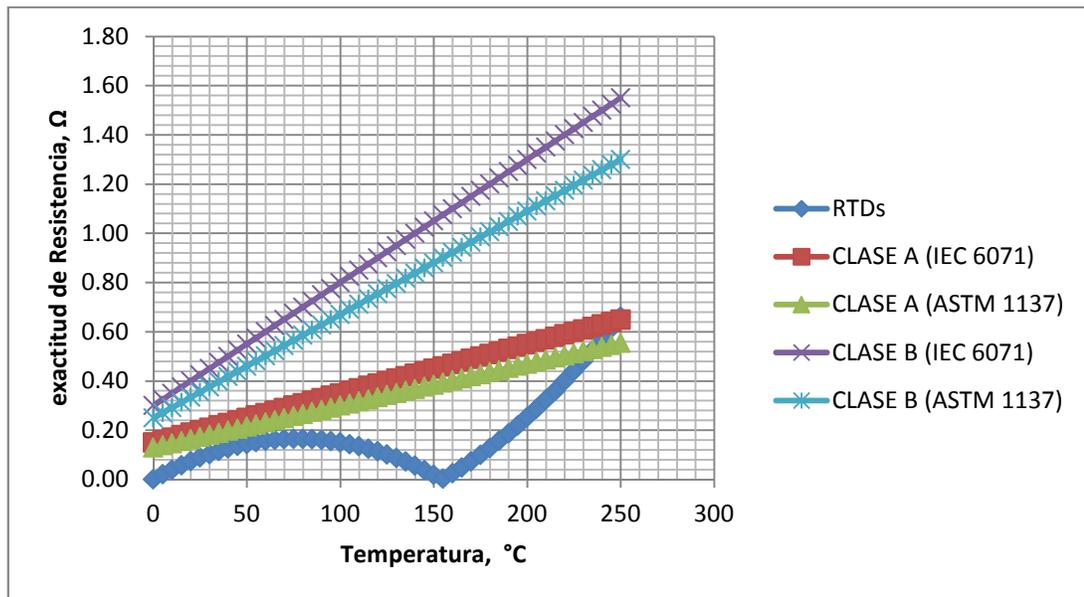
Valor	Ecuación	R ²
Estandar	$y = 0.376x + 100.5$	0.999
RTD Calibrado	$y = 0.373x + 100.8$	0.999

Fuente: elaboración propia

Continuación del apéndice 10.

La clase A (ASTM1137) fue la que mas se adecúa a la exactitud de los RTD calibrados, como se indica en la siguiente figura.

comparación de valores de resistencia en función de temperatura de clases de exactitud y los del RTDs



Fuente: elaboracion propia.

Por medio de la prueba de tolerancia la curva de calibración del RTD cumple con la curva modelo estándar. La clase se determinó con la comparación de exactitud del RTD con respecto de cada ecuación de las clases, valido en el rango de temperatura de 0 a 230 °C:

Clases de exactitud más comunes

	IEC 60751	ASTM 1137
Clase A	$\pm [0,15 + (0,002 \cdot t)] \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm [0,13 + (0,0017 \cdot t)] \text{ } ^\circ\text{C}$
Clase B	$\pm [0,30 + (0,005 \cdot t)] \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm [0,25 + (0,0042 \cdot t)] \text{ } ^\circ\text{C}$

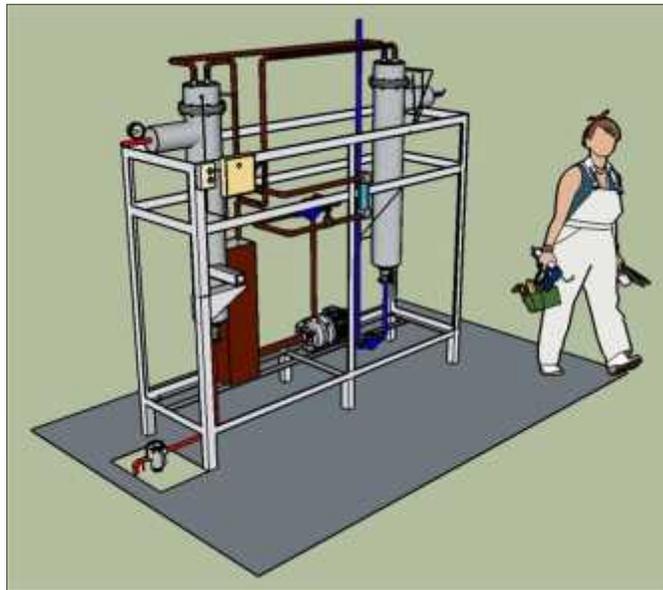
Fuente: FLUKE CALIBRATION. *Cómo calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT).*

<http://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/how-calibrate-rtd-or-pla>.

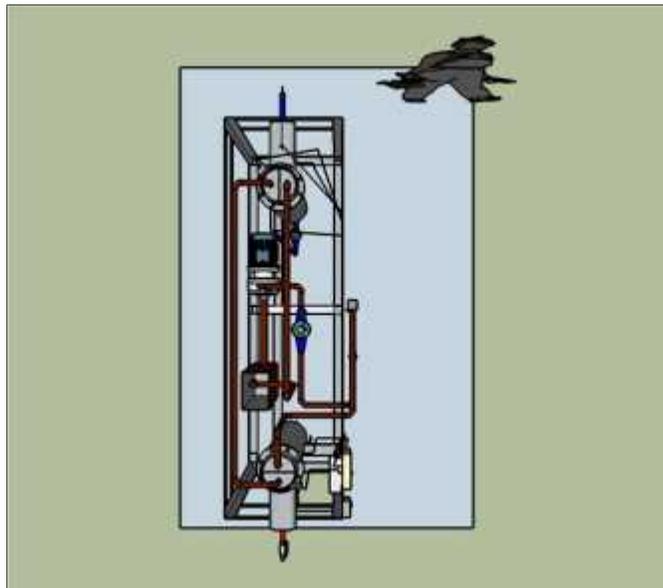
Consulta: 1 de marzo 2016.

Apéndice 11. **Diagrama de equipo elaborado con el programa software de dibujo en 3D SketchUp**

Vista isométrica



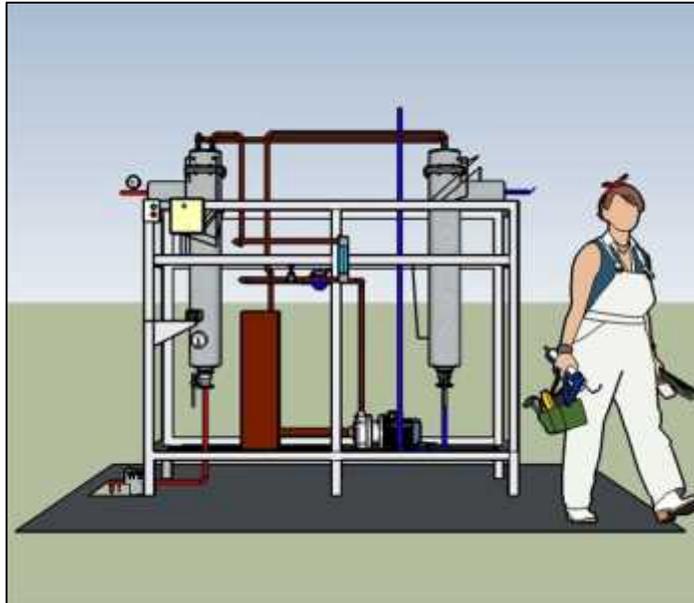
Vista de arriba



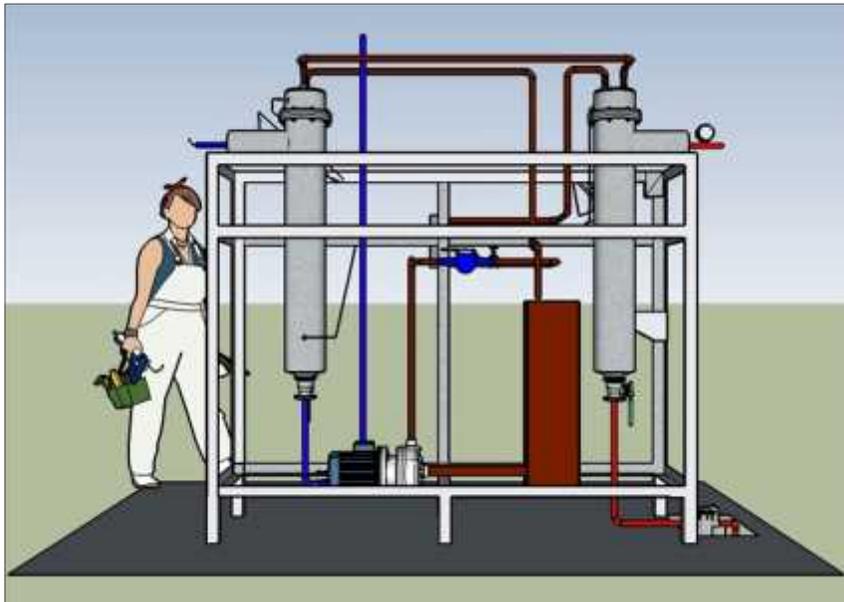
Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 11.

Vista derecha



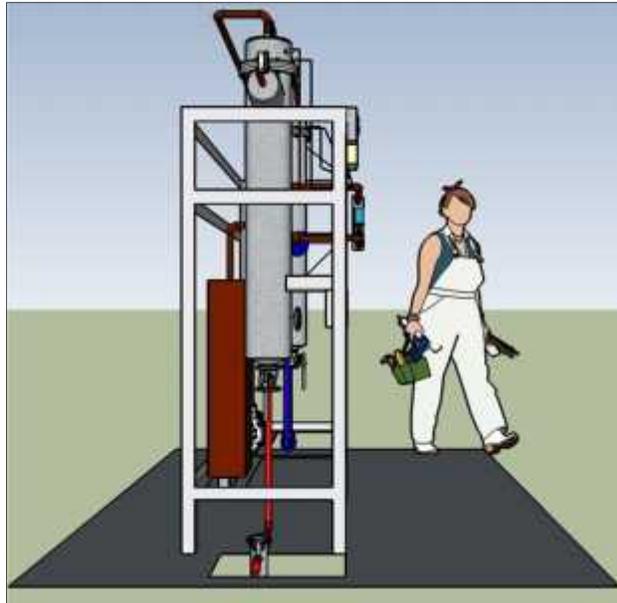
Vista izquierda



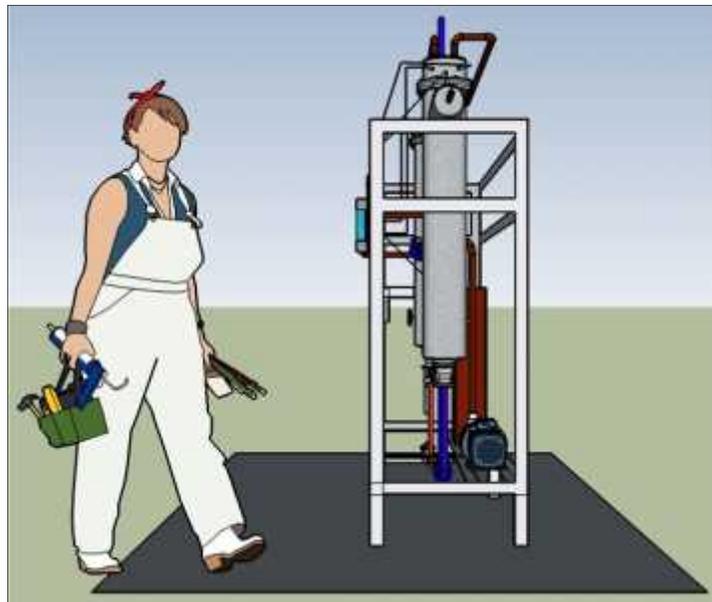
Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 11.

Vista frontal



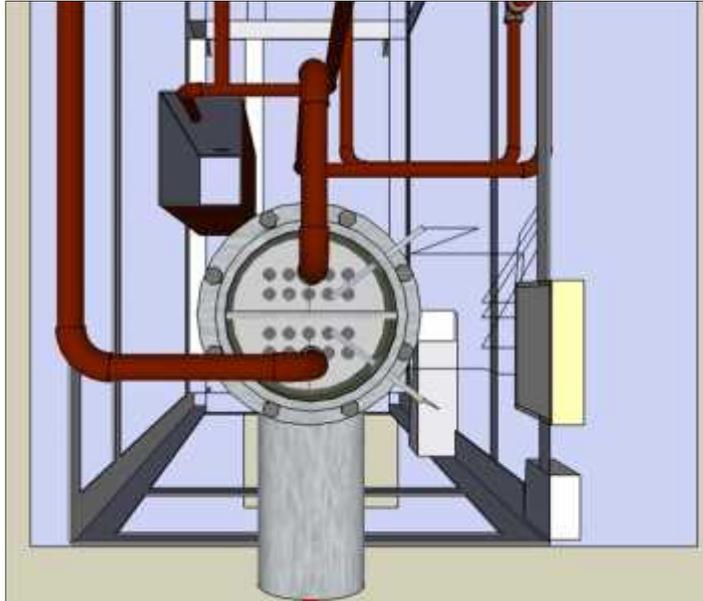
Vista de atrás



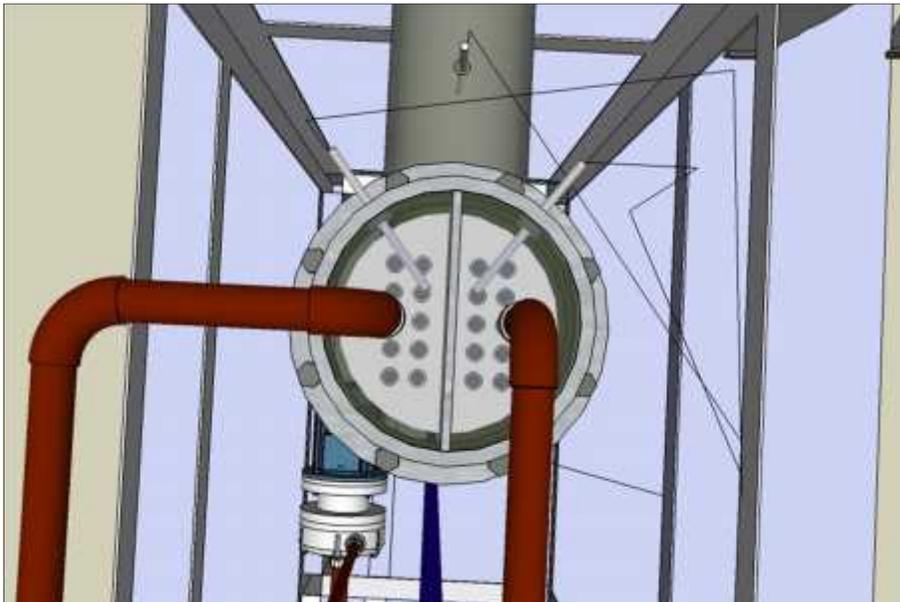
Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 11.

Vista de posición de sensores en el cabezal del ICCT1



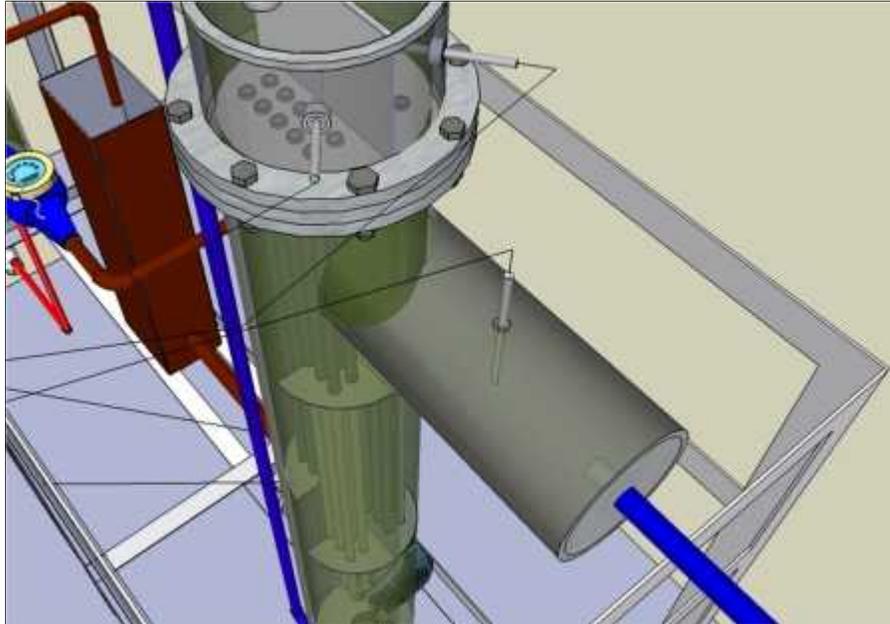
Vista de posición de RTD en el cabezal del ICCT2



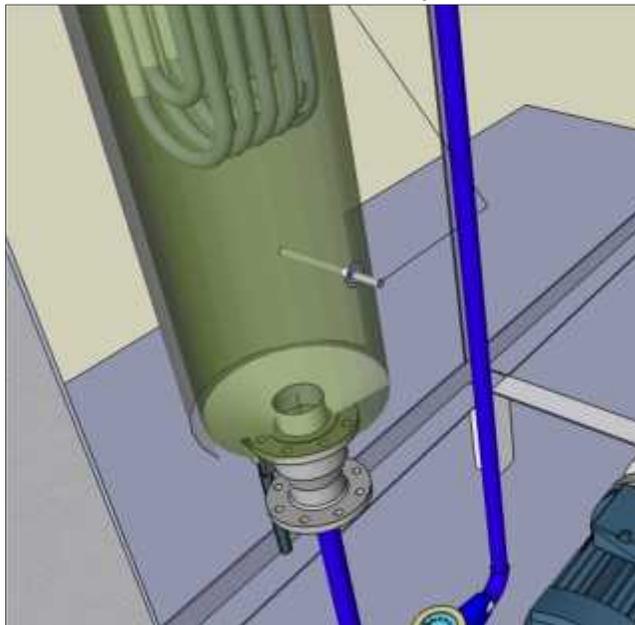
Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 11.

Vista del RTD en ICCT2 para la salida del agua



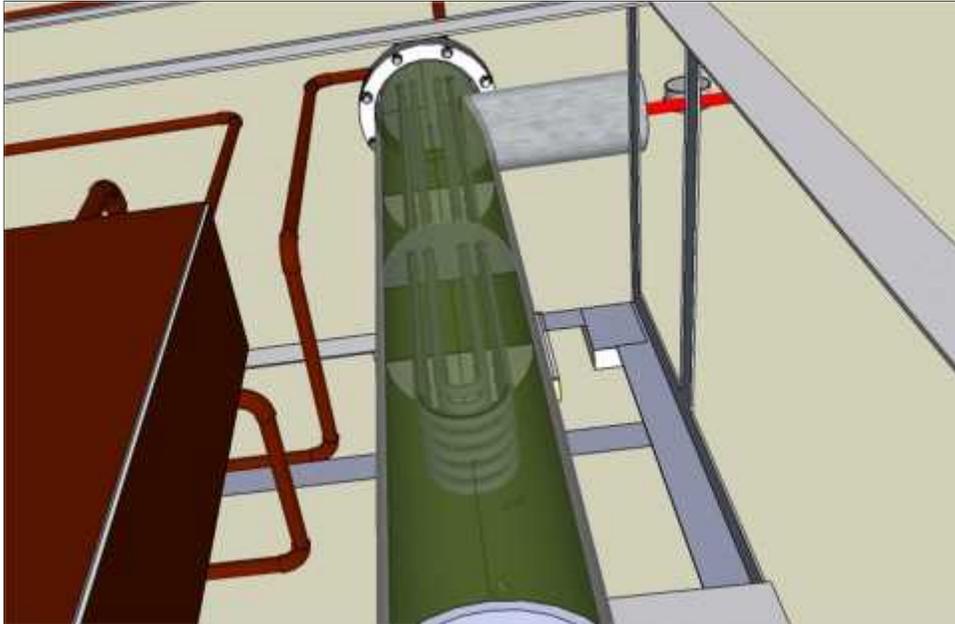
Vista del RTD en la coraza del ICCT2 para la entrada del agua



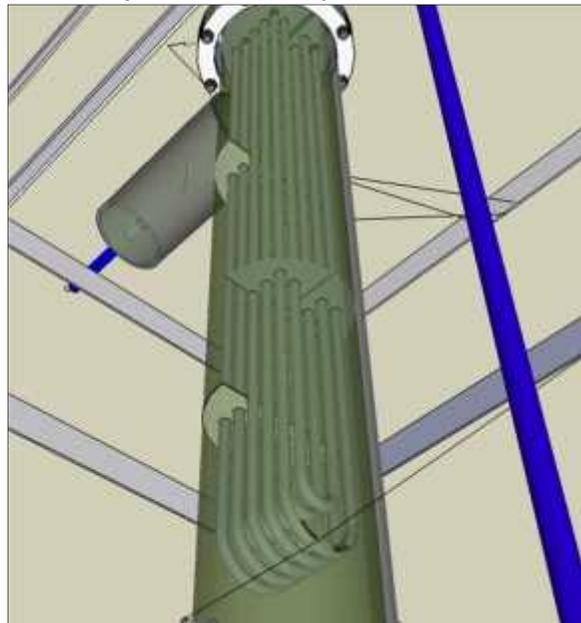
Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Continuación del apéndice 11.

Vista de abajo del ICCT1, posición de tubos en U



Vista de abajo del ICCT2, posición de tubos en U



Fuente: elaboración propia, diseño obtenido del equipo de intercambiadores de calor de coraza y tubos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, USAC.