



# **Diseño y Simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza en el software solidwork.**

**Harold Gonzalo Palacios Reyes  
Jhon Freddy Vargas López**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Villavicencio, Colombia  
2020



# **Diseño y Simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza en el software solidwork.**

**Harold Gonzalo Palacios Reyes  
Jhon Freddy Vargas López**

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

**Ingeniero Electromecánico**

Director:

Ingeniero Alberto Villarraga

Codirector:

Ingeniero Peter Velásquez

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Villavicencio, Colombia

2020



*Dedico mi trabajo a dios todopoderoso, a mi esposa, a mi hijo, a mi madre y a todas y cada una de las personas que me apoyaron, estuvieron presentes y contribuyeron en el camino hacia el cumplimiento de este gran objetivo trazado en mi vida.*

**Harold palacios**

*Primeramente, dedico este trabajo a Dios, ya que es quien me ha permitido culminar con este propósito, a través de su sabiduría, a mi madre y mi padre, quienes han dado su vida por verme bien apoyándome en momentos difíciles, a mi esposa e hijo pilar que me han permitido continuar este camino en busca de poder brindarles un mejor futuro, finalmente a mis hermanos quienes me han dado su apoyo, reconociendo mi compromiso y dedicación a lo largo de este proceso.*

**Jhon Freddy Vargas**



## **Agradecimientos**

Agradecemos a dios por permitirnos conservar nuestra salud y brindarnos Fortaleza y sabiduría, en tantos momentos difíciles durante el proceso de aprendizaje, desarrollo y culminación de nuestras carreras universitarias.

De igual forma agradecer a nuestras familias por su apoyo, dedicación y paciencia, virtudes que contribuyeron a motivar y perseverar durante el transcurso de este proyecto de vida, en especial a nuestras esposas por su entrega total y compromiso en su rol como esposa y madre de nuestros pequeños hijos, durante nuestras ausencias, derivadas de los compromisos académicos y laborales.

A nuestros padres por sus palabras de aliento, motivación y apoyo incondicional.

A nuestros líderes y supervisores de las compañías que laboramos por su apoyo en brindar los espacios y tiempos para cumplir con las responsabilidades académicas.

Al gran claustro educativo por brindarnos la oportunidad de aprender y romper con grandes paradigmas que solo el conocimiento puede lograr.

**Los Autores**



## Resumen

A partir de la bibliografía consultada, se diseña y simula la maquina térmica con la cual se realizará el intercambio de calor entre los fluidos, el cual presenta tipo de flujo paralelo y contracorriente, según las Normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), en donde los fluidos involucrados son: agua (cruda) para la absorción de calor al interior de los tubos y agua a alta temperatura por la coraza, rechazando el calor por convección y conducción, dando lugar a la transferencia de energía (calor) hacia el fluido de menor temperatura, sin entrar en contacto el uno con el otro. Este equipo está destinado a formar parte del Laboratorio de Termodinámica como apoyo didáctico para la Facultad de Ingeniería FIMEB.

**Palabras clave:** Termodinámica, Transferencia de Calor, Mecanismos de transferencia en forma de calor, Procesos de intercambio de energía termica.

## **Abstract**

From the bibliography consulted, a tube and shell heat exchanger is designed and simulated, with one step through the shell and two steps through the tubes, which presents a type of parallel and countercurrent flow, according to TEMA Standards (Tubular Exchanger Manufacturers Association), where the fluids involved are: water (cooler) for the absorption of heat inside the tubes and a carrier heat fluid such as water at high temperature by the shell, rejecting heat by convection and conduction, resulting in the transfer of energy (heat) to the fluid of lower temperature, without coming into contact with each other. This equipment is destined to form part of the Thermodynamics Laboratory as didactic support for the FIMEB Engineering Faculty.

**Keywords: Thermodynamics, Heat transfer, Heat transfer mechanisms, Heat transfer processes.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Termodinámica .....</b>	<b>5</b>
1.1 Clasificación de Sistemas .....	6
1.2 Características de un sistema .....	7
1.3 Densidad y gravedad específica .....	7
1.4 Propiedades fijas y balance .....	8
1.5 Procesos y ciclos .....	10
1.6 Temperatura y ley cero de la termodinámica .....	10
1.7 Presión .....	10
1.8 La primera ley de la termodinámica .....	11
1.9 Calores específicos .....	12
1.10 Segunda ley de la termodinámica .....	13
<b>2 Transferencia de calor .....</b>	<b>14</b>
2.1 Relación con la termodinámica .....	14
2.2 Aplicación e ingeniería .....	15
2.3 Calor y otras formas de energía .....	16
2.4 Mecanismos de transferencia térmica .....	19
2.4.1 Conducción .....	20
2.4.2 Convección .....	22
2.4.3 Radiación .....	24
2.5 Resistencia Térmica .....	26
2.6 Numero de nusselt .....	26
2.7 Esfuerzo cortante .....	27
2.8 Numero de prandlt .....	28
2.9 Flujos laminar y turbulento .....	29
2.9.1 Numero de Reynolds .....	30
2.10 Flujos contracorriente y paralelo .....	31
<b>3 Intercambiadores de calor .....</b>	<b>33</b>
3.1 Tipos de intercambiadores de calor .....	33

3.1.1	Intercambiador de calor de doble tubo .....	33
3.1.2	Intercambiador de calor compacto.....	34
3.1.3	Intercambiador de calor de placas y armazón.....	34
3.1.4	Intercambiador de calor de tubos y coraza.....	35
3.2	El coeficiente total de transferencia de calor .....	36
3.3	Factor de incrustación .....	38
3.4	Análisis de los intercambiadores de calor.....	39
3.5	Método de la diferencia media logarítmica de temperatura .....	41
3.6	Elección de un intercambiador de calor.....	41
3.6.1	Velocidad del intercambio de calor .....	42
3.6.2	Costo.....	42
3.6.3	Costo operación equipo mecánico.....	42
3.6.4	Tamaño y peso.....	43
3.6.5	Tipo.....	43
3.6.6	Materiales .....	43
<b>4</b>	<b>Cálculos de diseño y operación de un intercambiador de tubos y coraza de</b>	
<b>Flujo 1:2 contracorriente-paralelo .....</b>	<b>45</b>	
4.1	Diseño.....	45
4.1.1	Tubos para intercambiadores de calor .....	46
4.1.2	Espaciado de los tubos .....	47
4.1.3	Coraza .....	47
4.1.4	Deflectores.....	47
4.1.5	Intercambiador 1-2 con cabezal de tubos fijo.....	49
4.2	Cálculos térmicos y mecánicos del diseño .....	49
4.2.1	Parámetros y Variables de proceso.....	50
4.2.2	Balace de Calor .....	52
4.2.3	Diferencia de T° (°F) verdadera At.....	53
4.2.4	Temperatura Calórica (°F).....	54
4.2.5	Área transversal de flujo.....	55
4.2.6	Masa – Velocidad .....	56
4.2.7	Diámetro Equivalente (De y de) únicamente Lado Coraza.....	57
4.2.8	Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura calórica Tc y tc.....	58
4.2.9	Calculo Numero de Reynolds.....	59
4.2.10	Factor de Transferencia ( $jH$ ) .....	60
4.2.11	Numero de Prandtl .....	61
4.2.12	Coeficiente transferencia de calor.....	62
4.2.13	Temperatura de la pared del tubo ( $tw$ ).....	62
4.2.14	Coeficiente Total $Uc$ .....	63
4.2.15	Coeficiente Total de Diseño $UD$ .....	63
4.2.16	Factor de Obstrucción Rd .....	64
4.2.17	Cálculo factor de fricción ( $f$ ) .....	65
4.2.18	Calculo Caída de presión ( $\Delta P$ ).....	66
4.3	Software de Simulación- Solidwork.....	68
4.3.1	Croquizado de las piezas del intercambiador de calor.....	69
4.3.2	Ensamble de las piezas .....	80
4.3.3	Simulación del modelo (Flow Simulation).....	82
4.3.4	Costos operacionales.....	90
<b>5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>93</b>

---

5.1	Conclusiones .....	93
5.2	Recomendaciones.....	93
<b>A.</b>	<b>Anexo: Dimensiones de tubería de acero (IPS).....</b>	<b>95</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Disposición de los espejos de tubo (cuenta de tubos) arreglo triangular.....</b>	<b>96</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Datos de tubos para condensadores e intercambiadores de calor.....</b>	<b>97</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Factores de corrección MLDT para intercambiadores 1-2.....</b>	<b>98</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo: Viscosidades de líquidos para usarse como coordenadas con el anexo</b>	<b>F. 99</b>
<b>F.</b>	<b>Anexo: Viscosidad de líquidos .....</b>	<b>100</b>
<b>G.</b>	<b>Anexo: Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25% .....</b>	<b>101</b>
<b>H.</b>	<b>Anexo: Curva de transferencia de calor, agua en los tubos.....</b>	<b>102</b>
<b>I.</b>	<b>Anexo: Conductividades térmicos de líquidos. ....</b>	<b>103</b>
<b>J.</b>	<b>Anexo: Factores de fricción lado de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%.....</b>	<b>104</b>
<b>K.</b>	<b>Anexo: Factores de fricción, para lado tubo.....</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>107</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Análisis Termodinámico .....	5
<b>Figura 1-2:</b> Sistema, alrededores y frontera.....	6
<b>Figura 1-3:</b> Masa de control.....	6
<b>Figura 1-4:</b> Volumen de control. ....	7
<b>Figura 1-5:</b> Gravedad específica a 0°C .....	8
<b>Figura 1-6:</b> Estados diferentes. ....	9
<b>Figura 1-7:</b> Equilibrio térmico.....	9
<b>Figura 1-8:</b> Esfuerzo normal .....	11
<b>Figura 1-9:</b> Conservación de la energía.....	12
<b>Figura 1-10:</b> El calor específico .....	12
<b>Figura 1-11:</b> Cp a volumen y presión constantes .....	13
<b>Figura 2-1:</b> Dirección flujo de calor.....	14
<b>Figura 2-2:</b> Energía térmica $u$ .....	17
<b>Figura 2-3:</b> Entalpía $h$ . ....	18
<b>Figura 2-4:</b> Fuerza de calor. ....	18
<b>Figura 2-5:</b> Flujo de calor.....	19
<b>Figura 2-6:</b> Conducción de calor por fases. ....	20
<b>Figura 2-7:</b> Conducción en una pared.....	21
<b>Figura 2-8:</b> Convección natural y Forzada. ....	23
<b>Figura 2-9:</b> Radiación de un cuerpo negro.....	25
<b>Figura 2-10:</b> Calor absorbido y reflejado. ....	25
<b>Figura 2-11:</b> Restricción térmica vs eléctrica. ....	26
<b>Figura 2-12:</b> Número nusselt .....	27
<b>Figura 2-13:</b> Flujos laminar, de transición y turbulento. ....	30
<b>Figura 2-14:</b> Flujo a contracorriente. ....	31
<b>Figura 2-15:</b> Flujo paralelo. ....	31
<b>Figura 3-1:</b> Régimen de flujo. ....	34
<b>Figura 3-2:</b> I.C. compacto, gas-líquido. ....	34
<b>Figura 3-3:</b> I.C. placas y armazón, líquido-líquido.....	35
<b>Figura 3-4:</b> I.C. tubos y coraza 1-2.....	36
<b>Figura 3-5:</b> Red de restricciones térmicas.....	36
<b>Figura 3-6:</b> Zonas de transferencia I.C.....	37
<b>Figura 4-1:</b> Tubo rolado .....	45

<b>Figura 4-2:</b>	Arreglos de los tubos de I.C.....	46
<b>Figura 4-3:</b>	Espaciado de los tubos .....	47
<b>Figura 4-4:</b>	Espaciado de deflector (aumentado).....	48
<b>Figura 4-5:</b>	Deflector segmentado .....	48
<b>Figura 4-6:</b>	Intercambiador 1-2 de cabezal fijo.....	49
<b>Figura 4-7:</b>	Croquis tubo de la carcaza .....	71
<b>Figura 4-8:</b>	Acción saliente extrusión tubería.....	71
<b>Figura 4-9:</b>	Construcción de bridas .....	72
<b>Figura 4-10:</b>	Orificios de la brida 16".....	72
<b>Figura 4-11:</b>	Niple conexión 3".....	73
<b>Figura 4-12:</b>	Extrusión saliente Brida de 3".....	73
<b>Figura 4-13:</b>	Brida de 3" terminada.....	73
<b>Figura 4-14:</b>	Diseño terminado coraza 16".....	74
<b>Figura 4-15:</b>	Croquis cabezal fijo cerrado .....	74
<b>Figura 4-16:</b>	Cap del cabezal fijo.....	75
<b>Figura 4-17:</b>	Conexión bridada 16" cabezal fijo .....	75
<b>Figura 4-18:</b>	Croquis cabezal con facilidades entrada y salida. ....	76
<b>Figura 4-19:</b>	Boquillas de entrada y salida de fluido en cabezal. ....	76
<b>Figura 4-20:</b>	Cabezal terminado con lamina divisoria. ....	76
<b>Figura 4-21:</b>	Croquizado geometría referencia tubos y deflectores. ....	77
<b>Figura 4-22:</b>	Croquizado tubo de ¾".....	77
<b>Figura 4-23:</b>	Matriz lineal y de simetría tubos internos. ....	78
<b>Figura 4-24:</b>	Tubos internos intercambiador. ....	78
<b>Figura 4-25:</b>	Tubos terminados.....	78
<b>Figura 4-26:</b>	Baffle deflector sello.....	79
<b>Figura 4-27:</b>	Croquis deflector segmentado .....	79
<b>Figura 4-28:</b>	Saliente extrusión deflector segmentado .....	80
<b>Figura 4-29:</b>	Deflector segmentado 25% terminado .....	80
<b>Figura 4-30:</b>	Componentes agregados y ensamblándose.....	81
<b>Figura 4-31:</b>	Distanciamiento de los deflectores segmentados 25%.....	81
<b>Figura 4-32:</b>	Ensamble del equipo completo.....	81
<b>Figura 4-33:</b>	Configuración Sistema de Medidas.....	82
<b>Figura 4-34:</b>	Configuración tipo de análisis.....	83
<b>Figura 4-35:</b>	Configuración de fluidos y tipo de flujo.....	83
<b>Figura 4-36:</b>	Configuración condición adiabática .....	84
<b>Figura 4-37:</b>	Volumen de control definido .....	84
<b>Figura 4-38:</b>	Volumen seleccionado para los tubos.....	85
<b>Figura 4-39:</b>	Volumen de flujo seleccionado para la Coraza .....	85
<b>Figura 4-40:</b>	Vista de sección Intercambiador y selección de material carcaza y cabezales fijos. 86	
<b>Figura 4-41:</b>	Asignación de material tubos internos.....	86
<b>Figura 4-42:</b>	Condiciones de frontera Agua fría .....	87
<b>Figura 4-43:</b>	Condiciones de frontera Agua destilada.....	87
<b>Figura 4-44:</b>	Salida fluido carcasa a presión atmosférica .....	87

---

<b>Figura 4-45:</b>	Variables calculables por el simulador .....	88
<b>Figura 4-46:</b>	Inicio de la simulación .....	88
<b>Figura 4-47:</b>	Malla del modelo para simulación .....	89
<b>Figura 4-48:</b>	Trayectorias comportamiento de presión (2 segundos).....	89
<b>Figura 4-49:</b>	Trayectorias comportamiento de presión (2 segundos).....	90
<b>Figura 4-50:</b>	Costos operacionales.....	91

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Formas de estudio de un proceso de ingeniería.....	16
<b>Tabla 2-2:</b> Conductividad de materiales. ....	22
<b>Tabla 2-3:</b> Valor prandtl fluidos. ....	29
<b>Tabla 4-1:</b> Variables de entrada y salida del intercambiador .....	50
<b>Tabla 4-2:</b> Relación de subíndices.....	50
<b>Tabla 4-3:</b> Parámetros de diseño coraza.....	51
<b>Tabla 4-4:</b> Lado de los tubos (Agua Fría).....	51
<b>Tabla 4-5:</b> Espaciados más comunes tubos (PT).....	52
<b>Tabla 4-6:</b> Balance de Calor de la coraza .....	53
<b>Tabla 4-7:</b> Balance de Calor de los tubos.....	53
<b>Tabla 4-8:</b> Diferencia de T° media logarítmica. ....	54
<b>Tabla 4-9:</b> Diferencia de T° (°F) verdadera At. ....	54
<b>Tabla 4-10:</b> Temperatura Calórica (°F) de la coraza .....	55
<b>Tabla 4-11:</b> Temperatura Calórica (°F) de los tubos .....	55
<b>Tabla 4-12:</b> Área transversal de flujo de la coraza .....	55
<b>Tabla 4-13:</b> Área transversal de flujo de los tubos.....	56
<b>Tabla 4-14:</b> Masa – Velocidad de la coraza.....	56
<b>Tabla 4-15:</b> Masa – Velocidad de los tubos.....	56
<b>Tabla 4-16:</b> Velocidad flujo .....	57
<b>Tabla 4-17:</b> Diámetro Equivalente (de) .....	57
<b>Tabla 4-18:</b> Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura promedio Tc.....	58
<b>Tabla 4-19:</b> Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura promedio tc .....	59
<b>Tabla 4-20:</b> Calculo Numero de Reynolds de la coraza .....	59
<b>Tabla 4-21:</b> Calculo Numero de Reynolds de los tubos .....	60
<b>Tabla 4-22:</b> Factor de Transferencia de la coraza ( <b>jH</b> ).....	60
<b>Tabla 4-23:</b> Coeficiente Transferencia de calor, agua en los tubos .....	61
<b>Tabla 4-24:</b> Numero de Prandtl de la coraza .....	61
<b>Tabla 4-25:</b> Coeficiente transferencia de calor de la coraza. ....	62
<b>Tabla 4-26:</b> Coeficiente Total Uc.....	63
<b>Tabla 4-27:</b> Área Transferencia (A).....	64
<b>Tabla 4-28:</b> Coeficiente total de diseño.....	64
<b>Tabla 4-29:</b> Factor de Obstrucción Rd .....	65
<b>Tabla 4-30:</b> Calculo factor de fricción (f) de la coraza .....	65



# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>A</i>	Área intercambio térmico	Pies	
<i>A</i>	Superficie de flujo	Pies <sup>2</sup>	
<i>a''</i>	Área externa	$\frac{Pie^2}{Pie}$	
<i>B</i>	Espaciado de los deflectores	Plg	
<i>C</i>	Calor específico	Btu/(lb)(°F)	
<i>C'</i>	Sección libre entre tubos	Plg	
<i>f</i>	Factor de fricción	$\frac{Pie^2}{Plg^2}$	
<i>G</i>	Masa velocidad	$\frac{lb}{h * pie^2}$	
<i>g'</i>	Aceleración de la gravedad	$\frac{Pie}{Seg^2}$	
<i>L</i>	Longitud de tubo	Plg	
<i>Q</i>	Flujo de calor	$\frac{Btu}{h}$	
<i>S</i>	Grupo temperatura $(\frac{t^2-t_1}{T_1-t_1})$	adimensional	
<i>V</i>	Velocidad	$\frac{Pie}{Seg}$	
<i>W</i>	Flujo másico alta T°	$\frac{lb}{h}$	
<i>w</i>	Flujo másico baja T°	$\frac{lb}{h}$	

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\kappa$	Conductividad térmica	$\frac{Btu}{(h) * (Pie^2) * (\frac{°F}{Pie})}$	

X Diseño y Simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza en el  
 X software solidwork.

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\Delta P_T, \Delta P_t, \Delta P$	Caídas totales de presión, lado de los tubos, respectivamente	$\frac{lb}{Pug^2}$	
$\Delta tc, \Delta th$	Diferencia térmica en las partes frías y calientes	$^{\circ}F$	
$v$	Volumen específico	$\frac{Pie^3}{lb}$	
$\phi$	Razón de viscosidad	$\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right) \wedge 0.14$	
$\mu$	Viscosidad	$\frac{pie * h}{lb}$	
$\rho$	Densidad	$\frac{lb}{pie^3}$	

## Subíndices

Subíndice	Término	Unidad
$d_o$	Diámetro Externo de los tubos	Plg
$D_e$	Diámetro Equivalente	Pies
$D_s$	Diámetro Interior shell	Plg
$F_T$	Factor de diferencia de temperatura	Adimensional
$h, h_i, h_o$	Coefficiente de transferencia de calor, interno y externo.	$\frac{Btu}{h * Pie^2 * ^{\circ}F}$
$P_T$	Espaciado de los tubos	Plg
$R_d, R_i, R_o$	Factor de obstrucción, combinados, interior y exterior respectivamente	$\frac{h * Pie^2 * ^{\circ}F}{Btu}$
$Re, Re'$	Numero de Reynolds	Adimensional
$T, T_1, T_2$	Temperatura alta, entrada y salida.	$^{\circ}F$
$T_c$	Temperatura calórica-alta	$^{\circ}F$

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad</b>
$t, t_1, t_2$	Temperatura baja, entrada y salida.	°F
$t_c$	Temperatura calórica-baja.	°F
$U, U_C, U_D$	Coeficiente total de transferencia de calor, coeficiente limpio, coeficiente de diseño	$\frac{Btu}{h * Pie^2 * °F}$
$D_I$	Diámetro Interno de los tubos	Plg
$A_t$	Diferencia verdadera de temperatura	°F

## Superíndices

<b>Superíndice</b>	<b>Término</b>
n	Exponente, potencia

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
MLDT	Media logarítmica de la diferencia de temperatura
N	Cantidad deflectores Shell
Nt	Cantidad de tubos
n	Cantidad de pasos- tubos



# Introducción

El estudio de la transferencia de calor está relacionado con la rapidez que esta pasa de un cuerpo caliente a uno frío. Se usa la misma cantidad de energía para cuando se pasa de un estado de equilibrio a otro.

Uno de los equipos encargados de realizar este proceso es el intercambiador de calor, los intercambiadores de calor de tubos y coraza generalmente son los más utilizados debido a que su diseño es muy mejorado, permitiendo un margen de error muy mínimo, por esta razón se empleó en este proyecto literatura soportada en estándares internacionales que nos den una base técnica a la hora del diseño.

El planteamiento de este trabajo surge de la creciente demanda por el uso de energía renovables como la solar térmica, la cual involucra en sus procesos energía limpia, el uso de intercambiadores de calor para el aprovechamiento de rayos del sol en la generación de energía eléctrica y además la comprensión de los intercambios de energía que se producen al interior de estos equipos que prácticamente son de extensa aplicación en la industria tradicional, actual y futura.

El intercambiador de calor es un equipo que cuenta con unas características que lo llevan a ser una maquina térmica de alto desempeño en cuanto al funcionamiento y aprovechamiento térmico, además de esto cuenta con una gran capacidad de transferencia de calor que permite un mayor rendimiento, que a su vez se ve reflejado en ahorro de energía.

El diseño y la simulación aportan una amplia formación de aprendizaje teórico; ya que es muy común que un ingeniero electromecánico se vea familiarizado con el funcionamiento de estos equipos de amplio uso en la industria.

Estamos convencidos del gran campo de investigación y aplicación en esta área, y de su impacto positivo en las competencias de los estudiantes de la universidad, contribuyendo al mejoramiento del saber durante su proceso de formación y aplicación en su vida profesional.

Nuestros objetivos son Diseñar y simular las respectivas pruebas a través de un software de diseño y simulación de fluidos. Comprender desde la investigación las variables a controlar y las normas internacionales TEMA involucradas, a través de la simulación en solidwork, realizando los cálculos teóricos de acuerdo a la literatura consultada, con el fin de determinar la viabilidad del diseño.

Para realizar el proyecto se tiene planeado la consulta de bibliografía referente a termodinámica, transferencia de calor y diseño y construcción de estos equipos, con el fin de escoger la forma, diseño, medidas y cálculos de las variables involucradas durante el proceso térmico. Una vez escogido el tipo forma y parámetros del equipo se proseguirá con la realización del diseño en el simulador comparándolos con los realizados teóricamente y se analizarán los datos.

Una de las obras referentes será la de “Procesos de transferencia de calor” autor; Donald Q. Kern. En el cual se encuentra información relevante para alcanzar el objetivo de este trabajo de grado, además, como ya se mencionó anteriormente el diseño tomará como referencia consideraciones de las normas que regulan y estandarizan la construcción de estos equipos: América Society of Mechanical Engineer (ASME) y “Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association” (TEMA) las cuales son complementarias.

Finalizado el trabajo obtendremos Planos del Diseño con sus dimensiones del intercambiador de calor de tubos y coraza, a su vez, la simulación del Intercambiador de Calor diseñado en el software solidwork, con los cálculos de operación los cuales permitirán el respectivo análisis de viabilidad constructiva.

Adquiriremos conocimiento y experiencia durante la etapa de investigación y el proceso de diseño y simulación del intercambiador de calor por medio del software.

---

Este es un proyecto de ayuda educativa y de diseño de equipos que tiene por finalidad brindar herramientas para la docencia, para beneficiar estudiantes de la facultad de ingeniería y tecnología afines a la industria, quienes dentro del pensum académico generalmente requieren conocimiento en áreas de la termodinámica.

Con este trabajo de grado esta población de la universidad podrá comparar y visualizar en el software cálculos teóricos y cambio de variables de los fluidos involucrados con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema, además, con la adquisición de datos podrán realizar análisis, que les va a permitir acercarse al máximo a un proceso real.



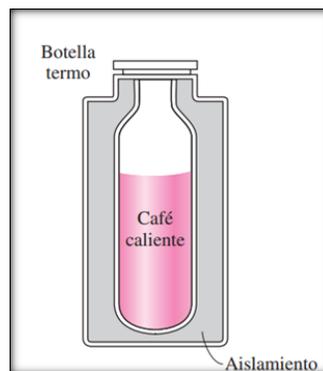
# 1 Termodinámica

Todas las ciencias tienen un lenguaje único que les permite formar una base sólida para el desarrollo científico garantizando que no se presenten posibles malentendidos por esta razón este capítulo inicia hablando de la termodinámica.

La termodinámica puede definirse como una ciencia que estudia la cantidad de transferencia de energía (calor) sin tener en cuenta el tiempo que toma hacer el cambio, además nos permite cuantificar energía a medida que una sustancia cambia su estado de equilibrio a otro sin embargo desconoce el tiempo que llevara.

(Cengel & Ghajar, 2011), Afirma que “A través de un análisis termodinámico podemos calcular la cantidad de energía transferida desde un termo con café caliente en su interior hacia el medio ambiente con condiciones de temperatura más baja “. (p.2)

**Figura 1-1:** Análisis Termodinámico

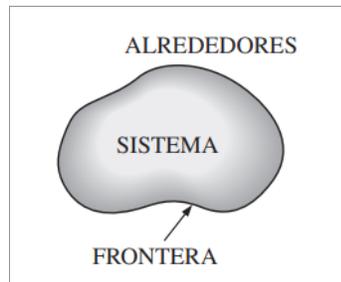


Nombre de la Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

## 1.1 Clasificación de Sistemas

Según el Autor (Cengel & Boles, 2011), “Un sistema es una cantidad determinada o una zona en el espacio delimitada con el propósito de estudio termodinámico. La materia o espacio exterior del sistema se denomina alrededores. El área física o virtual que delimita al sistema de sus alrededores se llama frontera. La frontera tiene la capacidad de ser estática o dinámica. Para cálculos matemáticos, la frontera tiene valor cero, por consiguiente, no puede almacenar masa ni acumular un volumen en el espacio”. (p.10)

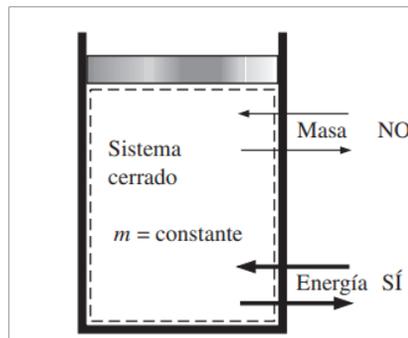
**Figura 1-2:** Sistema, alrededores y frontera.



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

Un sistema se puede considerar de dos formas, cerrados, que significa que su masa es fija (masa de control) y abierto, que significa que su volumen es fijo (volumen de control), en el primero de ellos la masa no sale de la frontera mientras que en el segundo sí.

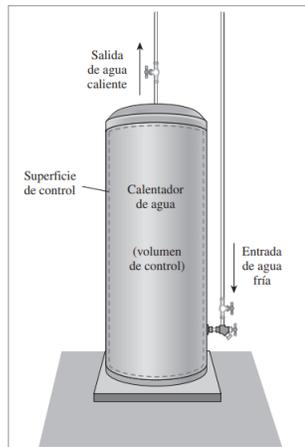
**Figura 1-3:** Masa de control



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

(Cengel & Boles, 2011) “En la Figura 1-4 tenemos una demostración de un sistema abierto, piense que se desea cuantificar el calor a transferir hacia el fluido en el interior del cilindro con el objetivo de suministrar un caudal estacionario del fluido a alta temperatura. Debido a que el fluido caliente será sustituido por un fluido más frío, no es adecuado interpretarlo como una masa de control para el estudio. Por el contrario, se toma en cuenta el volumen interno y se estiman los flujos caliente y frío como materia que cruza al volumen de control”. (p.11)

**Figura 1-4:** Volumen de control.



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.2 Características de un sistema

Es cualquier propiedad relacionada con los fluidos del sistema, las más comunes son: Presión, temperatura, volumen, viscosidad, masa, densidad, etc. Algunas dependen de la masa y otras no, llamadas extensivas e intensivas respectivamente.

Según (Cengel & Boles, 2011), “Es común identificar con mayúsculas las propiedades extensivas (excepto la masa  $m$ ) y las intensivas con minúsculas (excepto la presión  $P$  y la temperatura  $T$ )”. (p.12).

## 1.3 Densidad y gravedad específica

La densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. (ver ecuación (1.1)).

$$\text{Densidad: } \rho = \frac{m}{V} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (1.1)$$

(Cengel & Boles, 2011) “La densidad de una sustancia se afecta al estar expuesta a una variación de temperatura y al ser sometida a fuerzas (presión). En la mayoría de los gases es directamente proporcional a la presión e inversa a la temperatura. En los líquidos y sólidos idealizados como incompresibles, su valor de densidad no sufre alteración por la presión y generalmente estos cambios se consideran como despreciables. En ocasiones la densidad de una sustancia es relativa a la densidad de una sustancia estándar. En este caso, se llama gravedad específica, o densidad relativa. (normalmente el fluido estándar es agua a 4 °C, para la que  $\rho_{H2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ”. (p.13) (ver ecuación (1.2)).

$$\text{Densidad relativa: DR} = \frac{\rho}{\rho_{H2O}} \quad (1.2)$$

**Figura 1-5:** Gravedad específica a 0°C

Densidades relativas de algunas sustancias a 0 °C	
Sustancia	DR
Agua	1.0
Sangre	1.05
Agua de mar	1.025
Gasolina	0.7
Alcohol etílico	0.79
Mercurio	13.6
Madera	0.3-0.9
Oro	19.2
Huesos	1.7-2.0
Hielo	0.92
Aire (a 1 atm)	0.0013

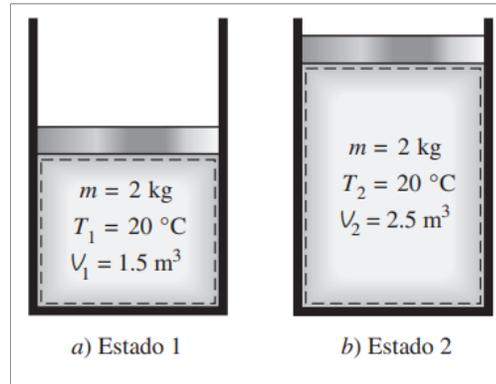
Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.4 Propiedades fijas y balance

Basados en: (Cengel & Boles, 2011), “Para determinar que el sistema se encuentra en equilibrio no debe sufrir cambios: de acuerdo a lo anterior, todas las variables son medibles y pueden calcularse en el sistema, esto nos indica las características que especifican la

condición, o el estado, del sistema. En un estado particular, todas las características mantienen valores fijos, y si varía la cantidad de una de ellas, el estado pasa a otro diferente. En la Figura 1-6 se ilustra un ejemplo de dos estados distintos". (p. 14).

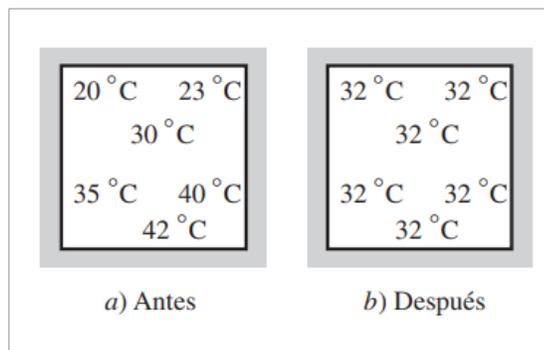
**Figura 1-6:** Estados diferentes.



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

La termodinámica se relaciona con estados de equilibrio. La palabra equilibrio se refiere al momento en que las propiedades se igualan y no modifican el estado de un sistema. Hay muchos tipos de equilibrio, se dice que el sistema no está en equilibrio térmico (Figura 1-7) a menos que se cumplan las condiciones de igual valor de temperatura en los dos fluidos.

**Figura 1-7:** Equilibrio térmico.



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.5 Procesos y ciclos

Cuando hablamos de procesos se hace referencia a cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro estado de equilibrio, el tipo de equilibrio que utilizamos en termodinámica es un **Proceso Cuasiequilibrio** o **Proceso Cuasiestático**, significa que el sistema mantiene casi balanceado por tiempos prolongados. Es decir, es tan lento que las propiedades cambian a la misma velocidad en todas las partes del sistema.

Cuando en un proceso una propiedad permanece constante se le llama:

**Proceso Isobárico:** Proceso a presión constante

**Proceso Isotérmico:** Proceso a Temperatura constante

**Proceso Isocórico:** Proceso a Volumen constante

(Cengel & Boles, 2011) "Hablamos que un sistema ha realizado un ciclo cuando vuelve a su condición inicial al culminar un proceso, esto quiere decir, en cuanto al análisis del ciclo que el estado inicial y final manifiestan las mismas características" (p.16).

## 1.6 Temperatura y ley cero de la termodinámica

Al referirnos a la temperatura es común relacionarla con la sensación de Frio y Caliente, aunque esto no define el concepto de forma clara.

(Cengel & Boles, 2011), "Nos indican que: la ley cero o la ley de equilibrio térmico de la termodinámica decreta que, si juntamos dos cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas, estos intercambiarán calor hasta que sus temperaturas se igualen y alcancen el equilibrio térmico y que, a su vez, si un tercer cuerpo en contacto o no, con los dos cuerpos anteriores tiene el mismo valor de temperatura, también estará en equilibrio térmico con ellos". (p.17)

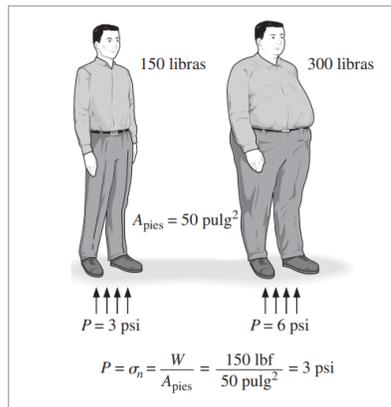
## 1.7 Presión

Para los Autores (Cengel & Boles, 2011), "Presión se conoce como la fuerza perpendicular o normal que realiza un fluido por unidad de área. Esta propiedad se presenta únicamente cuando se habla de gases o líquidos, en tanto que, cuando se refiere a los sólidos se le

conoce como esfuerzo normal. Las unidades de magnitud utilizadas son; newton por metro cuadrado (N/m<sup>2</sup>), o, pascal (Pa) y libras fuerza por pulgada cuadrada (Lbf/in<sup>2</sup>) conocida como psi ". (p.21). (ver ecuación (1.3)).

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{N}{m^2} \tag{1.3}$$

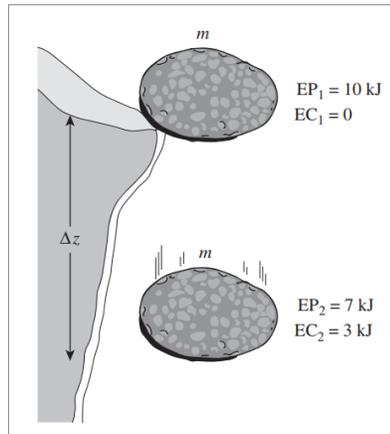
**Figura 1-8:** Esfuerzo normal



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.8 La primera ley de la termodinámica

También llamada, Principio de conservación de la energía, (Cengel & Boles, 2011), “Establece las bases fundamentales para el análisis de las interacciones entre las diferentes formas de manifestación de la energía. Partiendo de pruebas y ensayos experimentales, asegura que la energía utilizada durante un proceso no se pierde ni se destruye, sólo se transforma. Por esta razón, cada valor de energía deberá ser justificado al final del proceso”. (p.70)

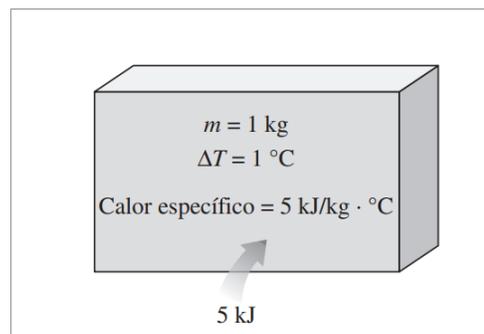
**Figura 1-9:** Conservación de la energía.

Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.9 Calores específicos

(Cengel & Boles, 2011), Afirman, por ejemplo: “Se requiere la adición de 4500 J de energía para incrementar la temperatura de 1000 g de hierro de 20 a 30 °C, en cambio, la energía necesaria utilizada en un fluido como el agua deberá ser nueve veces más grande con el propósito de incrementar la temperatura de 1000 g de este líquido, para el mismo rango de temperaturas”. (p 178).

El calor específico matemáticamente se relaciona como la cantidad de energía utilizada para subir en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia (Figura 1-10).

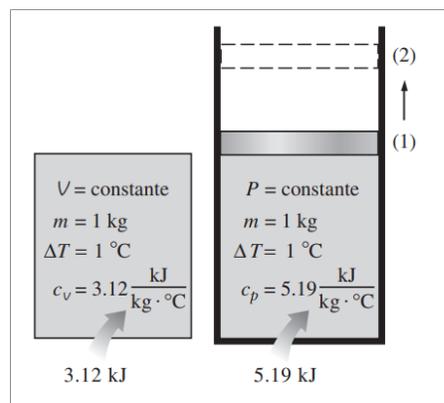
**Figura 1-10:** El calor específico

Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

Comúnmente, esta energía cambia de acuerdo a la ejecución del proceso. Se clasifica en dos tipos: con volumen constante  $C_v$  y a presión constante  $C_p$ .

El calor específico a volumen constante  $C_v$  es la energía usada para incrementar en un grado la Temperatura de la unidad de masa cuando el volumen es constante. El calor específico  $C_p$  refiere la energía usada para incrementar el grado de temperatura de la unidad de masa a presión constante, lo cual se ilustra en la Figura 1-11.

**Figura 1-11:**  $C_p$  a volumen y presión contantes



Nombre de la Fuente: (Cengel & Boles, 2011)

## 1.10 Segunda ley de la termodinámica

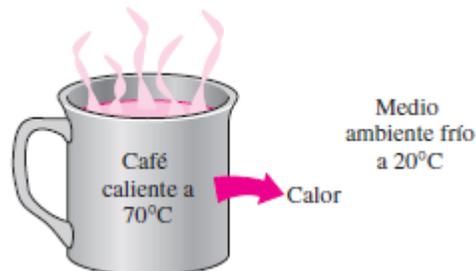
De la segunda ley de la termodinámica se deriva que en un proceso natural el calor se transfiere siempre de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura y nunca lo contrario, a esto se le conoce comúnmente como la ley de la entropía en aumento, que surge en origen de estudiar las maquina térmicas lo cual indica que ninguna maquina térmica es capaz de convertir completamente toda la energía que adsorbe en trabajo.

Otra forma de hablar de ella es que los procesos reales ocurren en un sentido tal que la calidad de la energía es menor porque la entropía tiende aumentar. La entropía nos ayuda a establecer la dirección en que las cosas ocurren ejemplo: cuando dos objetos a diferentes temperaturas se ponen en contacto finalmente después de un tiempo alcanzaran el equilibrio térmico esto se debe a que la entropía alcanza su máximo.

## 2 Transferencia de calor

La transferencia de calor es una ciencia que estudia la velocidad o la rapidez del intercambio de energía en forma de calor entre cuerpos que presentan un delta o diferencia de temperatura entre sí, para aclarar un poco el comportamiento de esta transferencia, apoyados en la **segunda ley de la termodinámica** resumimos que este sentido se dá; del fluido de mayor temperatura, hacia el de menor temperatura en todos los casos. como se ilustra en la Figura 2-1. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Figura 2-1:** Dirección flujo de calor.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 2.1 Relación con la termodinámica

Como ya vimos en el capítulo anterior, la termodinámica es la ciencia que se encarga del estudio referente al cálculo de cantidad y cualidad de la energía en forma de calor, necesaria para realizar un cambio de estado o fase de un cuerpo o sustancia, sin embargo, se complementa conociendo los tiempos en que se transfiere dicha cantidad de energía por medio del campo de estudio perteneciente a la transferencia de calor.

Por esta razón se debe comprender los conceptos básicos de la termodinámica para entender los de transferencia de calor, debido a que sus fundamentos parten de la primera

y segunda ley de la termodinámica por lo cual fue necesario abordarlos para el desarrollo y comprensión del tema.

## 2.2 Aplicación e ingeniería

Para aplicaciones y diseños en ingeniería, existe una gran variedad de configuraciones en la industria y cotidianidad de nuestras vidas, estos, dependerán de los requerimientos de cada sistema, proceso y uso particular, además, de la implementación de los conceptos aquí mencionados y las tecnologías existentes para controlar la energía térmica de las sustancias. Sus aplicaciones son muy comunes y prácticamente el intercambio de calor se da en muchas áreas, por ejemplo: calefacción, acondicionamiento de aire, refrigeradores, congeladores, calentadores de agua, planchas, radiadores de automóviles, etc. (Cengel & Ghajar, 2011)

Actualmente y por la necesidad de implementar el uso de energías renovables se encuentran en desarrollo y aplicación gran variedad de equipos (intercambiadores de calor), que aprovechan la energía térmica proveniente de los rayos del sol para suplir esta necesidad y transformar positivamente nuestra sociedad. Por ejemplo, unos de los más usados son los colectores solares.

En la práctica, los problemas de esta ciencia se consideran en dos grupos:

Primer grupo, de capacidad nominal, tratan de encontrar la razón de la transferencia de calor para un sistema con un delta de temperatura especificado, mientras que los del segundo grupo o dimensionamiento, tratan de calcular el tamaño del sistema a fin de transferir el calor a la razón calculada en el paso anterior de acuerdo a las temperaturas especificadas.

Para el estudio de un aparato o proceso de ingeniería, existen dos formas (Tabla 2-1) de hacerlo, escoger una de ellas, dependerá de los factores vistos anteriormente además de las ventajas y desventajas que nos ofrecen de acuerdo a sus características. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Tabla 2-1:** Formas de estudio de un proceso de ingeniería.

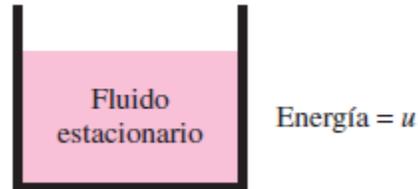
<b>Formas de estudio</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Pruebas Físicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realización de ensayos.</li> <li>- Toma de mediciones</li> <li>- Tomar en cuenta el error experimental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabajo con el equipo real.</li> <li>- La cantidad establecida se calcula por medición.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costoso</li> <li>- Demorado</li> <li>- Impráctico.</li> </ul>
<b>Analítico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mediante el análisis.</li> <li>- Elaboración de cálculos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procedimiento numérico.</li> <li>- Rápido</li> <li>- Barato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sujetos a la exactitud de las suposiciones, aproximaciones e idealizaciones del análisis.</li> <li>- Verificación experimental.</li> </ul>

Nombre de la fuente: Los Autores

## 2.3 Calor y otras formas de energía

La energía se presenta de diferentes maneras: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, al integrarlas y verlas en un sistema se consideran como la energía total **E**.

El calor que existe en la forma y grado de actividad molecular de una sustancia se conoce como energía microscópica, a su vez, el total de esta energía microscópica se comprende como la **energía interna o térmica** y se simboliza por la letra **U**. Un ejemplo se ilustra en la Figura 2-2.

**Figura 2-2:** Energía térmica  $u$ .

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

(Cengel & Ghajar, 2011), indica: "La magnitud que simboliza esta energía en el sistema internacional es el joule (J). Mientras que, para el sistema inglés, es la unidad térmica británica (Btu, British thermal unit), por definición es la cantidad necesaria de energía para incrementar en  $1^{\circ}\text{F}$  la temperatura de 1 lbm de agua a  $60^{\circ}\text{F}$ ". (p.6)

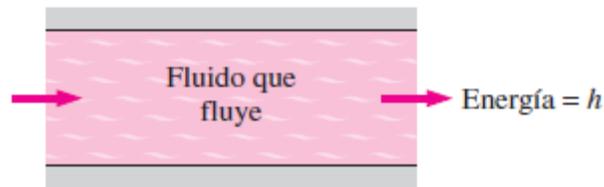
La energía interna entonces integra la cinética y potencial de las moléculas, diferenciándose de la siguiente forma y dando lugar a los siguientes términos: la parte de la energía cinética como **energía sensible** o **calor sensible** y se encuentra ligado proporcionalmente a la temperatura, es decir, a alta temperatura mayores serán las velocidades y grado de actividad molecular y como resultado habrá mayor energía interna. En cambio, la parte de la energía potencial se asocia con la fuerza que ejercen las moléculas entre sí para mantener una fase definida y son más fuertes en los sólidos que los gases, a su vez, el agregar o disminuir energía cambiará dicho estado produciéndose un cambio de fase, indicándonos que contrario a las fuerzas de atracción de las moléculas, la energía es mayor en un fluido en estado gaseoso que sólido. Esta energía asociada se conoce como **energía latente** o **calor latente**. (Cengel & Ghajar, 2011)

Los sistemas de transferencia de calor, se centran en su mayoría en procesos sin cambios químicos en las sustancias que interactúan, por lo cual, no se toman en cuenta la **energía química** (o de enlace) ni la **energía nuclear** ya que ocurren a nivel atómico.

Para facilitar el análisis de estos sistemas que involucran flujo de fluidos y comprenderlos un poco más, la teoría ha representado las variables  $h$  llamada entalpía (Figura 2-3), que es la sumatoria de la energía interna  $u$  y la  $Pv$ , este último representa la energía conocida

como trabajo de flujo. Es requerida para impulsar un fluido y mantenerlo fluyendo. (Cengel & Ghajar, 2011)

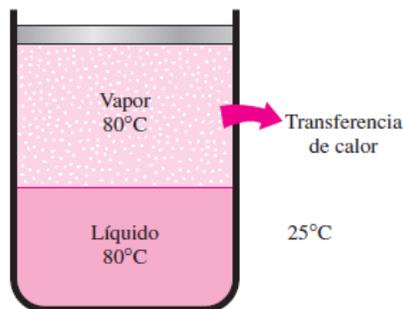
**Figura 2-3:** Entalpía  $h$ .



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

De acuerdo a los términos usados actualmente en termodinámica, a la suma de las energías sensible y latente, se les denomina **energía térmica** o **calor** y es transferible siempre y cuando exista una diferencia de temperatura (Figura 2-4). A dicha transferencia de energía se le conoce como **transferencia de calor**, así mismo cuando un sistema recibe calor se dice que hay **adición de calor** o cuando pierde calor se le conoce como **rechazo de calor**.

**Figura 2-4:** Fuerza de calor.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Para realizar los cálculos de esta transferencia a modo general se manejan las siguientes variables;  $Q$  refiere al valor de la cantidad de calor del sistema y sus unidades están dadas en Joule o BTU,  $\dot{Q}$  simboliza la velocidad del intercambio de calor, es decir, la relación de cantidad de calor por unidad de tiempo, sus unidades son Joule/s o BTU/h estas unidades son equivalentes a las de potencia o sea (W) vatio y se relacionan entre sí. (ver ecuación (2.1)).

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (2.1)$$

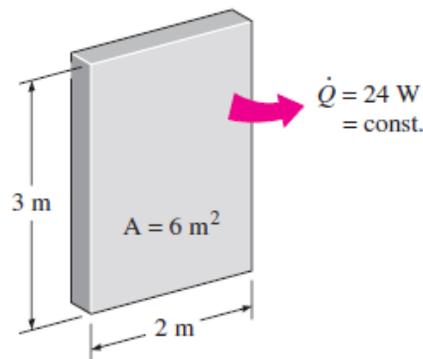
Cuando la razón de la transferencia sea constante entonces solo dependerá de la variación del tiempo (ver ecuación (2.2)).

$$Q = \dot{Q} dt \quad (2.2)$$

Por último, se encuentra el cálculo conocido como **flujo de calor** el cual denota la velocidad de la transferencia energética en forma de calor por el área perpendicular a la dirección de intercambio de calor (Figura 2-5) donde: **A** es el área de la transferencia de calor y en sistema internacional de unidades se representa en  $w / m^2$  y en el sistema inglés  $BTU / h \cdot ft^2$ . (ver ecuación (2.3)).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.3)$$

**Figura 2-5:** Flujo de calor



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

## 2.4 Mecanismos de transferencia térmica

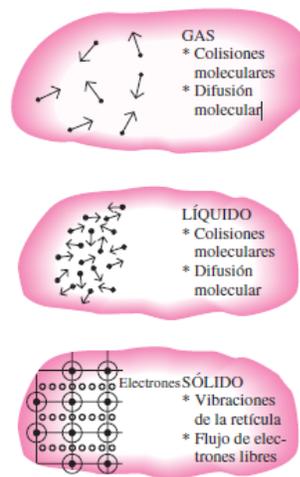
Estos mecanismos hacen referencia a la forma en que la energía térmica o calor, se puede transmitir a través del sistema teniendo en cuenta un delta de temperatura como fuerza impulsora, el medio en el que se desarrolla y por supuesto siguiendo la dirección decreciente de la misma.

Existen 3 formas diferentes: **conducción**, **convección** y **radiación**. (Cengel & Ghajar, 2011)

### 2.4.1 Conducción

Es la transferencia de calor entre las partículas más energéticas hacia las menos energéticas, se puede dar en sustancias sólidas, líquidas y gaseosas, en los primeros debido a la vibración de las moléculas y se transporta por medio de los electrones libres y en los líquidos y gases, por colisiones y difusión entre las moléculas durante sus movimientos aleatorios. como se observa en la Figura 2-6. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Figura 2-6:** Conducción de calor por fases.



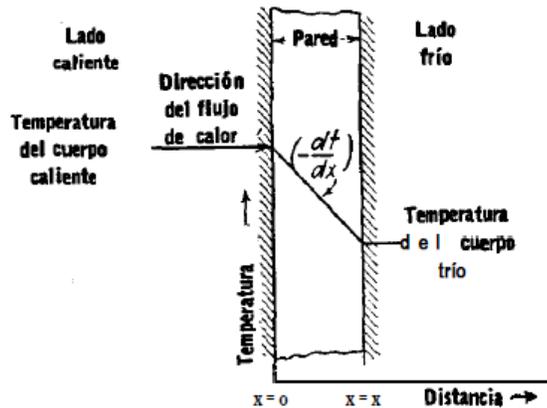
Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

La velocidad de esta transferencia por un medio, dependerá de varias condiciones: configuración geométrica, espesor y material de construcción al igual que el delta de temperatura en el sistema.

Las transferencias de calor por este método son más comúnmente asociadas a través de un material sólido fijo como el de una pared, y su transferencia se evalúa en ángulos rectos a dicha pared (Figura 2-7), el cálculo de esta transferencia relaciona directamente, el incremento proporcional del flujo de calor de acuerdo al valor de temperatura y su afectación con respecto al área de transferencia la cual indica un comportamiento

inversamente proporcional cuando el espesor de la pared se incrementa. (ver ecuación (2.4)).

**Figura 2-7:** Conducción en una pared.



Nombre de la fuente: (Kern, 1999)

En su forma diferencial se da el nombre de “**ley de Fourier de la conducción de calor**” y a la relación diferencial  $\frac{dT}{dx}$  se le conoce como gradiente de temperatura, el cual es negativo debido al valor de pendiente negativa en un diagrama T(temperatura) - x (espesor). (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_{cond} = KA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Dónde: **K** corresponde a la conductividad térmica del material, esto nos quiere decir la capacidad que tiene el material para permitir el paso del calor o su resistencia al mismo. Sus unidades están dadas en W/m.°C. Se muestra el valor de conductividad (Tabla 2-2) para algunos materiales a temperatura ambiente.

**Tabla 2-2:** Conductividad de materiales.

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

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

En los análisis termodinámicos normalmente se considera que los materiales son **isotrópicos**, esto significa que sus propiedades son uniformes en todas las direcciones.

Otro cálculo que podemos realizar para determinar características térmicas de estos materiales es el de **difusividad térmica** ( $\alpha$ ) que nos determina la rapidez en  $m^2/s$  con la que se propaga el calor a través del material y su fórmula es la relación entre la conductividad  $k$  y la capacidad calorífica  $\rho C_p$ , por unidad de volumen  $J/m^3 \cdot ^\circ C$ . (ver ecuación (2.5)).

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido } (k)}{\text{Calor almacenado } (\rho C_p)} \quad (2.5)$$

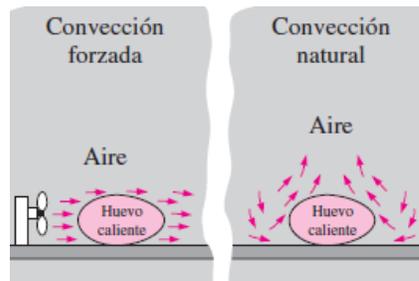
Un valor alto de difusividad térmica nos indica mayor velocidad en la propagación del calor a través del material debido a su poca capacidad de almacenarlo. (Cengel & Ghajar, 2011)

## 2.4.2 Convección

Es la forma de transferir calor entre fluidos y superficies calientes y frías o entre una superficie de un sólido con el fluido adyacente a ella sea líquido o gaseoso, pero estos últimos con la condición particular que se encuentran en movimiento, es decir, combina la transferencia por conducción y el movimiento de fluidos.

Cuando no existe gran movimiento de fluido adyacente al sólido, pero existe un intercambio de calor debido a las diferencias de densidades de los fluidos por encontrarse a temperaturas distintas, se le conoce como **convección pura** o **convección natural** o **libre**, mientras que en el momento en el que este flujo de fluido se incrementa por causa de utilización de equipos mecánicos como agitadores, bombas, ventiladores u otros, la razón de la transferencia será mayor debido al desplazamiento del fluido adyacente a la superficie del sólido que será renovado por fluido frío desplazando el fluido caliente permitiendo mantener el delta de temperatura que recordemos es la fuerza de empuje que da lugar a la transferencia de energía. A este método se le conoce como **convección forzada**. Esto lo ilustramos en la Figura 2-8. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Figura 2-8:** Convección natural y Forzada.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

También se considera transferencia de calor por convección cuando ocurre un cambio de fase en un fluido por el movimiento inducido en el mismo proceso por ejemplo durante la evaporación (burbujas en movimiento) o condensación (caídas de gotas).

Para calcular la velocidad de transferencia de calor por este mecanismo se aplica la “**ley de newton de enfriamiento**” (ver ecuación (2.6)).

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

“Donde: ***h***, coeficiente de transferencia por convección en  $W/m^2\text{°C}$  o  $Btu/h.ft^2\text{°F}$ , ***A<sub>s</sub>*** área superficial, ***T<sub>s</sub>*** es la temperatura de la superficie (del sólido) y ***T<sub>∞</sub>*** es la temperatura del fluido alejado de la superficie”. Es de destacar que el valor del coeficiente ***h*** no es una propiedad del fluido y es un valor calculado experimentalmente (Cengel & Ghajar, 2011)

### 2.4.3 Radiación

Esta forma de transmitir energía es a través de emisiones de ondas electromagnéticas o fotones, además no necesita de un medio de transferencia, así que no disminuye en el vacío como los mecanismos anteriores y a su vez es la más rápida en sentirse ya que viaja a la velocidad de la luz, el ejemplo más común son los rayos solares que llegan a nuestro planeta.

Cabe recordar que para nuestra área de investigación nos referiremos solamente a la energía de radiación térmica en caso de que sea relevante por la temperatura de los cuerpos.

Todos los cuerpos con temperaturas por encima del cero absoluto emiten radiación térmica, este es un fenómeno que depende del volumen y todas las sustancias en cualquiera de sus estados (sólido, líquido o gas) pueden absorber o emitir radiación de calor.

Para calcular los valores de transferencia de calor por radiación se usa la **"ley de Stefan-Boltzmann"** la cual nos expresa la máxima razón de radiación desde una superficie a un determinado valor de temperatura (grados Kelvin o Rankine). (ver ecuación (2.7)). (Cengel & Ghajar, 2011)

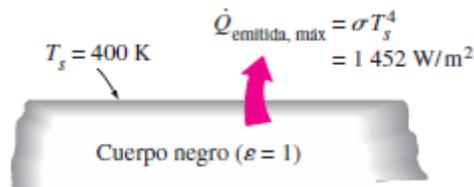
$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.7)$$

Donde:  $\sigma$ , es la constante de Stefan-Boltzmann y su valor en el sistema internacional e inglés es;  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  o  $0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/hft}^2\text{R}^4$ , respectivamente.

La ecuación anterior es aplicada idealmente a un cuerpo negro (Figura 2-9) el cual permitiría la mayor radiación posible que el de un cuerpo real diferente, es decir, en la realidad las emisiones son menores y están limitadas a un rango de emisividad simbolizado por la letra  $\varepsilon$  que varía entre cero y uno (ver ecuación (2.8)), esto dependerá del tipo de material. (Cengel & Ghajar, 2011)

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.8)$$

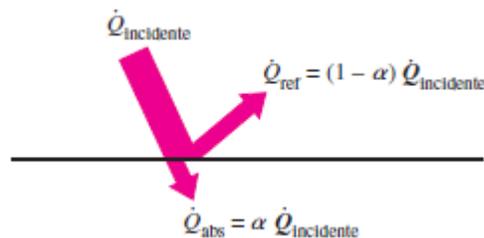
**Figura 2-9:** Radiación de un cuerpo negro



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Otra propiedad asociada a la radiación es la absorptividad  $\alpha$  la cual tiene el mismo rango de valores(0-1) que maneja la emisividad y nos permite determinar la rapidez de absorción de calor por radiación sobre la superficie de un cuerpo por medio de la relación entre la razón de calor incidente y a su vez podemos encontrar la razón de calor reflejado por dicha superficie, ver Figura 2-10. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Figura 2-10:** Calor absorbido y reflejado.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Finalmente, debemos incluir en el cálculo total de la razón de calor un coeficiente combinado y los cálculos referentes a la convección por encontrarse en el medio cerrado un fluido (gas). (ver ecuaciones (2.9) y (2.10)).

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \epsilon\sigma(T_s + T_{alred})(T_s^2 + T_{alred}^2) \quad (2.9)$$

$$\dot{Q}_{total} = h_{combinado}A_s(T_s - T_{\infty}) \quad (2.10)$$

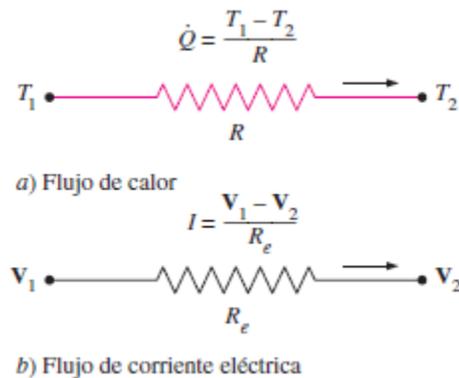
Por último, (Cengel & Ghajar, 2011) concluyen: “Este mecanismo es representativo para procesos que involucren intercambio de energía por conducción o convección natural, sin embargo, se considera insignificante cuando el proceso involucra convección forzada. Por consiguiente, al usar equipos mecánicos que promuevan una convección forzada es

habitual omitir la radiación, más aún, si las áreas que interactúan tienen poca emisividad y temperaturas bajas- moderadas”. (p. 29).

## 2.5 Resistencia Térmica

El concepto de resistencia térmica es análogo al de resistencia cuando se analiza un circuito eléctrico (Figura 2-11), en donde el cobre del alambre por donde fluye la corriente genera una restricción al paso de la corriente y si además ponemos resistencias adicionales pues la restricción de corriente será mayor. (Cengel & Ghajar, 2011)

**Figura 2-11:** Restricción térmica vs eléctrica.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

En un circuito térmico también se encuentran restricciones a la razón o velocidad de calor o paso del calor a través de un material, que se pueden calcular para cada mecanismo de transferencia de calor de acuerdo a sus características.

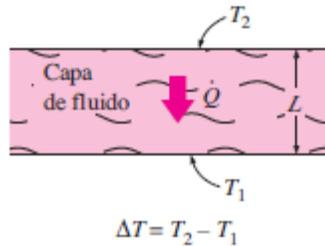
De manera general la resistencia térmica es la oposición a la velocidad de calor por conducción, convección o radiación según sea el caso. (Cengel & Ghajar, 2011).

## 2.6 Numero de nusselt

Según (Cengel & Ghajar, 2011) se definió: “El número de nusselt es un coeficiente adimensional usado en la transferencia térmica por convección. Una manera de entender el fenómeno es, considerando una capa de fluido de altura L, con un  $\Delta T = T_2 - T_1$ , ver

Figura 2-12. El intercambio de energía a través de la capa de fluido se desarrolla por convección cuando esta misma, realice algún movimiento y por conducción cuando se encuentre estática”. (p.376).

**Figura 2-12:** Número nusselt



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Para terminar (Cengel & Ghajar, 2011) concluye: “Nusselt hace referencia al incremento de la eficiencia de la transferencia de energía por medio de una capa de fluido, como consecuencia de la convección en relación con la conducción por medio de la misma capa”. (p.376). (ver ecuación (2.11)).

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h \Delta T}{k \Delta T / L} = \frac{hL}{k} = Nu \quad (2.11)$$

Dónde:  $h$ , Coeficiente de transferencia de calor por convección,  $L$  es la Longitud y  $k$ , Conductividad térmica del fluido.

## 2.7 Esfuerzo cortante

Es la fuerza de fricción que realiza una capa de fluido con mayor velocidad que trata de atraer a una capa contigua más lenta debido a la fricción entre las dos. La fuerza de fricción por unidad de área se conoce como esfuerzo cortante y se simboliza con la letra  $\tau$  (Cengel & Ghajar, 2011).

Los fluidos que se comportan de acuerdo a lo anterior, reciben el nombre de fluidos newtonianos, los más conocidos, como el agua, el aire, la gasolina y los aceites, son newtonianos. La sangre y los líquidos plásticos son ejemplos de fluidos no newtonianos (Cengel & Ghajar, 2011).

El autor (Cengel & Ghajar, 2011) nos refiere: “En el análisis termodinámico y mecánico de fluidos, con frecuencia aparece la relación entre viscosidad dinámica y densidad. Para facilitar los cálculos, a esta relación se le conoce como viscosidad cinemática y se denota como  $\nu = \mu/\rho$ ”. (p.382).

Siguiendo con el texto, (Cengel & Ghajar, 2011) afirma: “*Un método que simplifica el flujo externo es referenciar  $\tau_w$ , con la velocidad en el flujo capa más rápida,  $V$ , como*”. (p.383). (ver ecuación (2.12)).

$$\tau_w = C_f \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.12)$$

Donde:  $C_f$ , es el coeficiente de fricción adimensional y  $\rho$  es la densidad del fluido.

Finalmente, (Cengel & Ghajar, 2011) concluye: “*El coeficiente de rozamiento es una magnitud relevante en los cálculos de transferencia térmica, porque, se encuentra ligado con el coeficiente de transferencia de calor y con la potencia del equipo mecánico (Bomba o ventilador)*”.(p.383).

## 2.8 Numero de prandlt

Para entender el número de prandlt es preciso conocer el concepto de capa límite de velocidad de un fluido, el cual refiere que es la zona donde el movimiento de un fluido adyacente a la presencia de un sólido (superficie) con el que se encuentra en contacto tiende a igualar su velocidad, es decir cero (0), en otras palabras, cuando la velocidad del fluido en movimiento con respecto a la superficie varía o disminuye respecto a la velocidad inicial de bombeo por efecto de la fricción y su valor va de 0 a 0.99. de igual forma se genera una capa límite térmica que mostrará un perfil de temperatura que variara por las temperaturas del líquido y de la superficie en contacto con él y tendrá estrecha relación con el perfil de velocidad del fluido y que tendrá un impacto mayor sobre la transferencia por convección (Cengel & Ghajar, 2011). (ver ecuación (2.13)).

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.13)$$

(Cengel & Ghajar, 2011) indica: “La mejor forma de explicar el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica es a través del análisis del número de Prandtl adimensional. La magnitud del valor de Prandtl tienen un rango por debajo de 0.01 para metales líquidos, hasta por encima de 100.000 para aceites pesados (Tabla 2-3). El valor de Prandtl para los gases están aproximadamente cercanos a 1, esto nos señala, una velocidad similar a la que la cantidad de movimiento y el calor pierden energía a través del fluido. El calor presenta conductividad térmica alta en los metales líquidos ( $Pr \ll 1$ ) y muy baja en los aceites ( $Pr \gg 1$ ) con respecto a la cantidad de movimiento. Resultado de esto, el espesor de la capa límite aumenta en los metales líquidos y disminuye en los aceites, en relación con la capa límite de la velocidad”. (p.384).

**Tabla 2-3:** Valor prandtl fluidos.

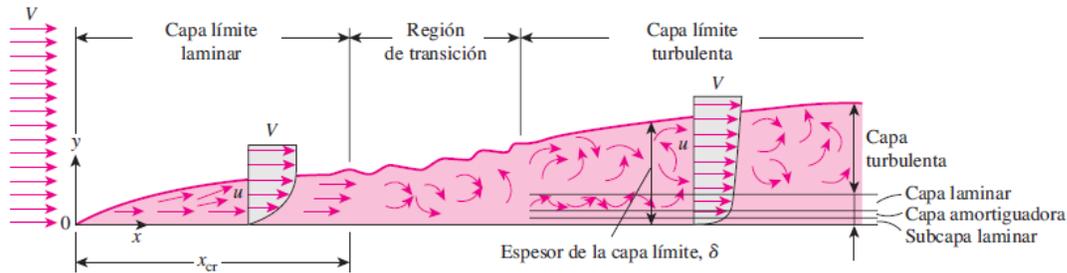
Fluido	Pr
Metales líquidos	0.004-0.030
Gases	0.7-1.0
Agua	1.7-13.7
Fluidos orgánicos ligeros	5-50
Aceites	50-100 000
Glicerina	2 000-100 000

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

## 2.9 Flujos laminar y turbulento

Cuando se habla de laminar y turbulento se refiere a las formas ordenadas o desordenadas en la que viajan los fluidos con respecto a su velocidad por esta razón podemos encontrar en la definición del libro (Cengel & Ghajar, 2011) lo siguiente:

“Un flujo laminar, es aquel que se comporta con un movimiento altamente ordenado; mientras que, en el flujo turbulento, es característico sus cambios constantes en la velocidad y un movimiento altamente desordenado. También nos muestra que una transición de flujo laminar a turbulento, no se presenta inmediatamente; por el contrario, ocurre en una zona en la que el flujo oscila entre laminar y turbulento, antes de convertirse completamente turbulento. La mayoría de flujos encontrados en la vida real son turbulentos”. (p.384). Se ilustra en la Figura 2-13.

**Figura 2-13:** Flujos laminar, de transición y turbulento.

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Concluyendo, (Cengel & Ghajar, 2011) expresa:

“El flujo turbulento, favorece la transferencia del calor y la cantidad de movimiento entre las partículas, lo cual aumenta la fuerza de fricción y la rapidez de la transferencia de calor por convección”. (p. 385).

### 2.9.1 Numero de Reynolds

Reynolds descubrió que el tipo de flujo es dependiente mayormente de la velocidad de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido. Esta velocidad de cambio se conoce como número de Reynolds, el cual es una cantidad adimensional. (Cengel & Ghajar, 2011, p.385). (ver ecuación (2.14)).

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (2.14)$$

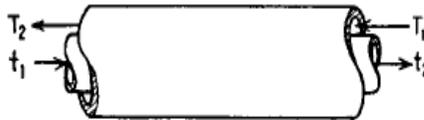
Dónde:  $V$ , es la velocidad corriente superior (libre),  $L_c$ , es la longitud característica de la configuración geométrica y  $\nu = \mu/\rho$ , es la viscosidad cinemática del fluido.

A mayor número de Reynolds, incrementa las fuerzas de inercia, dependientes en proporción de la densidad y la velocidad del fluido, y estas a su vez mayores en relación con las fuerzas viscosas, como consecuencia, estas últimas no pueden detener los movimientos aleatorios y rápidos del fluido. Sin embargo, a números de Reynolds pequeños, sucede lo contrario y mantienen “alineado” el fluido. Por lo tanto, hablamos de flujo turbulento y laminar respectivamente. (Cengel & Ghajar, 2011, p385-386).

## 2.10 Flujos contracorriente y paralelo

Para los equipos intercambiadores de calor se tienen en cuenta las configuraciones de operación para cálculos de transferencia de calor, por esta razón, se diferencia la manera en que los fluidos ingresan al equipo. Teniendo en cuenta lo anterior, cuando dos flujos viajan en direcciones opuestas se considera flujo a contracorriente (Kern, 1999), ver Figura 2-14.

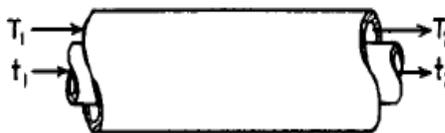
**Figura 2-14:** Flujo a contracorriente.



Nombre de la fuente: (Kern, 1999)

Mientras que en el flujo paralelo los fluidos van en la misma dirección, como en la Figura 2-15.

**Figura 2-15:** Flujo paralelo.



Nombre de la fuente: (Kern, 1999)



## **3 Intercambiadores de calor**

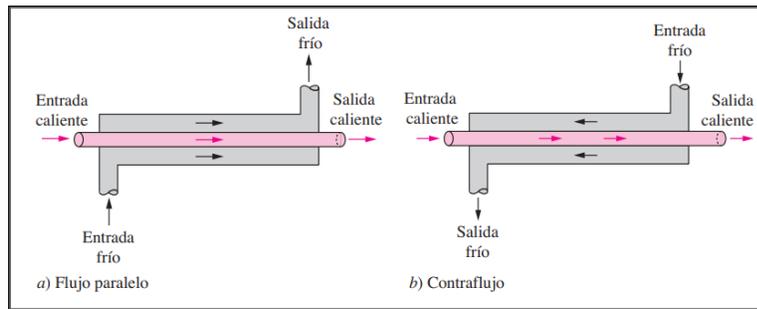
Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten transferencia de energía entre dos sustancias que están a diferentes temperaturas, evitando que se toquen entre ellas; ubicando este equipo en la industria como una maquina térmica de alto rendimiento, con una capacidad de transferencia de calor muy eficiente, logrando así un mayor aprovechamiento del proceso (Yunus A. Cengel, 2011).

### **3.1 Tipos de intercambiadores de calor**

Para (Cengel & Ghajar, 2011), “De acuerdo al tipo de aplicación de la transferencia de calor son necesarios diferentes componentes y configuraciones del dispositivo para dicha transferencia. La necesidad por adaptar los elementos internos para la transferencia de calor a cada aplicación particular, dentro de las limitantes específicas, nos han llevado al desarrollo de múltiples diseños nuevos de intercambiadores de calor”. (p.630).

#### **3.1.1 Intercambiador de calor de doble tubo**

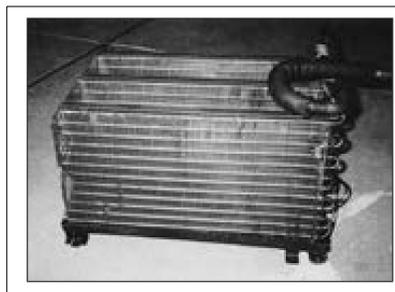
En dicho intercambiador de calor uno de los fluidos pasa a través de la tubería pequeña, mientras que el otro lo realiza por el espacio anular entre los dos tubos, así lo explican (Cengel & Ghajar, 2011), “En un intercambiador de calor de doble tubo son posibles dos tipos de disposición del flujo (Figura 3-1): Flujo paralelo los dos fluidos ingresan por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección. mientras, en el contraflujo los fluidos entran en el por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas”. (p.630).

**Figura 3-1:** Régimen de flujo.

Nombre de la Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 3.1.2 Intercambiador de calor compacto

Otro tipo de intercambiador diseñado con el fin de mejorar y aumentar la superficie de intercambio de energía por unidad de volumen es el intercambiador compacto (Figura 3-2) como lo indica (Cengel & Ghajar, 2011), “La rapidez entre el área destinada al intercambio de calor y su volumen se llama densidad de área  $\beta$ , es decir, Un equipo que transfiera el calor con  $\beta > 700 \text{ m}^2 / \text{m}^3$  (o  $200 \text{ ft}^2 / \text{ft}^3$ ) se clasifica como compacto. La extensa región superficial es el producto de la suma de placas metálicas finas o aletas corrugadas con mínima separación entre ellas, a las barreras que impiden la mezcla entre los fluidos, en estos equipos los dos fluidos normalmente fluyen perpendicular entre sí y a esto se le conoce como flujo cruzado”. (p.630).

**Figura 3-2:** I.C. compacto, gas-líquido.

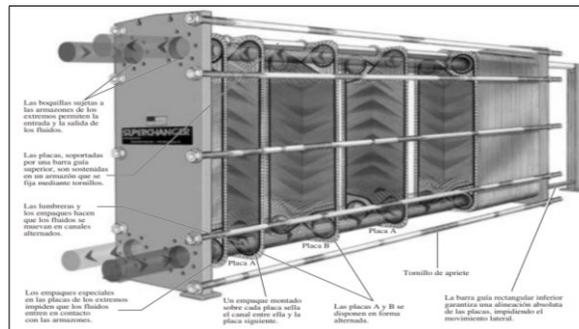
Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 3.1.3 Intercambiador de calor de placas y armazón

Un ejemplo de innovación y amplio uso en la industria es el intercambiador de calor de placas y armazón (Figura 3-3), su configuración consta de láminas con pasos corrugados

permitiendo el paso del fluido, de esta manera lo explican (Cengel & Ghajar, 2011), “Ambos fluidos circulan de manera intercalada, de esta forma cada corriente fría permanece en medio de dos corrientes calientes, así se obtiene un intercambio de calor mayor y eficiente; de igual forma, estos equipos ofrecen la posibilidad de aumentar su estructura de acuerdo a la necesidad de transferencia requerida. Son ideales para intercambio de energía líquido a líquido, manteniendo presiones similares en ambos fluidos”. (p.632).

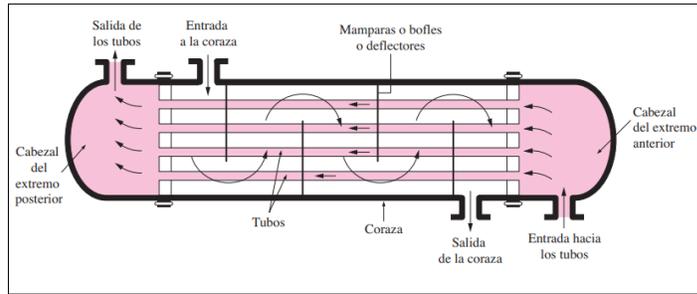
**Figura 3-3:** I.C. placas y armazón, líquido-líquido.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 3.1.4 Intercambiador de calor de tubos y coraza

Finalmente y tal vez el más común de los intercambiadores de calor y más usado en la industria, sea el de este tipo (Figura 3-4), de esta manera lo describen los autores (Cengel & Ghajar, 2011), “Estos equipos contienen cierta cantidad de tubos empaquetados en una carcasa con sus ejes paralelos al de ésta. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza; es común la ubicación de deflectores segmentados en la coraza para obligar al fluido a moverse en dirección transversal a la coraza con el fin de incrementar la transferencia de calor, cambiando las condiciones del flujo, y también permiten un espaciado homogéneo entre los tubos, también tiene dos cabezales ubicados en los extremos de la coraza, donde el fluido del lado de los tubos se deposita antes de entrar y salir de ellos”. (p.631).

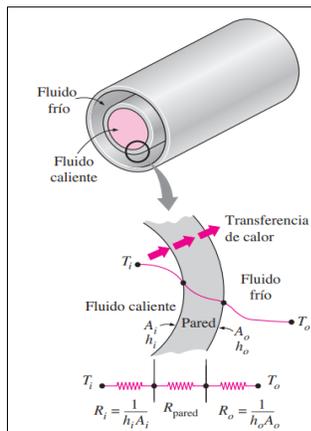
**Figura 3-4:** I.C. tubos y coraza 1-2.

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

### 3.2 El coeficiente total de transferencia de calor

Se considera como la cantidad total de transferencia de energía (calor) a través de un material, así lo indican los autores (Cengel & Ghajar, 2011), “generalmente estos equipos están involucrados con dos fluidos, los cuales están apartados por paredes sólidas, la transferencia de calor ocurre de la siguiente manera: Del fluido caliente hacia la pared externa del tubo (convección), posterior a través del grosor de la pared por conducción y finalmente de la pared interna del tubo al fluido frío nuevamente por convección”.(p.633)

Existe una red de restricciones térmicas relacionadas durante la transferencia de energía térmica, éstas involucran dos impedancias para el fluido (convección) y una para la superficie sólida (conducción) ver Figura 3-5, superficie interna **i** y externa **o**.

**Figura 3-5:** Red de restricciones térmicas.

Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Para una maquina térmica de tubos concéntricos (doble tubo), la restricción térmica de su pared es, (ver ecuación (3.1)).

$$R_{pared} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi kL} \quad (3.1)$$

Dónde: **k**, es la conductividad térmica del material y **L**, longitud tubo.

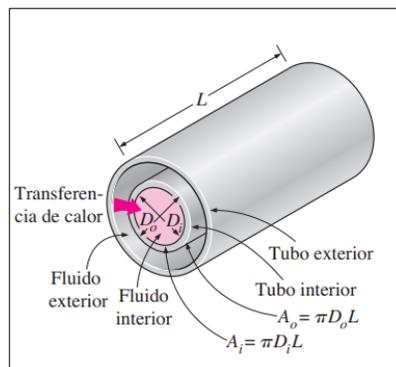
De esta manera, la restricción térmica absoluta o total es, (ver ecuación (3.2)).

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (3.2)$$

**A<sub>i</sub>**, área superficie interna que aísla ambos fluidos y **A<sub>o</sub>**, área superficie externa de pared.

Cuando hay flujo por el área anular entre los tubos y flujo por el tubo interno, se tiene **A<sub>i</sub> = πD<sub>i</sub>L** y **A<sub>o</sub> = πD<sub>o</sub>L** (Figura 3-6).

**Figura 3-6:** Zonas de transferencia I.C.



Nombre de la fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Es más fácil y conveniente integrar el total de las restricciones térmicas que se detecten en la dirección del flujo térmico en una sola resistencia **R** y manifestar la velocidad de la transferencia de cómo, (ver ecuación (3.3)).

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (3.3)$$

Donde **U**, corresponde al coeficiente total de transferencia de calor, su unidad es  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , que es equivalente al coeficiente de convección habitual, **h**. Suprimiendo  $\Delta T$  (ver ecuación (3.4)).

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (3.4)$$

Cualquier equipo de intercambio de calor cuenta con dos superficies disponibles para el intercambio de energía  $A_i$  y  $A_o$ , éstas normalmente son distintas. Es decir, el coeficiente de transferencia de calor total **U** de un intercambiador de calor no es representativo, a menos que se indique el lado de la superficie sobre la cual se determina. En particular, cuando uno de sus lados aumenta su área y la otra no, por la instalación de elementos adicionales como las aletas.

Cuando el espesor del tubo es delgado y hay buena conductividad térmica del material, la resistencia térmica de se puede considerar como despreciable ( $R_{pared} \approx 0$ ) y las áreas internas y externas son similares ( $A_i \approx A_o \approx A_s$ ), reduce la (ecuación (3.4)) el coeficiente de intercambio de calor total queda de esta manera. (ver ecuación (3.5)).

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (3.5)$$

Donde  $U \approx U_i \approx U_o$ .

### 3.3 Factor de incrustación

Los autores (Cengel & Ghajar, 2011), nos explican de manera sencilla como la eficiencia de un intercambiador de calor puede disminuir de acuerdo a su tiempo de operación debido al depósito de residuos sobre la superficie de intercambio de calor, la película depositada se convierte en una resistencia más, disminuyendo la razón de la misma en un

intercambiador de calor, este efecto es representado como un factor de incrustación  $R_f$ , que relaciona la cantidad de restricción térmica que se importa a través de la incrustación.

La obstrucción de mayor frecuencia, se da por decantación de residuos sólidos los cuales viajan con el fluido y quedan sobre la superficie de intercambio de calor. Ahora imagine estos depósitos minerales formándose en la superficie interna de los tubos disminuyendo el área de circulación del fluido y afectando el proceso de transferencia. Cabe resaltar que el factor de incrustación se aumenta debido a la alta temperatura y la baja velocidad del fluido, así como también de la duración del servicio de operación. (p.635).

La relación de coeficiente total de transferencia de calor incluyendo los impactos por incrustación para áreas internas y externas del tubo en un I.C. de tubos y coraza sin accesorios adicionales podemos expresarla como (ver ecuación (3.6)).

$$\frac{1}{UAs} = \frac{1}{UiAi} = \frac{1}{UoAo} = R = \frac{1}{hiAi} + \frac{Rf,i}{Ai} + \frac{\ln\left(\frac{Do}{Di}\right)}{2\pi kL} + \frac{Rf,o}{Ao} + \frac{1}{hoAo} \quad (3.6)$$

Donde,  $R_f, i$  Incrustación interna y  $R_f, o$ , incrustación externa.

### 3.4 Análisis de los intercambiadores de calor

Debido al uso constante de los intercambiadores de calor es importante realizar un análisis a la hora de elegir uno de ellos, ya que este debe cumplir con unas características específicas que le permitan satisfacer las necesidades que requiere el proceso; por ejemplo, lograr un cambio de temperatura específico.

Al pasar largos periodos de operación sin cambios en su proceso los intercambiadores se consideran equipos de flujo estacionario, de esta manera los gastos de la masa propios de la sustancia permanecen fijos y las propiedades de entrada o salida permanecen sin cambios considerables. En consecuencia, al experimentar pocos cambios su velocidad y elevaciones, se toma como despreciables los cambios en la energía latente y sensible.

Las condiciones que se acaban de describir son muy cercanas a la realidad y disminuyen enormemente el estudio de los intercambiadores calor. Por esta razón es común relacionarlos con la primera ley de la termodinámica la cual exige que la rapidez de la transferencia de calor sea igual para ambos fluidos. (ver ecuación (3.7) y (3.8)).

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}}) \quad (3.7)$$

Y,

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h, \text{sal}} - T_{h, \text{ent}}) \quad (3.8)$$

Donde, el subíndice c (cool) y h (hot) indican frío y caliente respectivamente,

$\dot{m}_c, \dot{m}_h$  = flujos máxicos

$C_{pc}, C_{ph}$  = calores específicos

$T_{c, \text{sal}}, T_{h, \text{sal}}$  = temperaturas de salida

$T_{h, \text{sal}}, T_{c, \text{ent}}$  = temperaturas de entrada

Durante el análisis de los I.C., generalmente es conveniente obtener el resultado del flujo máxico y el calor específico de un fluido simplificándolos en un solo valor, a esto se le relaciona como capacidad calorífica, para flujos de los fluidos que intercambiaran energía de acuerdo a su diferencia de temperatura (ver ecuación (3.9)).

$$C_h = \dot{m}_h C_{ph} \text{ y } C_c = \dot{m}_c C_{pc} \quad (3.9)$$

La relación de capacidad calorífica del flujo de la sustancia muestra la rapidez de transferencia de calor requerida para alterar su temperatura en 1°C acorde a como circula por el intercambiador. De acuerdo con esto cuando un fluido tiene una relación de capacidad calorífica enorme este experimenta una variación pequeña en su temperatura y por el contrario cuando la relación de capacidad calorífica es reducida la temperatura experimenta una variación mayor. Teniendo en cuenta esta definición, las ecuaciones (3.7) y (3.8) se pueden expresar, (ver ecuación (3.10) y (3.11)). (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{Q} = C_c (T_{c, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}}). \quad (3.10)$$

Y,

$$\dot{Q} = C_h (T_{h, \text{sal}} - T_{h, \text{ent}}). \quad (3.11)$$

Los autores (Cengel & Ghajar, 2011), “Afirmar que la velocidad de la transferencia de calor es idéntica a la velocidad de capacidad calorífica de alguno de los fluidos que interactúan multiplicada por la variación de temperatura en ese fluido y mencionan que la única causa en que el aumento o disminución de la temperatura sea igual ocurre en el momento en que las relaciones de capacidad calorífica en ambos fluidos sean idénticas”. (p.641).

### 3.5 Método de la diferencia media logarítmica de temperatura

La MLDT es el mejor método para hallar el calor que se está transfiriendo por los fluidos que están a diferentes grados de temperatura. (ver ecuación (3.12)).

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3.12)$$

En donde  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  simbolizan la resta de temperatura en ambos fluidos entre sus boquillas de entrada y salida del I.C.

La MLDT se obtiene siguiendo la curva de temperatura real de los fluidos durante todo el recorrido del proceso, y puede representar con precisión la resta de temperatura promedio entre los fluidos. (Cengel & Ghajar, 2011).

### 3.6 Elección de un intercambiador de calor

Los ingenieros con frecuencia se encuentran en una situación en la cual deben elegir el tipo de intercambiador que mejor se adecue a las necesidades que requiere un trabajo; al realizar el cometido de la transferencia de calor. La finalidad es sencilla ya que se busca

calentar o enfriar dicho fluido con un consumo másico y una temperatura conocida llevándola a un grado de temperatura deseado (Cengel & Ghajar, 2011).

La selección adecuada está regulada por varios factores:

### 3.6.1 Velocidad del intercambio de calor

Es el valor más valioso en la elección de un intercambiador de calor; pues su función principal es transferir calor a una rapidez específica para alcanzar la variación deseada en la temperatura del fluido con un flujo másico definido.

### 3.6.2 Costo

Las restricciones presupuestarias generalmente juegan un papel importante en la elección de los intercambiadores de calor, a excepción de algunos casos especiales, sin embargo, en todos se debe tener en cuenta el costo de operación y mantenimiento en la evaluación del valor total.

### 3.6.3 Costo operación equipo mecánico

En los intercambiadores de calor, dos fluidos generalmente se ven obligados a fluir a través de bombas o ventiladores los cuales consumen energía eléctrica. Para determinar cuál es el costo anual de electricidad de operación en estos equipos, (ver ecuación (3.13)).

$$\text{costo de operacion} = (\text{potencia de bombeo, kw}) \times (\text{horas de operacion, h}) \times (\text{precio de electriidad, } \frac{\text{dolares}}{\text{kwh}}) \quad (3.13)$$

De esta manera lo explican los autores (Cengel & Ghajar, 2011), “Donde el costo por operación de equipo mecánico equivale al producto de la potencia eléctrica consumida por los motores, el número de horas en servicio y el precio de la energía eléctrica. La disminución del cambio de presión y del flujo másico, hará decaer el gasto por operación del equipo, pero incrementará sus dimensiones y, a su vez, la inversión inicial. Resultado de la experiencia, se sabe que al doblar el consumo de masa disminuirá a la mitad el costo de inversión, sin embargo, incrementará alrededor de ocho veces más los requerimientos de potencia. Generalmente, las velocidades oscilan entre 0.7 y 7 m/s en líquidos y entre 3

y 30 m/s en gases. Las ventajas de tener velocidades lentas es que previenen daños por erosión, vibración, ruido y altas caídas de presión”. (p.662-663).

### **3.6.4 Tamaño y peso**

En general es mucho mejor un intercambiador pequeño y ligero en especial cuando se trata de la industria automotriz y aeroespacial donde los requisitos son muy específicos, (Cengel & Ghajar, 2011) indican: “Lo lógico es que a un intercambiador de gran tamaño cueste más. La longitud de los tubos a utilizar se ve limitada en ocasiones por el espacio disponible para el montaje del intercambiador”. (p.663).

### **3.6.5 Tipo**

El tipo de intercambiador elegido depende del tamaño, el peso y los fluidos involucrados, (Cengel & Ghajar, 2011) así lo explican: “Un intercambiador es eficiente y preciso para refrigerar un líquido a través de un gas, siempre y cuando la superficie del lado del gas sea muy grande respecto de la del líquido”. (p.663).

### **3.6.6 Materiales**

Finalmente los autores (Cengel & Ghajar, 2011), “Explican que los materiales a utilizar en un proyecto de intercambio térmico pueden influir notablemente en la elección de los intercambiadores. Por ejemplo, son indiferentes los resultados de los esfuerzos térmicos y mecánicos con presiones más bajas de 220,4 psi o temperaturas menores a 302 °F. Por el contrario, los resultados se tornan importantes puntos de análisis, por encima de 1028,7 psi y 1022°F y a su vez, acotan demasiado los materiales tolerables para el intercambiador. Un delta de temperatura de 122°F o superior entre las superficies fría y caliente acarrea dificultades por expansión térmica diferencial. Cuando los fluidos son corrosivos es mejor elegir componentes que resistan a este fenómeno, como el titanio o el acero inoxidable, de lo contrario se deberá sustituir con regularidad los equipos por daños de integridad”. (p.663).



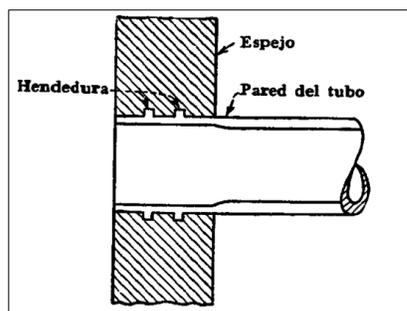
## 4 Cálculos de diseño y operación de un intercambiador de tubos y coraza de Flujo 1:2 contracorriente-paralelo

### 4.1 Diseño

Cuando se requiere un área de transferencia de calor más grande, se puede obtener mejor a través del intercambiador de tubos y coraza, ya que este involucra la expansión de un tubo en un espejo formando un sello que no gotee bajo ciertas condiciones de trabajo razonables.

El autor (Kern, 1999), “nos da un ejemplo de tubo expandido como se muestra en la (Figura 4-1). En la región de sello entre cabezal fijo y carcasa se instala un deflector que cuenta con agujeros por donde ingresarán los tubos internos, estos tienen un diámetro apenas mayor al del exterior de los tubos para con el rolado obtener un sello metal-metal, adicional, se recortan dos o más grietas sobre la pared del agujero. El rolador es una herramienta rotatoria con una conicidad determinada, por medio de él, podemos superar el límite elástico del material del tubo y conseguir maleabilidad, con el fin de que llene las grietas y se logre un sello impecable”. (p.159).

**Figura 4-1:** Tubo rolado



Nombre de la fuente: (Kern, 1999)

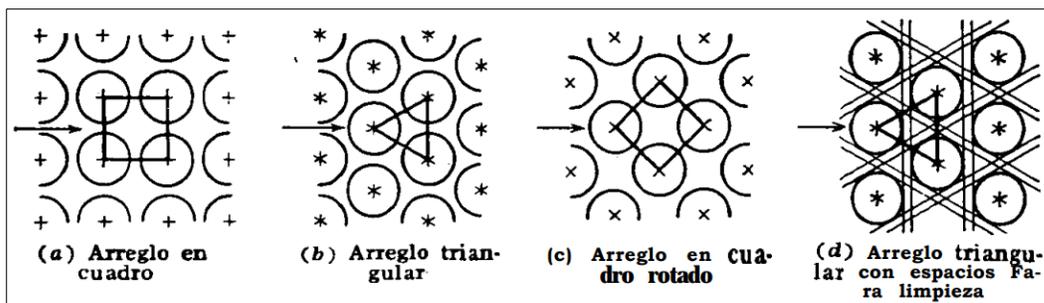
### 4.1.1 Tubos para intercambiadores de calor

La tubería interna de los intercambiadores de calor deberá cumplir con ciertos parámetros; los cuales ya están establecidos bajo estrictas normas, como diámetros externos de los tubos, siguiendo con el texto (Kern, 1999), “Podemos encontrar en el mercado variedad de materiales en los que se fabrican los tubos, entre ellos; acero, cobre, admiralty, metal Muntz, latón, 70-30 cobre-níquel, aluminio-bronce, aluminio y aceros inoxidables”. (p.160)

Con ayuda del calibrador Birmingham (BWG) podemos disponer de diferentes espesores de pared del tubo, (Kern, 1999). Nos indica: “nos indica los diámetros de tubo que habitualmente se usan, entre ellos los de 3/4 y 1 plg de diámetro externo utilizados con mayor frecuencia en el diseño de equipos de intercambio térmico”. (p.160) (ver anexo C).

Existen diferentes tipos de arreglos para los tubos, los cuales nos permitirán elegir el que mejor se adapte a nuestras necesidades; Siguiendo con el texto (Kern, 1999), “Los tubos tienen una acomodación en configuraciones de tipo triangular o cuadrada, observable en la Figura 4-2, de acuerdo al arreglo escogido podremos tener mayor o menor eficiencia en la transferencia de calor ya que el triangular ofrece un 25% más de coeficiente que el cuadrado”.(p.160)

**Figura 4-2:** Arreglos de los tubos de I.C.

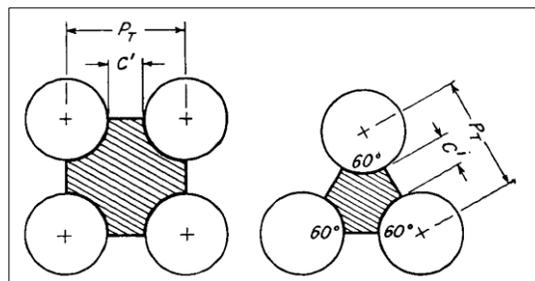


Nombre de la fuente: (Kern, 1999)

### 4.1.2 Espaciado de los tubos

Según el autor (Kern, 1999), “El espaciado de los tubos (PT) (Figura 4-3), es la longitud menor entre centros en los tubos contiguos. Los espaciados más frecuentes para configuraciones cuadradas son de 3/4 plg DE en un espaciado cuadrado de 1 plg y de 1 plg DE en un espaciado en cuadro de 1 1/4 plg. Para configuraciones en triángulo son, de 3/4 plg DE en espaciado triangular de 15/16 plg, 3/4 plg DE en un arreglo triangular de 1 plg, y 1 plg DE en un arreglo triangular 1 plg”. (p.161)

**Figura 4-3:** Espaciado de los tubos



Nombre de la fuente: (Kern, 1999)

### 4.1.3 Coraza

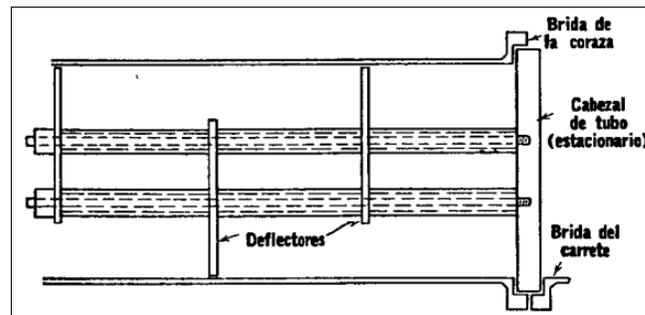
Para el autor (Kern, 1999), “Una coraza menor igual de 12 plg de diámetro construida de tubo de acero, (ver anexo A). Superior a 12 pulg incluyendo hasta las 24 plg, el diámetro exterior real y el diámetro nominal del tubo son idénticos. El schedule estándar para corazas con diámetros interiores de 12 a 24 plg, es de 3/8 plg, lo que es aceptable para presiones de operación por el lado de la coraza hasta de 300 lb/plg<sup>2</sup>. Se pueden conseguir mayores espesores para presiones más altas. Las corazas por encima de 24 plg de diámetro se construyen rolando placa de acero”. (p.161)

### 4.1.4 Deflectores

Una de las formas para lograr coeficientes de transferencia más altos es manteniendo el líquido en un estado turbulento, para crear flujo altamente desordenado por la coraza es habitual usar deflectores lo que conlleva al fluido a moverse por el interior de la coraza en ángulos de 90° respecto a la horizontal de la ubicación de los tubos, esto provoca un impacto importante de flujo turbulento, incluso si una pequeña cantidad de líquido fluye a

través de la coraza. La distancia que separa los deflectores entre sí, se llama espaciado de los deflectores; debido a que estos pueden estar a distintas separaciones, la masa-velocidad no está condicionada del todo con el diámetro interno de la coraza. Para mantener firmes los deflectores es necesario utilizar espaciadores como muestra la Figura 4-4, los cuales lo constituyen un pasador atornillado al cabezal de tubos o espejo y unas regiones del tubo que forman hombreras entre deflectores adyacentes. (Kern, 1999) (p.162)

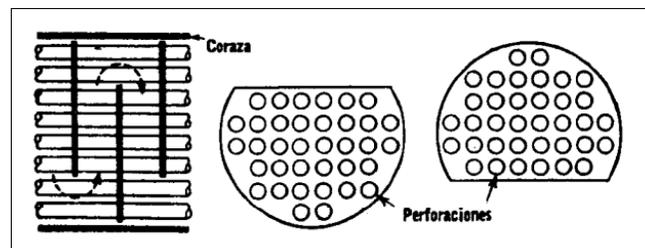
**Figura 4-4:** Espaciado de deflector (aumentado)



Nombre de la Fuente: (Kern, 1999)

De acuerdo con el autor (Kern, 1999). "Existen distintos modelos de deflectores que se utilizan en los intercambiadores, los más generales son los segmentados mostrados la Figura 4-5. Los deflectores segmentados, son placas metálicas con orificios, sus alturas reducidas comúnmente en un 25% del diámetro interior de la coraza. Normalmente conocidos como deflectores con 25% de corte". (p.162)

**Figura 4-5:** Deflector segmentado

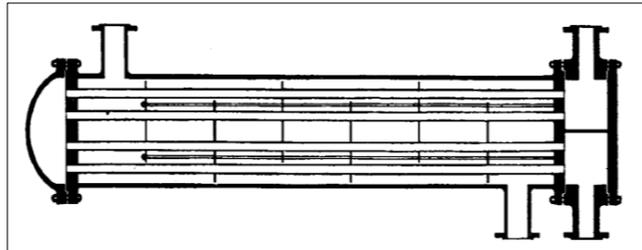


Nombre de la Fuente: (Kern, 1999)

### 4.1.5 Intercambiador 1-2 con cabezal de tubos fijo

Un ejemplo que nos muestra el autor (Kern, 1999), de intercambiador de cabezal de tubos fijo en dos pasos es el de la Figura 4-6. “Esta máquina térmica tiene una configuración donde el fluido de la coraza circula en un paso y el fluido de los tubos en dos pasos, se denomina intercambiador 1-2. Utiliza un cabezal con una división para admitir la entrada y salida del fluido de los tubos por el mismo. En el otro extremo del intercambiador se encuentra instalado una cámara cerrada que permite el cambio de dirección del fluido que fluye por los tubos dando lugar al cambio del primer al segundo paso. Es común para este tipo de intercambiador, que la superficie externa de los tubos sea inasequible para su mantenimiento. En el caso de los tubos es practico limpiarlos quitando la tapa del cabezal e implementando un limpiador rotatorio o un cepillo de alambre. Se debe tener especial cuidado con los inconvenientes por expansión en los intercambiadores 1-2 de cabezal fijo, puesto que ambos pasos, tienden a dilatarse independientemente y causan trabajo en los espejos estacionarios”. (p.164)

**Figura 4-6:** Intercambiador 1-2 de cabezal fijo.



Nombre de la Fuente: (Kern, 1999)

## 4.2 Cálculos térmicos y mecánicos del diseño

Para este trabajo de grado se tomó como referencia el ejercicio 7.4 del libro de Donald kern, (Kern, 1999). Con el fin de poder comprobar los valores obtenidos de acuerdo a la metodología propuesta por el autor, a continuación, el enunciado del mismo:

(Kern, 1999): EJEMPLO 7.4. “Cálculo de un enfriador de agua destilada con agua cruda. 175000 lb/h de agua destilada ingresa con temperatura de 93°F y se espera a su salida un valor de 85°F. El calor debe ser transferido a 280000 lb/h de agua cruda que ingresa del servicio público a 75°F y debe salir del intercambiador a 80°F. Es aceptable una caída de

presión de 10 lb/pulg<sup>2</sup> en ambos trayectos y se intuye un factor de obstrucción de 0.0005 para el agua destilada y 0.0015 para agua cruda cuando la velocidad en los tubos excede a los 6 pie/seg.

Se configura para este proceso un intercambiador de 15.1/4 plg DI, que tiene 160 tubos de 3/4 de plg; DE, de 18 BWG y 16 pies de largo, configurados de manera triangular con espaciado de 15/16 plg. El haz de tubos está arreglado en dos pasos, y los deflectores están espaciados a 12 plg. ¿Es adecuado este intercambiador? “. (p.191-194).

### 4.2.1 Parámetros y Variables de proceso

Se recopilan los valores de las variables (Tabla 4-1) suministradas en la condición del proceso para poder organizarlas y se definen las áreas de circulación para el fluido caliente y el frío. En nuestro caso, en las tablas se define el color terracota para el fluido caliente y el color azul para el fluido frío.

**Tabla 4-1:** Variables de entrada y salida del intercambiador

	T° Entra da	T° sali da	Flujo mási co	Calor especi fico (BTU/ Lb °F)	gravedad especifica $s = \rho_{uiq}/\rho_f$	Viscosi dad (p) g/cm s	Cond. Térmi ca $\frac{BTU}{h \cdot pie \cdot °F}$	Factor de Obstruc ción $\frac{h \cdot pie^2 \cdot °F}{BTU}$	Caída de Presió n Lb/pulg	Masa de Velocid ad Lb/h. pie <sup>2</sup>	Razón de Viscosid ad $\phi = (\frac{\mu}{\mu_w})^0$	Peso especi fico $\rho$ (Lb/ pie <sup>3</sup> )
	T1	T2	W	Cp	s	$\mu$	k	Rd	$\Delta P$	$G_s$	$\phi_s$	$\rho_s$
<b>F. Calient e</b>	93	85	1750 00	1	1	0,81	0,35 7	0,005	7,90	68852 4,6	1	62,5
<b>F. frío</b>	t1 75	t2 80	w 2800 00	Cp 1	s 1	$\mu$ 0,92	k	Rd 0,0015	$\Delta P$ 7,31	$G_t$ 15089 82,0	$\phi_t$ 1	$\rho_t$ 62,5

Nombre de la fuente: Los autores.

También se tiene identificado en la nomenclatura de los fluidos y los cálculos cual es el que va por la coraza y por los tubos. (Tabla 4-2).

**Tabla 4-2:** Relación de subíndices

<b>S (Shell)</b>	Coraza
<b>t (tube)</b>	tubos

Nombre de la fuente: Los autores.

Se debe conocer o establecer los siguientes datos (Tablas 4-3 y 4-4), para diámetros tubería en la coraza, (ver anexo A).

**Tabla 4-3:** Parámetros de diseño coraza

<b>Lado de la Coraza ( Agua destilada)</b>		
<b>OD</b>	16	Inches
<b>ID</b>	15,25	Inches
<b>Espaciado de los deflectores (B)</b>	12	Inches
<b>N° Pasos</b>	1	paso

Nombre de la fuente: Los autores.

La acomodación de los espejos de los tubos (cantidad de tubos Nt) configuración triangular y las dimensiones de tubos se obtienen de las tablas del anexo B y anexo C.

**Tabla 4-4:** Lado de los tubos (Agua Fría)

<b>Lado de los tubos ( Agua Fría)</b>		
<b>Numero tubos (Nt)</b>	160	unidades
<b>L</b>	16	ft
<b>ID</b>	0,652	inches
<b>OD</b>	3/4	inches
<b>BWG</b>	18	espesor
<b>PT</b>	15/16	inches
<b>n</b>	2	pasos
<b>Superficie externa pie lineal</b>	0,1963	$\text{pie}^2 / \text{pie}$

Nombre de la fuente: Los autores.

Para establecer el espaciado el autor (Kern, 1999), nos da unas pautas de los más comunes de acuerdo a los diámetros y arreglos escogidos, se realiza la Tabla 4-5, con base en esta información.

**Tabla 4-5:** Espaciados más comunes tubos (PT)

Espaciados más comunes tubos (PT)		
OD	Arreglo	PT
3/4"	Cuadrado	1"
1"	Cuadrado	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> "
3/4"	Triangulo	15/16"
3/4"	Triangulo	1"
1"	Triangulo	1"

Nombre de la fuente: Los autores.

Una vez establecidos los parámetros anteriores se procede a la realización de los cálculos y aplicación de las fórmulas utilizadas para tal fin. Aquí los describiremos paso a paso.

#### 4.2.2 Balance de Calor

Se utiliza la fórmula de la ley de enfriamiento de newton para conocer la velocidad de la transferencia térmica. (ver ecuación 4.1).

$$Q = WC_p \Delta T, \text{ BTU/h.} \quad (4.1)$$

En las Tablas 4-6 y 4-7, se muestran los valores.

**Tabla 4-6:** Balance de Calor de la coraza

<b>W</b>	175000
<b>T1</b>	93
<b>T2</b>	85
<b>Cp</b>	1
<b>Q. Btu/h</b>	1400000

Nombre de la fuente: Los autores.

**Tabla 4-7:** Balance de Calor de los tubos

w	280000
t1	75
t2	80
Cp	1
<b>Q (Calor)</b>	1400000

Nombre de la fuente: Los autores.

### 4.2.3 Diferencia de T° (°F) verdadera At.

Es la verdadera diferencia de temperatura entre los fluidos de acuerdo a los métodos empleados, la cual involucra la multiplicación entre la diferencia media logarítmica (MLDT) (Tabla 4-8), por el factor corrección de temperaturas FT (Tabla 4-9). (ver ecuación (4.2)).

$$MLDT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \text{ donde, } \Delta T_1 = T_1 - t_2; \text{ y, } \Delta T_2 = T_2 - t_1. \quad (4.2)$$

**FT:** Es un Factor de relación entre la temperatura real y la media logarítmica, se usan los factores R y S para encontrar su valor. (ver anexo D).

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

**Tabla 4-8:** Diferencia de T° media logarítmica.

T1	t2	$\Delta T1$
93	80	13
T2	t1	$\Delta T2$
85	75	10
	<b>MLDT</b>	<b>11,43</b>

Nombre de la fuente: Los autores.

**Tabla 4-9:** Diferencia de T° (°F) verdadera At.

R	1,60
S	0,28
FT	0,945
<b>At</b>	<b>10,82</b>

Nombre de la fuente: Los autores

Cuando  $F_T < 0.75$ , No es practico ni aconsejable realizar el intercambiador, hay que modificar sus parámetros de diseño.

#### 4.2.4 Temperatura Calórica (°F)

Esta se refiere a la temperatura promedio en la que los fluidos viajaran al interior del intercambiador de calor. Se relacionan en la ecuación (4.3) y (4.4).

$$T_c = \frac{T_1 + T_2}{2}, \text{ °F, Lado Caliente (coraza)}. \quad (4.3)$$

$$t_c = \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ °F, Lado Frío (Tubos)}. \quad (4.4)$$

Y se calculan por separado ya los fluidos no se mezclan. (Ver Tablas 4-10 y 4-11).

**Tabla 4-10:** Temperatura Calórica (°F) de la coraza

<b>Tc</b>	89
-----------	----

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-11:** Temperatura Calórica (°F) de los tubos

<b>tc</b>	77,5
-----------	------

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.2.5 Área transversal de flujo

Los formulas empleadas son las siguientes. (ver ecuación (4.5) y (4.6)).

$$a_s = \frac{(D_s)(C')(B)}{144 (P_T)}, \text{pie}^2, \tag{4.5}$$

$$a_t = \frac{(N_t)(a'_t)}{144 n}, \text{pie}^2, \tag{4.6}$$

En la fórmula del área de los tubos, el símbolo  $a'_t$  = área flujo por cada tubo. (ver Anexo C).  
 Los valores para este caso se ilustran en las Tablas 4-12 y 4-13.

**Tabla 4-12:** Área transversal de flujo de la coraza

DI	C'	B
15,3	0,1875	12,0
PT	Cte	
0,9375	144	
<b>a<sub>s</sub></b> (ft <sup>2</sup> )	0,2542	

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-13:** Área transversal de flujo de los tubos

<b>a't</b>	<b>Nt</b>
0,334	160
<b>n</b>	<b>Cte</b>
2	144
<b>at</b>	0,1856

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.6 Masa – Velocidad

Es la relación de flujo másico por el área de flujo transversal. (ver ecuación (4.7)).

$$G = \frac{W}{a_s}, \text{ Lb/ h pie}^2 \quad (4.7)$$

Resultados en las Tablas 4-14 y 4-15.

**Tabla 4-14:** Masa – Velocidad de la coraza

<b>W</b>	175000
<b>a<sub>s</sub></b>	0,2542
<b>G<sub>s</sub></b>	688524,6

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-15:** Masa – Velocidad de los tubos

<b>W</b>	280000
<b>a<sub>t</sub></b>	0,1856
<b>G<sub>t</sub></b>	1508982,0

Nombre de la fuente: Los autores

Una vez obtenido el valor de  $G_t$ , podemos calcular la velocidad de flujo por los tubos, el cual será usado en cálculos posteriores. (ver ecuación (4-8)) y resultado en la Tabla 4-16.

$$V = \frac{G_t}{3600\rho}, \text{ pie/s.} \tag{4.8}$$

**Tabla 4-16:** Velocidad flujo

Velocidad flujo tubos
6,707

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.2.7 Diámetro Equivalente ( $D_e$ y $d_e$ ) únicamente Lado Coraza.

Este diámetro nos indica el espacio libre del lado de la coraza, que es por donde fluiría el agua destilada y dependerá del arreglo en el que se configure los tubos internos, es decir, triangular o cuadrado. Las formulas se relacionan a continuación respectivamente. (ver ecuación (4.9) y (4.10)) y los resultados en las Tabla 4-17 corresponden al arreglo triangular particular para este ejercicio.

$$d_e = \frac{4\left(\frac{PT}{2} - 0.86(PT) - \frac{1}{2}\pi\frac{ODt^2}{4}\right)}{\frac{1}{2}\pi ODt}, \text{ pie,} \tag{4.9}$$

$$D_e = \frac{4\left(P_f^2 - \frac{\pi ODt^2}{4}\right)}{\pi ODt}, \text{ pie,} \tag{4.10}$$

**Tabla 4-17:** Diámetro Equivalente ( $d_e$ )

Arreglo Triangulo ( $d_e$ )	
Kte	PT
4	15/16
Kte	ODt
0,86	3/4

**Tabla 4-17:** (Continuación)

<b>Arreglo Triangulo (de)</b>	
<b>de (in)</b>	0,533
<b>de (pie)</b>	0,0444

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.8 Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura calórica $T_c$ y $t_c$ .

Los valores de viscosidad (ver anexo E y anexo F) se deben calcular a las temperaturas promedio de cada uno de los lados del intercambiador. Para el agua, involucrada en ambos lados de este ejercicio, sus valores son distintos, a pesar de ser el mismo fluido, sin embargo, se encuentran a diferentes temperaturas y es por este motivo su diferencia.

Los valores se dan en centipoises y se multiplican por un factor de conversión para obtener unidades en el sistema inglés Lb/pie.h. (Tablas 4-18 y 4-19).

**Tabla 4-18:** Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura promedio  $T_c$ 

<b>Calculo de viscosidad (<math>\mu</math>)</b>	
<b><math>\mu</math></b>	<b>Kte</b>
0,81	2,42
<b><math>\mu</math> Corregida</b>	1,96

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-19:** Calculo de viscosidad ( $\mu$ ) a la temperatura promedio  $t_c$ 

Calculo de viscosidad ( $\mu$ )	
$\mu$	Kte
0,92	2,42
$\mu$ Corregida	2,23

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.2.9 Calculo Numero de Reynolds

Recordar que el valor es adimensional. (ver ecuación (4.11)). Resultados en las Tablas 4-21 y 4-22.

$$Re = \frac{(Di)(G_T)}{\mu}, \text{ adimensional} \quad (4.11)$$

**Tabla 4-20:** Calculo Numero de Reynolds de la coraza

Calculo Numero de Reynolds		
de	Gs	$\mu$
0,0444	688524,6	1,96
	<b>Re</b>	15607

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-21:** Calculo Numero de Reynolds de los tubos

Calculo Numero de Reynolds		
ID (pies)	Gs	$\mu$
0,0543	1508982	2,23
	Re	36825

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.10 Factor de Transferencia ( $j_H$ )

Se obtiene de la correlación con el número de Reynolds de una gráfica de transferencia térmica del fluido caliente (coraza) con haz de tubos con deflectores segmentados 25%. (ver anexo G). Es producto de pruebas experimentales. El valor obtenido en la Tabla 4-23.

**Tabla 4-22:** Factor de Transferencia de la coraza ( $j_H$ )

Factor de Transferencia ( $j_H$ )	
$(j_H)$	73

Nombre de la fuente: Los autores

Para el lado de los tubos, se obtiene el coeficiente de transferencia de calor (Tabla 4-24) directamente de la gráfica en la figura 25 del libro de (Kern, 1999). (ver anexo H)

**Tabla 4-23:** Coeficiente Transferencia de calor, agua en los tubos

Coeficiente Transferencia de calor	
$(h_i)$ Fig. 25	1350
F. Corrección	0,99
$(h_i)$	1336,5
$(h_{io})$	1162

Nombre de la fuente: Los autores

A continuación, se relacionan las fórmulas matemáticas usadas para la obtención de los datos en caso de que no se coincidan con los valores de las gráficas de correlación o se utilicen otros fluidos. (ver ecuación (4.12) y (4.13)).

$$(j_H) = \frac{h_o D_e}{K} \left(\frac{c\mu}{K}\right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_\omega}\right)^{-0.14} \quad (4.12)$$

$$h_{io} = h_i \frac{ID}{OD}, \text{ BTU/h.pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (4.13)$$

### 4.2.11 Numero de Prandtl

Se registran los valores obtenidos en la Tablas 4-25, para el valor de conductividad (Tabla 4-26) se calculan de acuerdo al rango de la tabla (ver anexo I) usando la fórmula de interpolación.

**Tabla 4-24:** Numero de Prandtl de la coraza

Numero de Prandtl		
Cp	K	$\mu$
1,0000	0,36	1,96
	Pr	1,76

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.2.12 Coeficiente transferencia de calor

De acuerdo con los valores obtenidos anteriormente y aplicando la fórmula (ver ecuación (4.14)) para hallar el coeficiente de convección de calor por la coraza obtenemos el valor en la Tabla 4-26.

$$h_o = \frac{j_{HK}}{d_e} \left(\frac{c\mu}{K}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_\omega}\right)^{0.14}, \text{ BTU/h. pie}^2. \text{ }^\circ\text{F.} \quad (4.14)$$

**Tabla 4-25:** Coeficiente transferencia de calor de la coraza.

Coeficiente transferencia de calor		
$(j_H)$	K	de (pie)
73	0,36	0,0444
Cp	Pr	$\phi_s$
1	1,76	1
	$h_o$	1036

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.2.13 Temperatura de la pared del tubo ( $t_w$ )

(Kern, 1999) “los valores mínimos, resultado de las restas entre las temperaturas calóricas, excluyen la necesidad de rectificar este parámetro en el área superficial del tubo, dato inicial de la razón de viscosidad.  $\phi_s = 1$ ”

En caso contrario, donde se deba calcular la temperatura de la pared del tubo en la coraza se debe aplicar la fórmula para este fin. (ver ecuación (4.15)).

$$t_w = t_c + \frac{h_o/\phi_s}{h_{io}/\phi_t + h_o/\phi_s} (T_c - t_c), \text{ }^\circ\text{F.} \quad (4.15)$$

Posterior a la obtención de la temperatura de la pared, se debe calcular la viscosidad del fluido con respecto a este nuevo dato y despejar el valor de la viscosidad en la pared de la fórmula de razón de viscosidad  $\phi_s$ . (ver ecuación (4.16)).

$$\phi_s = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (4.16)$$

y aplicar finalmente el factor de conversión de centipoise a Lb/ pie hora.

#### 4.2.14 Coeficiente Total $U_c$

Se relaciona la fórmula para calcular este coeficiente. (ver ecuación (4.17)). Y los resultados en la Tabla 4-27.

$$U_c = \frac{h_{io}h_o}{h_{io}+h_o}, \text{ BTU/h. pie}^2. \text{ }^\circ\text{F} \quad (4.17)$$

**Tabla 4-26:** Coeficiente Total  $U_c$

Coeficiente Total $U_c$	
$(h_{io})$	$h_o$
1162	1036
$U_c$	547,5

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.15 Coeficiente Total de Diseño $U_D$

Para obtener nuestro cálculo de diseño térmico debemos primero calcular el área de transferencia de calor (ver ecuación (4.18)) entre los dos fluidos de acuerdo al diámetro de los tubos internos, resultados en la Tabla 4-28. Con el dato obtenido del cálculo anterior y reemplazando los valores requeridos (ver ecuación (4.19)), obtenemos nuestro coeficiente total de diseño, y los resultados en la Tabla 4-29.

$$A = Nt * L * (\text{Sup. externa/pie}), \text{ pie}^2/\text{pie} \quad (4.18)$$

$$U_D = \frac{Q}{(A)(A_t)}, \text{ BTU/h. pie}^2. \text{ }^\circ\text{F} \quad (4.19)$$

**Tabla 4-27:** Área Transferencia (A)

Área Transferencia (A)			
P (in)	Sup externa $\pi d^2 / \pi d$	Numero tubos ( Nt)	L (pie)
2,3562	0,1963	160	16
A			502,7

Nombre de la fuente: Los autores

**Tabla 4-28:** Coeficiente total de diseño

Coeficiente total de diseño $U_c$		
Q	$A_t$	A
1400000	10,82	502,7
$U_D$	257,3	

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.16 Factor de Obstrucción $R_d$

Finalmente, el cálculo del factor de obstrucción (ver ecuación (4.20)) en el diseño térmico nos representa una especie de resistencia al flujo de calor por acumulación de suciedad o impureza en uno o ambos lados de la superficie de los tubos. Resultados en la Tabla 4-30.

$$R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c U_D}, h \cdot \pi d^2 \cdot \text{°F} / \text{BTU} \quad (4.20)$$

**Tabla 4-29:** Factor de Obstrucción  $R_d$ 

$U_c$	$U_D$
547,5	257,3
<b>Rd</b>	0,0021

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.2.17 Cálculo factor de fricción ( $f$ )

Se calcula en una gráfica que relaciona el número de Reynolds, para el caso de la coraza. Para haces de tubos con deflectores segmentados al 25%. (ver anexo J). El valor obtenido se muestra en la Tabla 4-31.

**Tabla 4-30:** Calculo factor de fricción ( $f$ ) de la coraza

factor de fricción ( $f$ )	
Re	15607
$f$	0,0019

Nombre de la fuente: Los autores

Se calcula en una gráfica que relaciona el número de Reynolds, para el caso de los Tubos. (ver anexo K). El valor obtenido se muestra en la Tabla 4-32.

**Tabla 4-31:** Calculo factor de fricción ( $f$ ) de los tubos

factor de fricción ( $f$ )	
Re	15607
$f$	0,0019

Nombre de la fuente: Los autores

Las unidades del factor de fricción vienen dadas en  $\frac{pie^2}{pulgadas^2}$ .

#### 4.2.18 Cálculo Caída de presión ( $\Delta P$ )

Antes del cálculo del delta de presión del lado de la coraza, se debe conocer el número de cruces (N+1) (ver ecuación (4.21)), el cual indica la cantidad de ocasiones que el fluido cambiará de dirección durante su recorrido a través de la misma y después se reemplazan los valores dentro de la ecuación (4.22). (Tabla 4-33).

$$N + 1 = 12 \frac{L}{B}, \text{ Pie.} \quad (4.21)$$

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot (G_s^2) (ID_s) (N+1)}{(5.22 \cdot 10^{10}) (d_e) (s) \phi_s}, \text{ Lb/pulg}^2. \quad (4.22)$$

**Tabla 4-32:** Cálculo delta presión ( $\Delta P$ ) coraza

Numero de cruces (N+1)		
Kte	L	B
12	16	12
	N+1	16
ID (in)	ID (pie)	De ó de
15,25	1,271	0,0444
f	Gs	Kte
0,0019	688524,6	5,22E+10
s	$\phi_s$	
1	1	
	$\Delta P_s$	<b>7,90</b>

Nombre de la fuente: Los autores

El cálculo del delta de presión en el lado de los tubos  $\Delta P_T$ , se obtiene por la sumatoria del delta de presión  $\Delta P_t$  (trayecto Paso-1) y el delta de presión de pérdida de regreso denominado  $\Delta P_r$  (trayecto Paso-2) contemplado por el cambio de dirección del fluido al inicio del segundo paso.(ver ecuaciones (4.23), (4.24) y (4.25)). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-34.

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_r, \text{ Lb/ pulg}^2. \tag{4.23}$$

$$\Delta P_t = \frac{(f)(G_t^2)(L)(n)}{(5.22 \cdot 10^{10})(ID_t)(s)\phi_t}, \text{ Lb/ pulg}^2. \tag{4.24}$$

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \frac{V^2}{2g} \frac{\rho}{144}, \text{ Lb/pulg}^2. \tag{4.24}$$

**Tabla 4-33:** Calculo delta presión ( $\Delta P$ ) tubos

<b>L</b>	<b>ID (pie)</b>	<b>n</b>
<b>f</b>	0,054	2
	<b>Gt</b>	<b>Kte</b>
0,00019	1508982,0	5,22E+10
<b>S</b>	<b><math>\phi_t</math></b>	
1	1	
	<b><math>\Delta P_t</math></b>	4,88
<b>kte</b>	<b>V</b>	<b>Kte (gravedad)</b>
4	6,707	32,2
<b><math>\rho</math></b>	<b>kte</b>	<b>kte</b>
62,5	144	2
	<b><math>\Delta P_r</math></b>	2,43
	<b><math>\Delta P_T</math></b>	<b>7,31</b>

Nombre de la fuente: Los autores

La caída de presión en ambos lados del intercambiador es menor al límite permitido, el cual, es de 10 Lb/in<sup>2</sup> por cada lado. El intercambiador cumple con las condiciones de diseño térmico y mecánico.

### **4.3 Software de Simulación- Solidwork**

El software CAD SOLIDWORKS es una herramienta informática de automatización de diseño mecánico nos facilita como diseñadores visualizar y materializar ideas con mayor velocidad y precisión, a su vez ensayar con operaciones y cotas, obtener modelos y ensamblajes detallados.

El objetivo es proporcionar a los analistas de diseño el conocimiento necesario para incorporar esta poderosa herramienta con éxito en el proceso de diseño y de esta manera permitarnos la utilización y adaptación a los recursos que ofrece el software.

El software SOLIDWORKS nos brinda herramientas y opciones de interfaz de usuario que proporcionan la creación y edición de los modelos, además permite llevar a cabo cada una de las tareas al mismo tiempo que le va proporcionando información.

Es indispensable que antes de iniciar el proyecto de diseño planee un método de creación del modelo, puesto que la intención del diseño es una cuestión principalmente de planificación, esto ayuda a que más adelante no tenga que volver a diseñar la tarea.

La manera en que se crea el modelo determina cómo lo afectan los cambios cuanto más cerca estén su implementación del diseño y la intención de este, mayor será la integridad del modelo.

SolidWorks Simulation le permite conocer las funciones y los beneficios de utilizar el software con el objetivo de proporcionar a los analistas de diseño el conocimiento necesario para incorporar esta poderosa herramienta de simulación con éxito en el proceso de diseño de ingeniería.

Sólo las herramientas de validación de SolidWorks Simulation brindan una perfecta integración con el software de CAD en 3D SolidWorks, con el beneficio de contar con la

sencilla interfaz de usuario de Windows. Una vez que aprenda a interactuar con el software podrá realizar análisis de tensión, térmicos, optimización y fatiga.

Además, cuenta con aplicaciones como SolidWorks Motion que permite realizar simulaciones de movimiento, SolidWorks Flow Simulation para realizar análisis de flujo de fluidos en sus diseños. (Hirschtick, 1995)

### 4.3.1 Croquizado de las piezas del intercambiador de calor

Antes de iniciar la construcción del diseño se realiza la planificación del mismo y se establecen las medidas para cada elemento (ver Tabla 4-34) constructivo de acuerdo a los parámetros de nuestro ejercicio.

**Tabla 4-34:** Parámetros de diseño

Datos para el diseño					
Pieza	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno (mm)	Longitud (mm)	Cantidad	Material/Observaciones
Carcaza Tubo de acero inoxidable	406.4	387.34	4628.8	1	Acero inoxidable
Carcaza-Brida 16"		387.34	127	2	Acero inoxidable
Boquilla-Brida 3"		77.92	70	4	Acero inoxidable
Pieza	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno (mm)	Longitud (mm)	Cantidad	Material/Observaciones
Boquilla-Niple de 3"		77.92	96.8	4	Acero inoxidable
Cabezal fijo + brida 16"	406.4	387.34	416	1	Acero inoxidable
Cabezal fijo con facilidad entrada y salida + brida 16"	406.4	387.34		1	Acero inoxidable

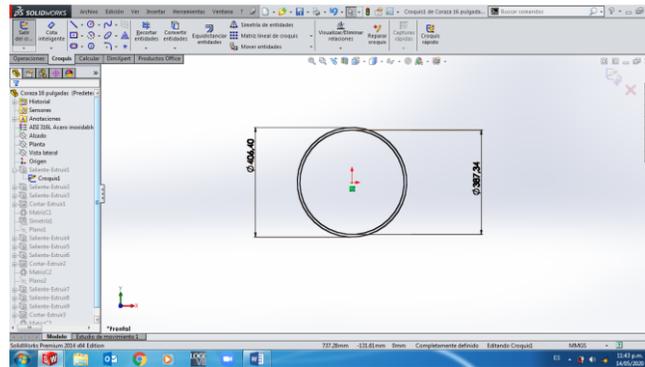
**Tabla 4-34:** Continúa

Lamina división Cabezal con facilidades	N.A	N.A		1	Acero inoxidable
Tubos internos	19.05	16.5608	4882.8	160	Cobre
Baffle Deflector sello coraza	387.34	N.A	3	2	Aluminio
Baffle Deflector segmentado 25%	387.34	290.505	3	15	Aluminio
PT			23.8125		Arreglo triangular
C'			4.7625		Arreglo triangular
Tapón simulación	77.92	N.A	50	4	Boquillas de entrada y salida.

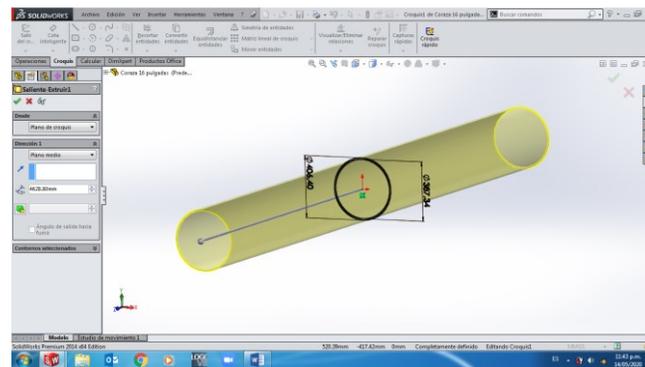
Nombre de la fuente: Los autores

Teniendo en cuenta el trabajo de grado donde se diseña un intercambiador de calor de tubos y coraza utilizando el software solidworks, nos permitimos a continuación hacer la breve descripción mediante un paso a paso del diseño

Para la construcción del diseño de la coraza, se inicia por el coquizado en el plano alzado y con la herramienta circulo (figura 4-7) se realizan las figuras de lo que será el tubo de 16", se acotan los círculos con las medidas de la tubería y por último se usa la herramienta de extrusión para darle forma cilíndrica a los círculos concéntricos (figura 4-8), se ingresan las medidas de longitud de acuerdo a los cálculos realizados para el diseño, de igual forma se continúa la construcción de los diámetros correspondientes a las bridas y niples.

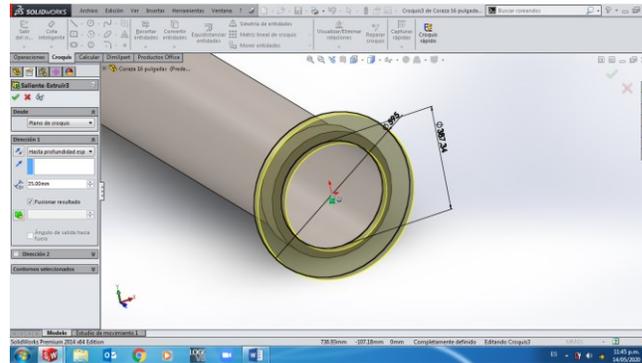
**Figura 4-7:** Croquis tubo de la carcaza

Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-8:** Acción saliente extrusión tubería

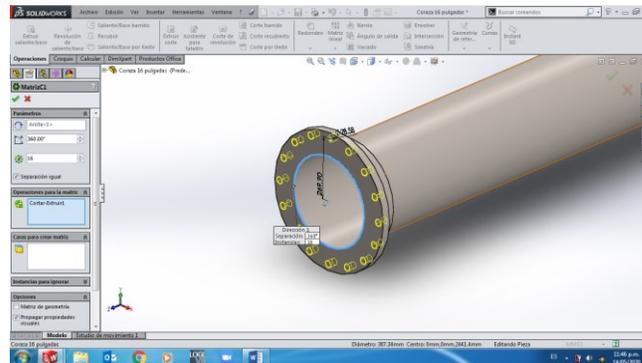
Nombre de la fuente: Los autores

En el caso de las bridas que van unidas a la coraza hay que tomar un nuevo croquis, realizamos un círculo y empezamos a darle forma a la pieza con ayuda de diferentes operaciones modelamos hasta que el dibujo quede con las siguientes dimensiones: Weldneck Flange 16" 150# RF SCH-STD, 16 Orificios de 1 1/8" diámetro y Weldneck Flange 3" 150# RF Sch- STD, 4 Orificios DE 5/8", ver figura 4-9.

**Figura 4-9:** Construcción de bridas

Nombre de la fuente: Los autores

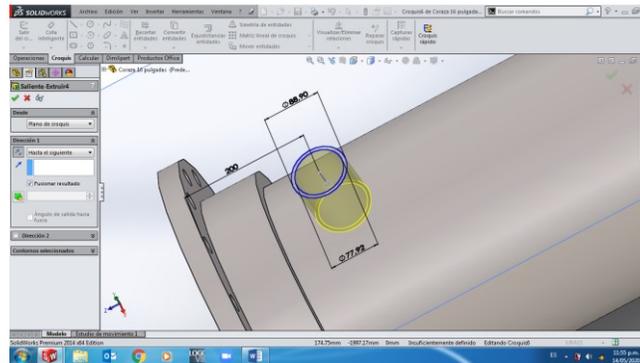
Para realizar los orificios de la brida se utiliza una función llamada extruir corte para realizar una perforación al cuerpo de la brida y posteriormente se replica este corte con la función matriz circular para que se repita esta acción en el resto de la circunferencia de referencia. (Figura 4-10).

**Figura 4-10:** Orificios de la brida 16”.

Nombre de la fuente: Los autores

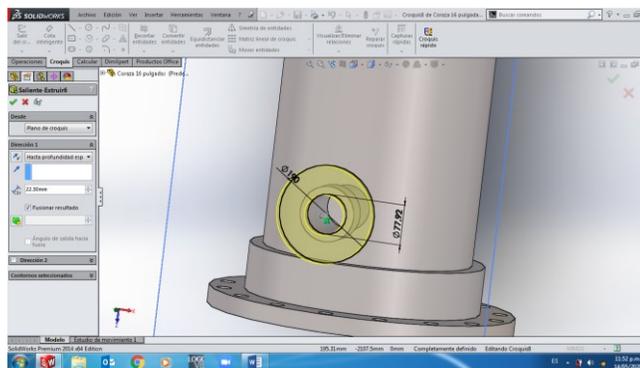
Para la construcción de la brida de 3” y el niple que la unirá a la coraza se cambia el plano de trabajo hacia el plano planta y se agrega una geometría de referencia del mismo plano, se elige como croquis y se realiza la construcción de la misma forma que en los pasos anteriores. (ver figura 4-11, Figura 4-12 y Figura 4-13).

**Figura 4-11:** Niple conexión 3”



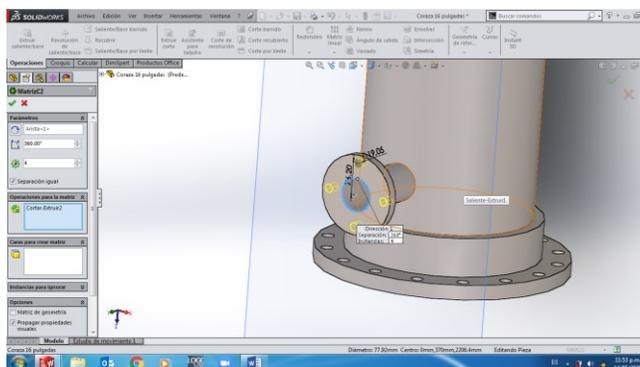
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-12:** Extrusión saliente Breda de 3”



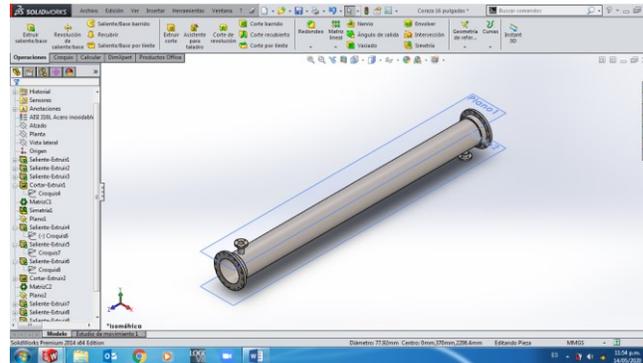
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-13:** Breda de 3” terminada.



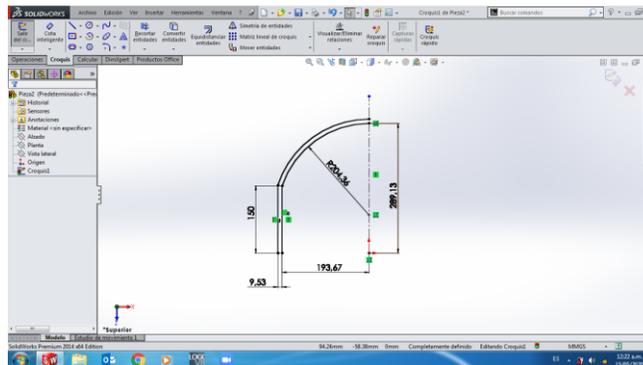
Nombre de la fuente: Los autores

Finalmente se termina el diseño de la corza del intercambiador y sus piezas asociadas. (Figura 4-14).

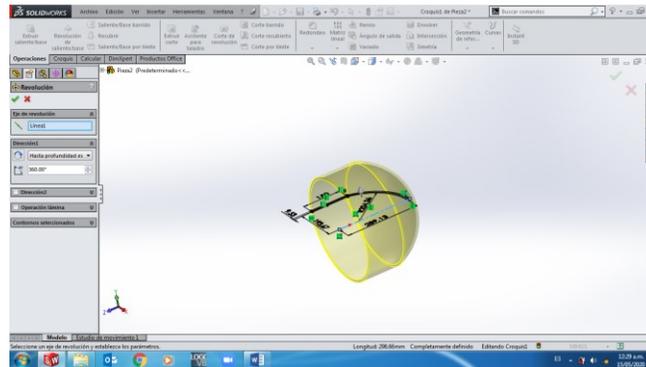
**Figura 4-14** Diseño terminado coraza 16”

Nombre de la fuente: Los autores

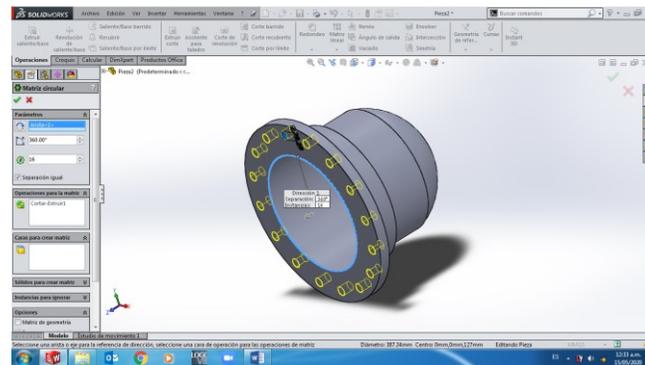
La siguiente figura es el cabezal fijo el cual fue diseñado a partir de un nuevo croquis donde se dibujó con sus respectivas medidas (Figura 4-15): La pieza que forma la cámara la cual permite que el fluido pase del primer paso al segundo se llama Cap obtenida a través de la opción revolución de saliente/base. (Figura 4-16) y se agrega el diseño de la brida con base en una Weldneck Flange 16” 150# RF SCH-STD, 16 Orificios de 1-1/8” diámetro (Figura 4-17),

**Figura 4-15:** Croquis cabezal fijo cerrado

Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-16:** Cap del cabezal fijo

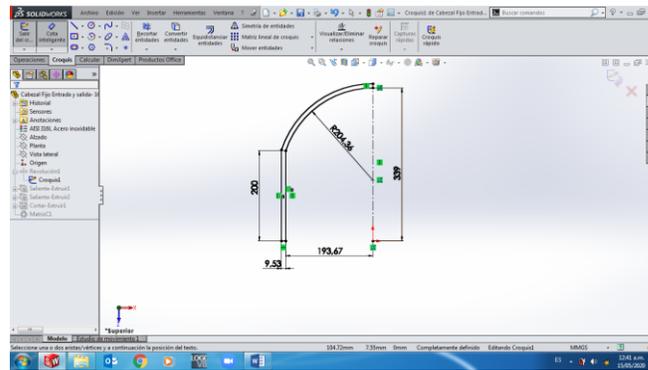
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-17:** Conexión bridada 16" cabezal fijo

Nombre de la fuente: Los autores

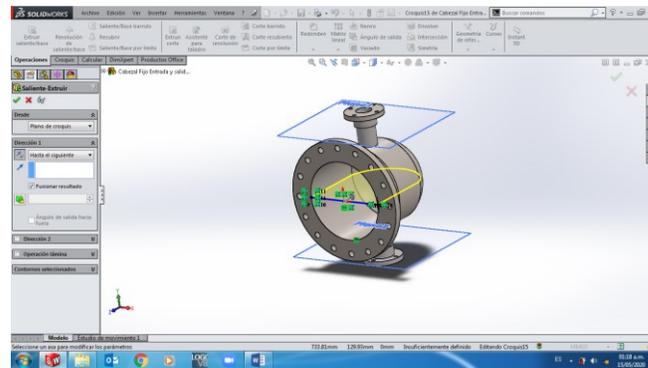
Tomando el diseño anterior de cabezal fijo como referencia podemos realizar esta pieza agregando unas modificaciones a la longitud del tubo (Figura 4-18), el cual cuenta con unos accesorios adicionales llamados boquillas de ingreso y salida del fluido frio que son: 2 Weldneck Flange 3" 150# RF Sch- STD 4 Orificios de  $\frac{3}{4}$ " (Figura 4-19) además tiene una división en el interior de la cámara que permite separar la entrada y salida del fluido que va por el interior de los tubos. (Figura 4-20).

**Figura 4-18:** Croquis cabezal con facilidades entrada y salida.



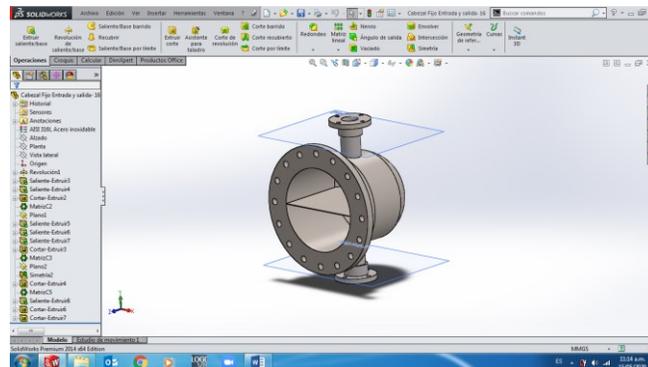
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-19:** Boquillas de entrada y salida de fluido en cabezal.



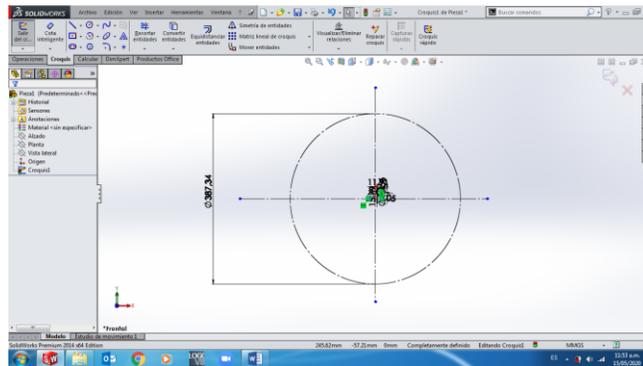
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-20:** Cabezal terminado con lamina divisoria.

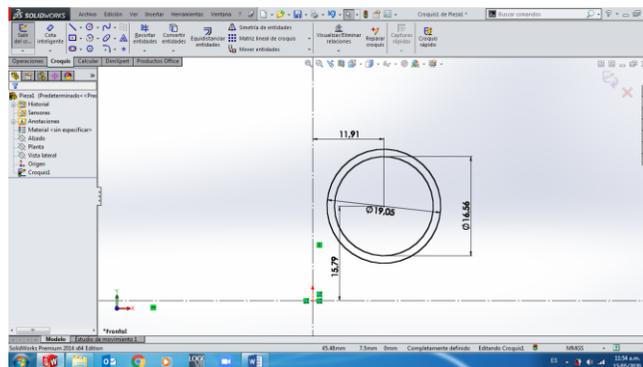


Nombre de la fuente: Los autores

Luego a través de un nuevo croquis dibujamos un círculo cuya medida es el diámetro interno de la coraza (Figura 4-21). Una vez realizado, dentro del mismo círculo dibujamos un círculo mucho más pequeño con un diámetro externo de  $\frac{3}{4}$ ". (Figura 4-22)

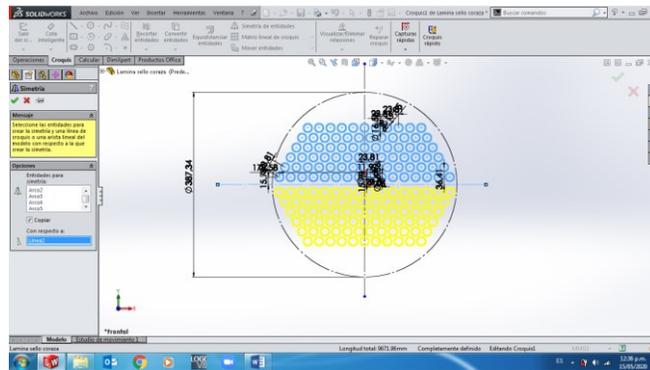
**Figura 4-21:** Croquizado geometría referencia tubos y deflectores.

Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-22:** Croquizado tubo de  $\frac{3}{4}$ ".

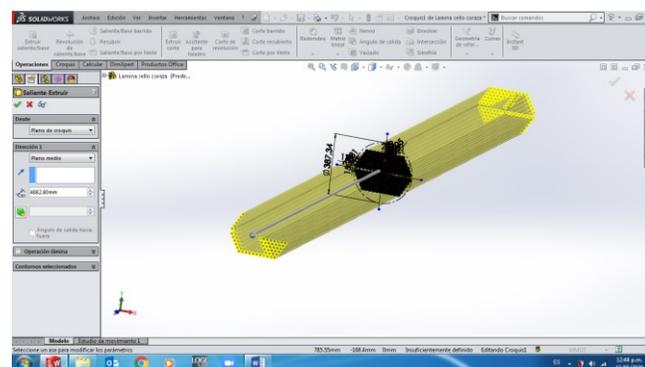
Nombre de la fuente: Los autores

Ahora con ayuda de una matriz lineal y de simetría logramos obtener una configuración del total de orificios en arreglo triangular que necesitamos cumpliendo con los requerimientos de diseño, espaciado (PT) de 23,8125 mm entre centros de círculos, distancia claro (C') de 4.7625 mm y el arreglo triangular (Figura 4-23); en dicha placa se puede observar los 160 agujeros que se han realizado para representar los tubos, 80 para la ida y 80 para la vuelta.

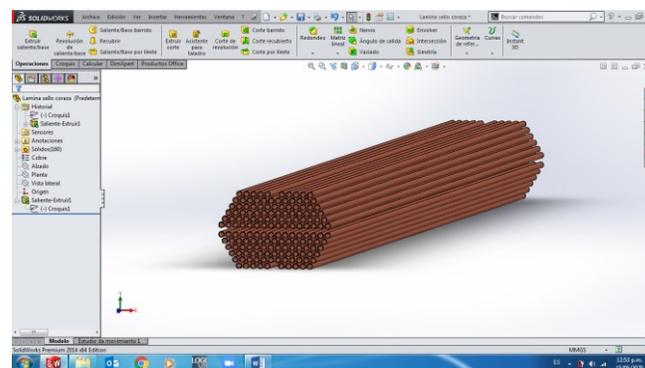
**Figura 4-23:** Matriz lineal y de simetría tubos internos.

Nombre de la fuente: Los autores

Finalmente, con la función de saliente extrusión formamos los tubos y damos el valor correspondiente a su longitud (Figura 4-24) y terminamos el diseño de los tubos. (Figura 4-25).

**Figura 4-24:** Tubos internos intercambiador.

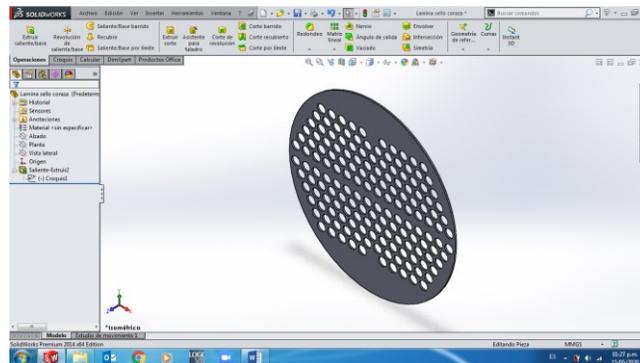
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-25:** Tubos terminados

Nombre de la fuente: Los autores

Finalizados los tubos internos y tomando como referencia el mismo croquis, podemos obtener los baffles deflectores (Figura 4-26) que darán sello al fluido contenido en la coraza y el contenido del lado de los tubos que fluye por los cabezales fijos.

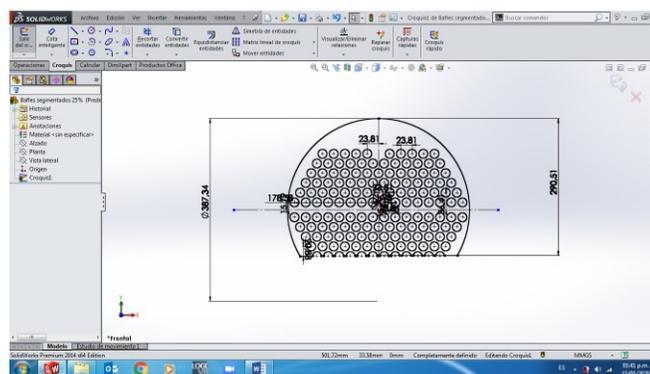
**Figura 4-26:** Baffle deflector sello



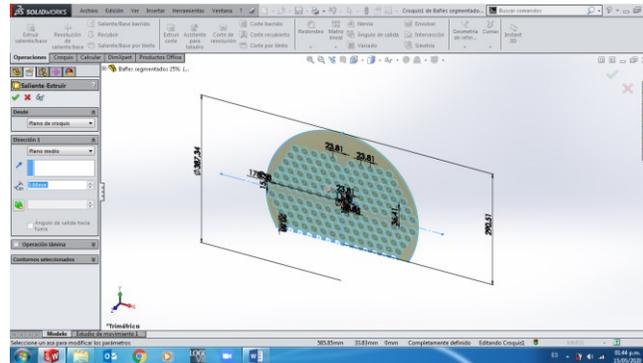
Nombre de la fuente: Los autores

Para los baffles deflectores segmentados se requiere realizar una modificación en el diámetro del croquis, acotándolo a 290.505 mm (Figura 4-27) y haciendo un recorte de las entidades que se encuentran en exceso. Se realiza la misma saliente extrusión del paso anterior (Figura 4-28) y se obtiene el deflector segmentado al 25%. (Figura 4-29).

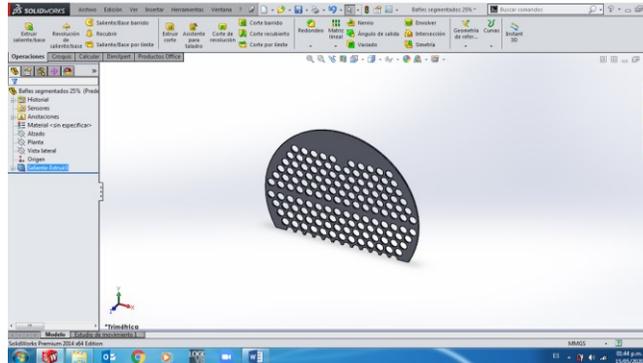
**Figura 4-27:** Croquis deflector segmentado



Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-28:** Saliente extrusión deflector segmentado

Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-29:** Deflector segmentado 25% terminado

Nombre de la fuente: Los autores

### 4.3.2 Ensamble de las piezas

Una vez se realizan todas las piezas se abre un archivo nuevo de ensamble y se agregan los componentes diseñados (Figura 4-30). Se crean relaciones de posición entre ellas para poder acoplarlas, se da el distanciamiento de los deflectores segmentados al interior de la carcasa (Figura 4-31) y obtenemos el ensamble del equipo completo. (Figura 4-32).

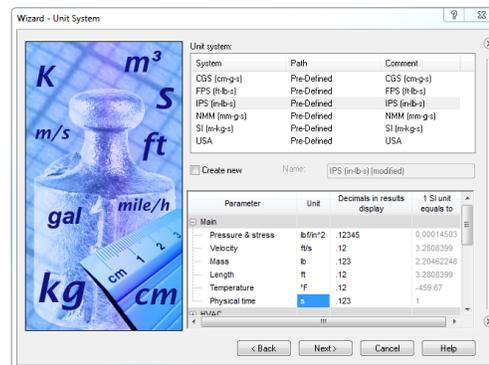


### 4.3.3 Simulación del modelo (Flow Simulation)

Para poder realizar la simulación el software debe reconocer el volumen del equipo, como cerrado o finito, para esto se crea un tapón que se instala en cada una de las boquillas de entrada y salida del intercambiador. Se realiza la activación del complemento de solidwork flow simulation y se inicia con el asistente de simulación.

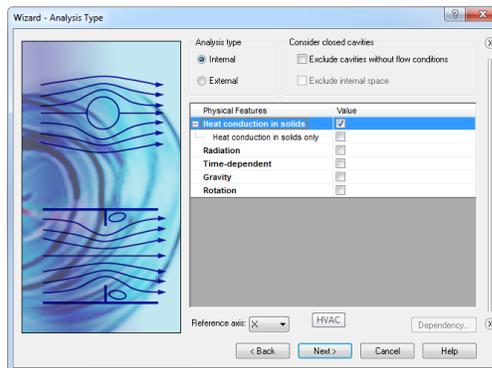
El primer paso es la creación de un nuevo proyecto en el asistente al cual damos el nombre pertinente a nuestro intercambiador de calor de tubos y coraza, posterior se establece el sistema de unidades que queremos manejar, en nuestro caso se escogió el sistema inglés (Figura 4-33).

**Figura 4-33:** Configuración Sistema de Medidas.



Nombre de la fuente: Los autores

El tipo de análisis escogido es flujo interno y quitamos la selección que excluye las cavidades sin condiciones de flujo para que tenga en cuenta todos los espacios del diseño, por último, seleccionamos la opción de transferencia de calor en sólidos (por conducción). (Figura 4-34).

**Figura 4-34:** Configuración tipo de análisis.

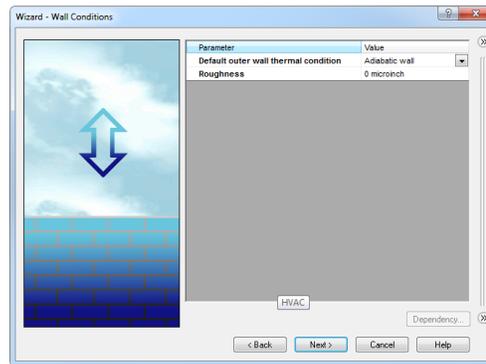
Nombre de la fuente: Los autores

Luego escogemos el líquido que vamos a usar en la simulación para nuestro caso es agua y escogemos el tipo de flujo, es decir, laminar o turbulento o en este caso ambos por las condiciones del proceso. (Figura 4-35).

**Figura 4-35:** Configuración de fluidos y tipo de flujo.

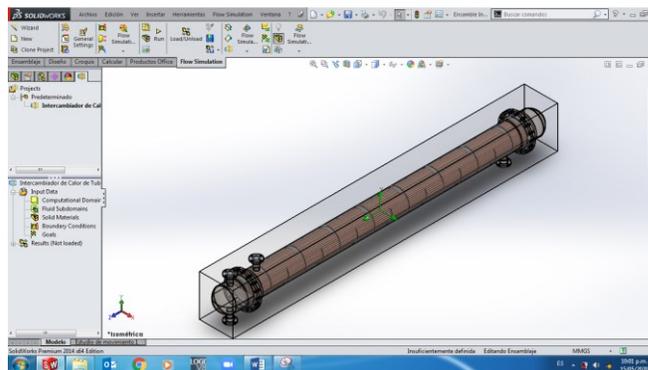
Nombre de la fuente: Los autores

Y en el último parámetro del asistente seleccionamos las condiciones térmicas de la pared externa de la coraza como adiabática, es decir, no presenta intercambio de calor con el entorno. (Figura 4-36)

**Figura 4-36:** Configuración condición adiabática

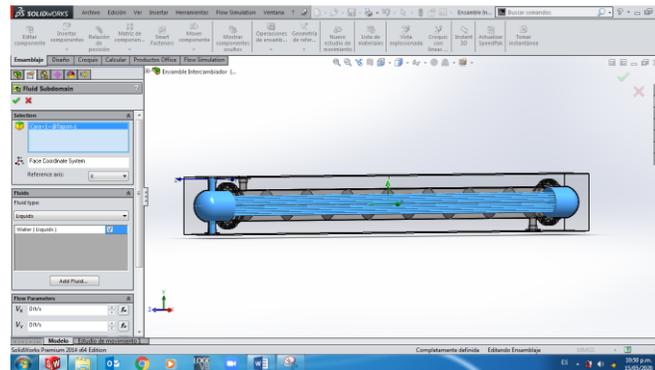
Nombre de la fuente: Los autores

Damos finalizar al asistente ya que las condiciones iniciales del proceso las vamos a configurar manualmente, inmediatamente el software reconoce el volumen de control que se va a simular y lo encierra en un recuadro como el que se observa en la Figura 4-37.

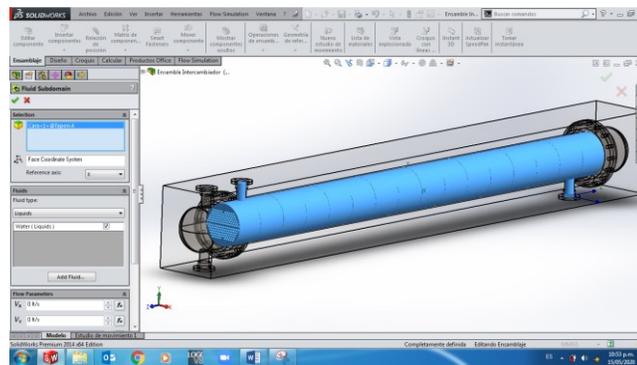
**Figura 4-37:** Volumen de control definido

Nombre de la fuente: Los autores

Posteriormente volvemos al entorno de diseño, en donde nos aparece una pestaña llamado flow simulation, del lado izquierdo inferior se encuentra el menú de opciones para ingresar los datos de la simulación. Empezamos por el fluid subdomains, dando clic derecho, se despliega la opción insertar y se abre la ventana donde ingresamos los datos de entrada del fluido y su posición en el ensamble, para nuestro caso es el agua para los dos volúmenes del intercambiador, pero por áreas de flujo distintas, se observan en la Figura 4-38 el volumen que ocupara el agua fluyendo por los tubos y en la Figura 4-39 el volumen del agua fluyendo por la coraza.

**Figura 4-38:** Volumen seleccionado para los tubos

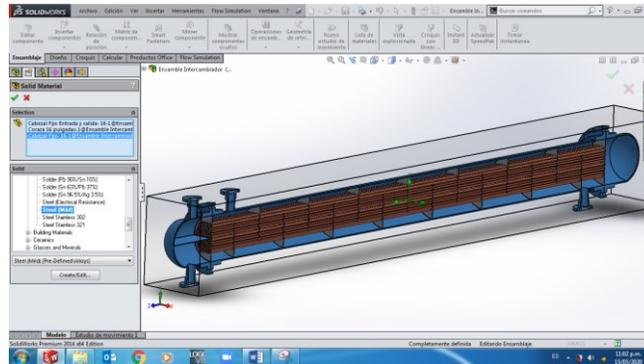
Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-39:** Volumen de flujo seleccionado para la Coraza

Nombre de la fuente: Los autores

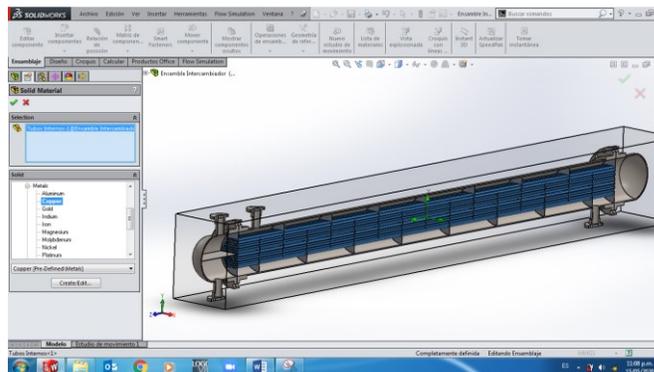
Asignamos ahora los materiales para cada componente del intercambiador en la opción solid materials, apoyándonos en una vista de sección (Figura 4-40) desde el plano lateral y se va seleccionando el material y el componente o pieza del intercambiador. Para nuestros componentes (Figura 4-41) los materiales asignados se muestran en la Tabla 4-34 datos de diseño.

**Figura 4-40:** Vista de sección Intercambiador y selección de material carcaza y cabezales fijos.



Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-41:** Asignación de material tubos internos

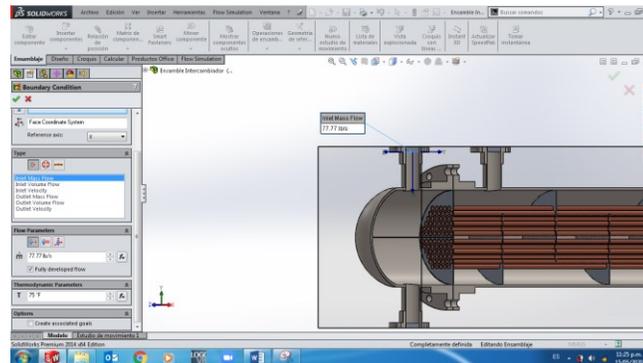


Nombre de la fuente: Los autores

Posterior a la asignación del material, se configuran las condiciones de frontera del proceso del intercambiador de calor, a cada lado de flujo y se ingresan los parámetros de los fluidos, como flujo másico y temperatura de entrada.

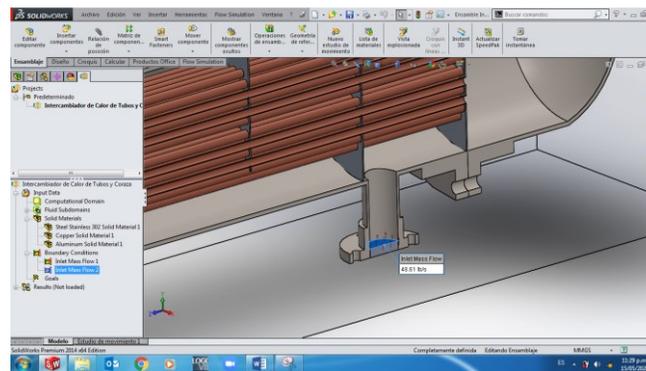
Para el caso del agua fría que fluirá por los tubos, se digitan los valores de 77,77 Lb/s y 75°F de entrada. (Figura 4-42) y para la entrada de agua destilada se digitan los valores de 48,61 Lb/s y 93 °F. correspondientes a nuestro ejercicio. (Figura 4-43).

**Figura 4-42:** Condiciones de frontera Agua fría



Nombre de la fuente: Los autores

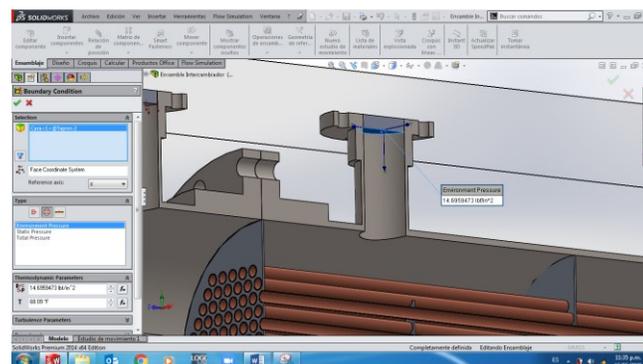
**Figura 4-43:** Condiciones de frontera Agua destilada



Nombre de la fuente: Los autores

Nuevamente en la misma opción de configuración de las fronteras se inserta una nueva condición a las salidas de los dos lados de flujo, estas se configuran individualmente para que simulen condiciones de presión atmosférica o medio ambiente, 14.7 psi. (Figura 4-44).

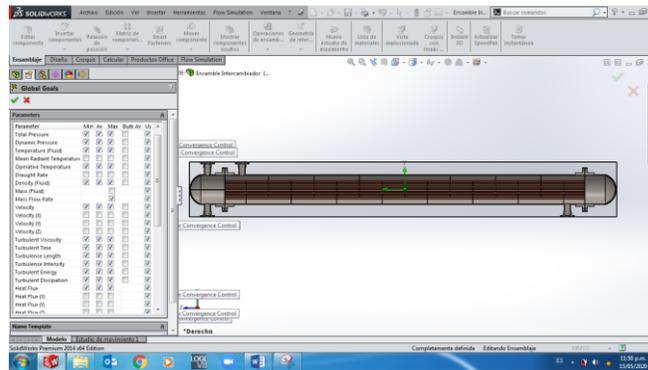
**Figura 4-44:** Salida fluido carcasa a presión atmosférica



Nombre de la fuente: Los autores

Finalmente escogemos los resultados de los parámetros que queremos obtener en la simulación, en la opción goals nos abre una ventana con los parámetros que podemos obtener de la simulación, como temperaturas, presión, etc. En la Figura 4-45 se muestra un pantallazo de estas variables.

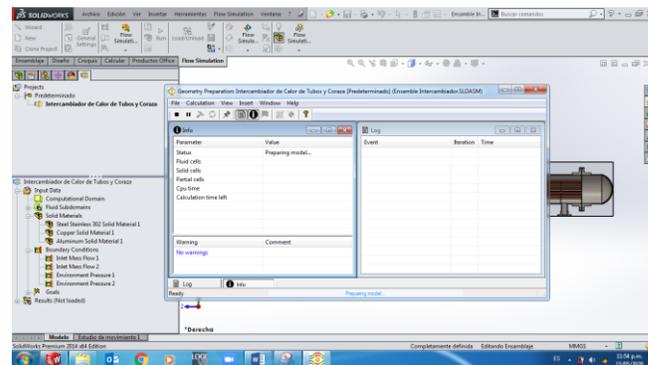
**Figura 4-45:** Variables calculables por el simulador



Nombre de la fuente: Los autores

Finalmente se da inicio a la simulación y se espera que el sistema realice las operaciones para obtener los resultados y el informe de acuerdo a los requerimientos para su posterior análisis. (Figura 4-46).

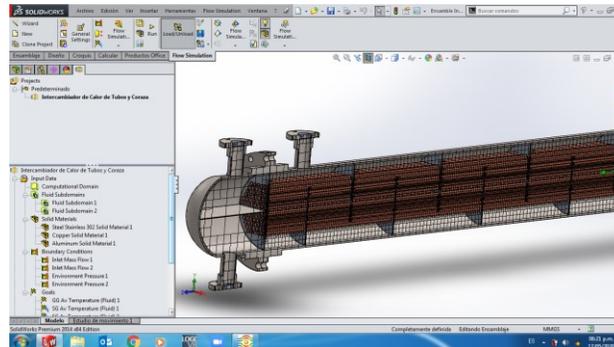
**Figura 4-46:** Inicio de la simulación



Nombre de la fuente: Los autores

El simulador a través de la herramienta solver da inicio a la preparación de la malla del modelo (Figura 4-47) con lo cual se obtiene la precisión de la simulación, entre más refinamiento de malla mayor es la precisión, la desventaja de esta opción es que incrementa el tiempo de solución del modelo.

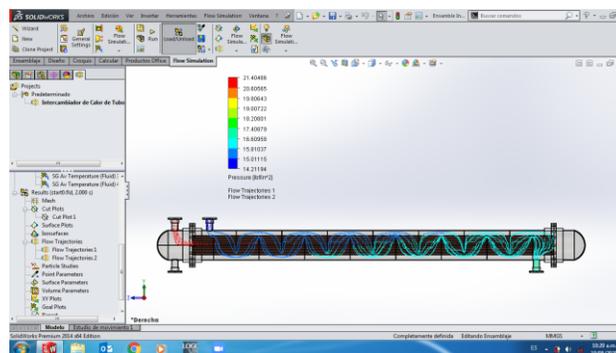
**Figura 4-47:** Malla del modelo para simulación



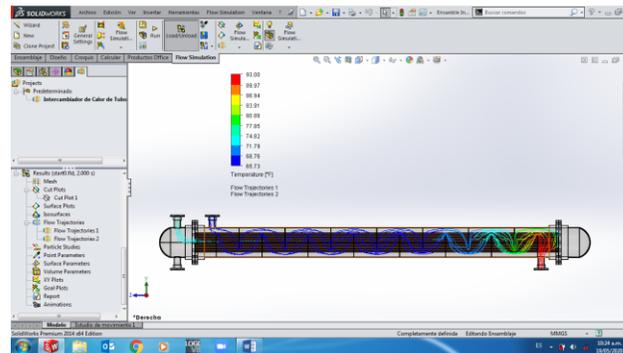
Nombre de la fuente: Los autores

Una vez realizada la simulación se cargan los datos al sistema al ensamblaje y se procede a evidenciar los resultados a través de las herramientas del complemento, con el fin de visualizar lo que el sistema ha calculado con base en la información suministrada y podemos descargar el reporte de la misma. Aquí unos ejemplos de las trayectorias de presión (Figura 4-48) y temperatura (Figura 4-49) del modelo en un tiempo parcial de 2 segundos.

**Figura 4-48:** Trayectorias comportamiento de presión (2 segundos)



Nombre de la fuente: Los autores

**Figura 4-49:** Trayectorias comportamiento de presión (2 segundos)

Nombre de la fuente: Los autores

#### 4.3.4 Costos operacionales

El autor (Kern, 1999) ,”nos refiere que: Al usar agua como medio de absorción de calor, es posible consumir un gran volumen para un delta reducido de temperatura o un volumen menor con un delta elevado de temperatura. El delta de temperaturas del agua de proceso de enfriamiento influye en la MLDT. Si se usa gran volumen, entonces  $t_2$ , será más distante de  $T_1$ , y como consecuencia requeriremos menor área para obtener una elevada MLDT. Incluso con la disminución del costo de inversión y costos fijos, la operación tendrá un incremento de costos como resultado del incremento de consumo de agua. Debe analizarse en detalle desde el diseño, para obtener una eficiente relación entre ambas situaciones.

Para este cálculo, se toma la presión del agua entrante capaz de vencer la caída de presión que ejerce el equipo por su configuración interna y que el precio de esta está ligado solamente con la cantidad que se utilice. Además, se sabe que el enfriador trabaja a contracorriente verdadera, es decir, **At = MLDT**”. (p. 194-195).

La ecuación que relaciona los costos por operación contempla las siguientes variables. Ver ecuación (4.25)

$$C_T = \frac{Q \theta C_w}{c_p(t_2 - t_1)} + \frac{C_F Q}{U (At)} \quad (4.25)$$

Dónde:  $Q$  razón de calor,  $\theta$  son las horas de operación anuales,  $C_W$  es el costo de agua/lb,  $C_F$  son los cargos por costos fijos anuales/  $pie^2$ . La relación ideal se presentará en el momento en que el costo total anual sea muy bajo, esto es, cuando  $dC_T/dt_2 = 0$ . Para el cálculo del intercambiador propuesto los datos serían los de la Tabla 4-50.

**Figura 4-50:** Costos operacionales

<b>Q</b>	<b>Cp</b>	<b><math>U_D</math></b>
1400000	1	257.3
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b><math>\theta</math></b>
75	80	8000
<b><math>C_F</math></b>	<b><math>C_W</math></b>	<b>At</b>
4320	0.25	10.82
<b>Costo Total</b>		5.62E+08

Nombre de la fuente: Los autores



# **5 Conclusiones y recomendaciones**

## **5.1 Conclusiones**

Las conclusiones constituyen un capítulo independiente y presentan, en forma lógica, los resultados del trabajo. Las conclusiones deben ser la respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Se deben titular con la palabra conclusiones en el mismo formato de los títulos de los capítulos anteriores (Títulos primer nivel), precedida por el numeral correspondiente (según la presente plantilla).

El proceso de simulación requiere de la adecuada parametrización de los datos en el simulador, ya que si no se activan y se validan los valores adecuados no podemos simular a las condiciones de proceso que estamos modelando, es así, que para poder simular en solidwork nuestro proceso se activan los datos de gravedad para que el software calcule el intercambio térmico por convección y se configuran datos importantes como el de sistema cerrado de volumen (Volumen de control), la relación de nuestro volumen de control con los alrededores (adiabático) y demás.

## **5.2 Recomendaciones**

Es importante el conocimiento del software que se va a utilizar antes de iniciar la simulación esto con el fin de ahorrar tiempo en el proceso de diseño, ensamble y simulación, leer las guías, tutoriales introductorios y demás información relevante para llevar a cabo el proyecto a buen término.

Otro aspecto relevante con respecto a la simulación, es que se debe contar con un equipo que cumpla con las especificaciones requeridas por el software, ya que si este no cumple

el sistema puede tardar varias horas en el proceso de solucionar las ecuaciones y no se pueda finalizar la solución, para esto se puede ajustar algunas configuraciones de calidad de malla del modelo, sin embargo, para diseños de grandes dimensiones los tiempos son extensos.

## A. Anexo: Dimensiones de tubería de acero (IPS)

Tamaño nominal del tubo, IPS plg	DE, plg	Cédula No.	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lineal, pies <sup>2</sup> /pie		Peso por pie lineal, lb de acero
					Exterior	Interior †	
⅜	0.405	40*	0.269	0.058	0.106	0.070	0.25
		80†	0.215	0.036		0.056	0.32
¼	0.540	40*	0.364	0.104	0.141	0.095	0.43
		80†	0.302	0.072		0.079	0.54
⅜	0.675	40*	0.493	0.192	0.177	0.129	0.57
		80†	0.423	0.141		<b>0.111</b>	0.74
½	0.840	40*	0.622	0.304	0.220	0.163	0.85
		80†	0.546	0.235		0.143	1.09
¾	1.05	40*	0.824	0.534	0.275	0.216	1.13
		80†	0.742	0.432		0.194	1.48
1	1.32	40*	1.049	0.864	0.344	0.274	1.68
		80†	0.957	0.718		0.250	<b>2.17</b>
1¼	1.66	40*	1.380	1.50	0.435	0.362	2.28
		80†	1.278	1.28		0.335	<b>3.00</b>
1½	1.90	40*	1.610	2.04	0.498	0.422	2.72
		80†	1.500	1.76		0.393	3.64
2	2.38	40*	2.067	3.35	0.622	0.542	3.66
		80†	1.939	2.95		0.508	5.03
2½	2.38	40*	2.469	4.79	0.753	0.647	5.80
		80†	2.323	4.23		0.609	7.67
3	3.50	40*	3.068	7.38	<b>0.917</b>	<b>0.804</b>	7.58
		80†	2.900	6.61		0.760	10.3
4	4.50	40*	4.026	12.7	1.178	<b>1.055</b>	<b>10.8</b>
		80†	3.826	11.5		<b>1.002</b>	<b>15.0</b>
6	6.625	40*	6.065	28.9	1.734	1.590	19.0
		80†	5.761	26.1		1.510	28.6
8	8.625	40*	7.981	50.0	2.258	2.090	28.6
		80†	7.625	45.7		<b>2.000</b>	43.4
10	10.75	40*	10.02	<b>78.8</b>	2.814	2.62	40.5
		60	9.75	<b>74.6</b>		2.55	54.8
12	<b>2.75</b>	30	<b>12.09</b>	115	3.338	3.17	43.8
14	<b>4.0</b>	30	<b>13.25</b>	138	3.665	3.47	54.6
16	6.0	30	<b>15.25</b>	183	4.189	4.00	62.6
18	8.0	20‡	<b>17.25</b>	<b>234</b>	4.712	4.52	<b>72.7</b>
20	10.0	20	<b>19.25</b>	<b>291</b>	5.236	5.05	<b>78.6</b>
22	12.0	20‡	<b>21.25</b>	355	5.747	<b>5.56</b>	<b>84.0</b>
24	14.0	20	<b>23.25</b>	425	6.283	<b>6.09</b>	<b>94.7</b>

\*Comúnmente conocido como **estándar**.

†Comúnmente conocido como **extragrueso**.

‡Aproximadamente.

## B. Anexo: Disposición de los espejos de tubo (cuenta de tubos) arreglo triangular

Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 15/16 plg						Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 1 plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	36	32	26	24	18	8	37	30	24	24	
10	62	56	47	42	36	10	61	52	40	36	
12	109	98	86	82	78	12	92	82	76	74	70
13 1/4	127	114	96	90	86	13 1/4	109	106	86	82	74
15 1/4	170	160	140	136	128	15 1/4	151	138	122	118	110
17 1/4	239	224	194	188	178	17 1/4	203	196	178	172	166
19 1/4	301	282	252	244	234	19 1/4	262	250	226	216	210
21 1/4	361	342	314	306	290	21 1/4	316	302	278	272	260
23 1/4	442	420	386	378	364	23 1/4	384	376	352	342	328
25	532	506	468	446	434	25	470	452	422	394	382
27	637	602	550	536	524	27	559	534	488	474	464
29	721	692	640	620	594	29	630	604	556	538	508
31	847	822	766	722	720	31	745	728	678	666	640
33	974	938	878	852	826	33	856	830	774	760	732
35	1102	1068	1004	988	958	35	970	938	882	864	848
37	1240	1200	1144	104	073	37	1074	1044	012	986	870
39	1377	1330	1258	248	211	39	1206	1176	128	100	078

Tubos de 1" DE, arreglo triangular de 1 1/4 plg						Tubos de 1 1/4" DE, arreglo triangular de 1 1/16" plg					
8	21	16	16	14		10	20	18	14		
10	32	32	26	24		12	32	30	26	22	20
12	55	52	48	46	44	13 1/4	38	36	32	28	26
13 3/4	68	66	58	54	5c	15 1/4	54	51	45	42	38
15 1/4	91	86	80	74	72	17 1/4	69	66	62	58	54
17 1/4	131	118	106	104	94	19 1/4	95	91	86	78	69
19 1/4	163	152	140	136	128	21 1/4	117	112	105	101	95
21 1/4	199	188	170	164	160	23 1/4	140	136	130	123	117
23 1/4	241	232	212	212	202	25	170	164	155	150	140
25	294	282	256	252	242	27	202	196	185	179	170
27	349	334	302	296	286	29	235	228	217	212	202
29	397	376	338	334	318	31	275	270	255	245	235
	472	454	430	424	400	33	315	305	297	288	275
33	538	522	486	470	454	35	357	348	335	327	315
35	608	592	562	546	532	37	407	390	380	374	357
37	674	664	632	614	598	39	449	436	425	419	407
39	766	736	700	688	672						

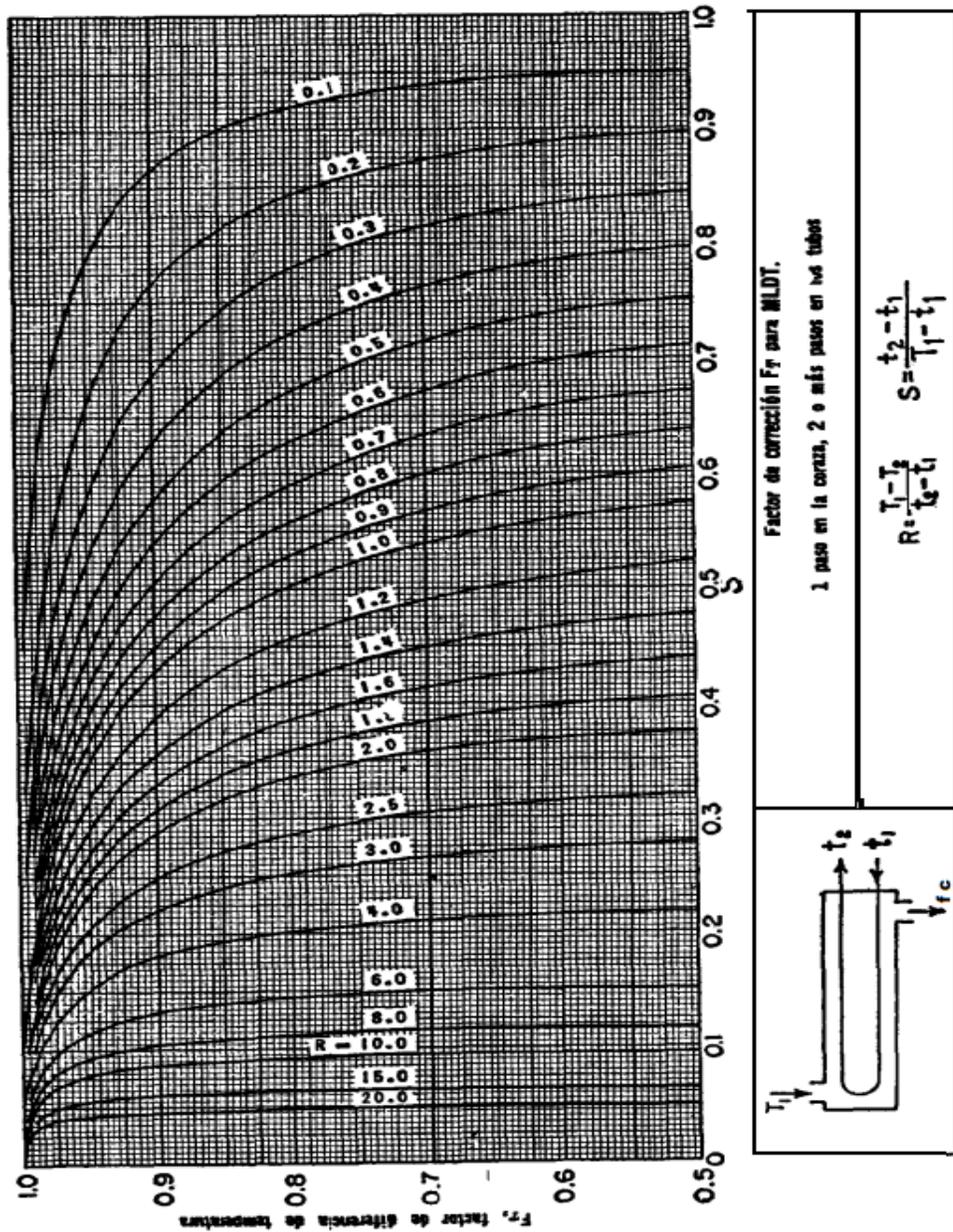
  

Tubos de 1 1/2" DE, arreglo triangular de 1 7/8 plg					
12	18	14	14	12	12
13 1/4	27	22	18	16	14
15 1/4	36	34	32	30	27
17 1/4	48	44	42	38	36
19 1/4	61	58	55	51	48
21 1/4	76	72	70	66	61
23 1/4	95	91	86	80	76
25	115	110	105	98	95
27	136	131	125	118	115
29	160	154	147	141	136
31	184	177	172	165	160
33	215	206	200	190	184
35	246	238	230	220	215
37	275	268	260	252	246
39	307	299	290	284	275

## C. Anexo: Datos de tubos para condensadores e intercambiadores de calor

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lin. pies <sup>2</sup>		Peso por pie lineal, lb, de acero
					Exterior	Interior	
½	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
¾	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	<b>0.455</b>		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	<b>0.479</b>		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
18	0.049	0.902	0.639	0.2361	0.545		
1¼	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
	17	0.058	1.13	1.01		0.2969	0.808
	18	0.049	1.15	1.04		0.3015	0.688
1½	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	<b>1.37</b>
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.978
	18	0.049	1.40	1.54		0.3670	0.831

## D. Anexo: Factores de corrección MLDT para intercambiadores 1-2.

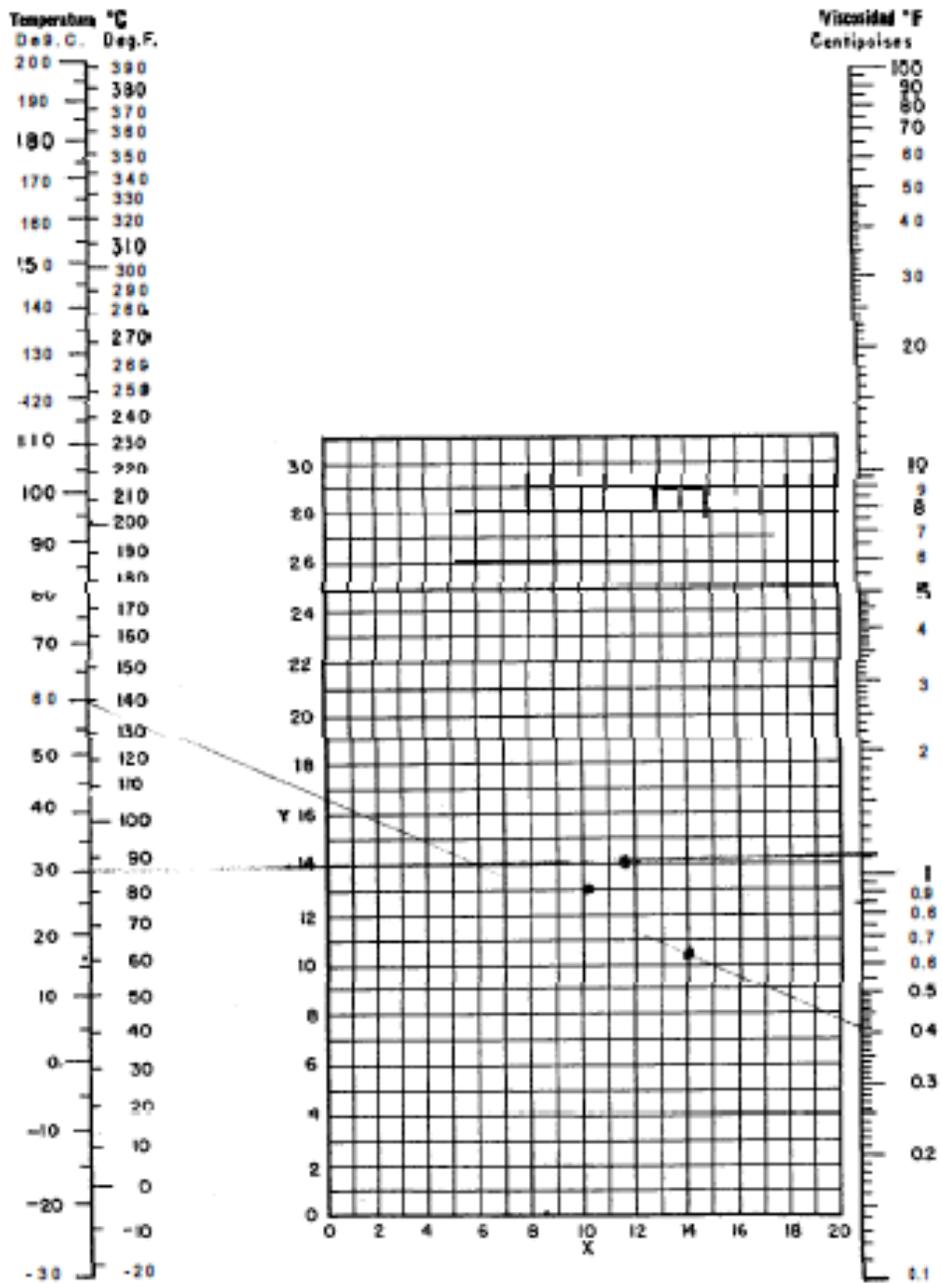


## E. Anexo: Viscosidades de líquidos para usarse como coordenadas con el anexo F.

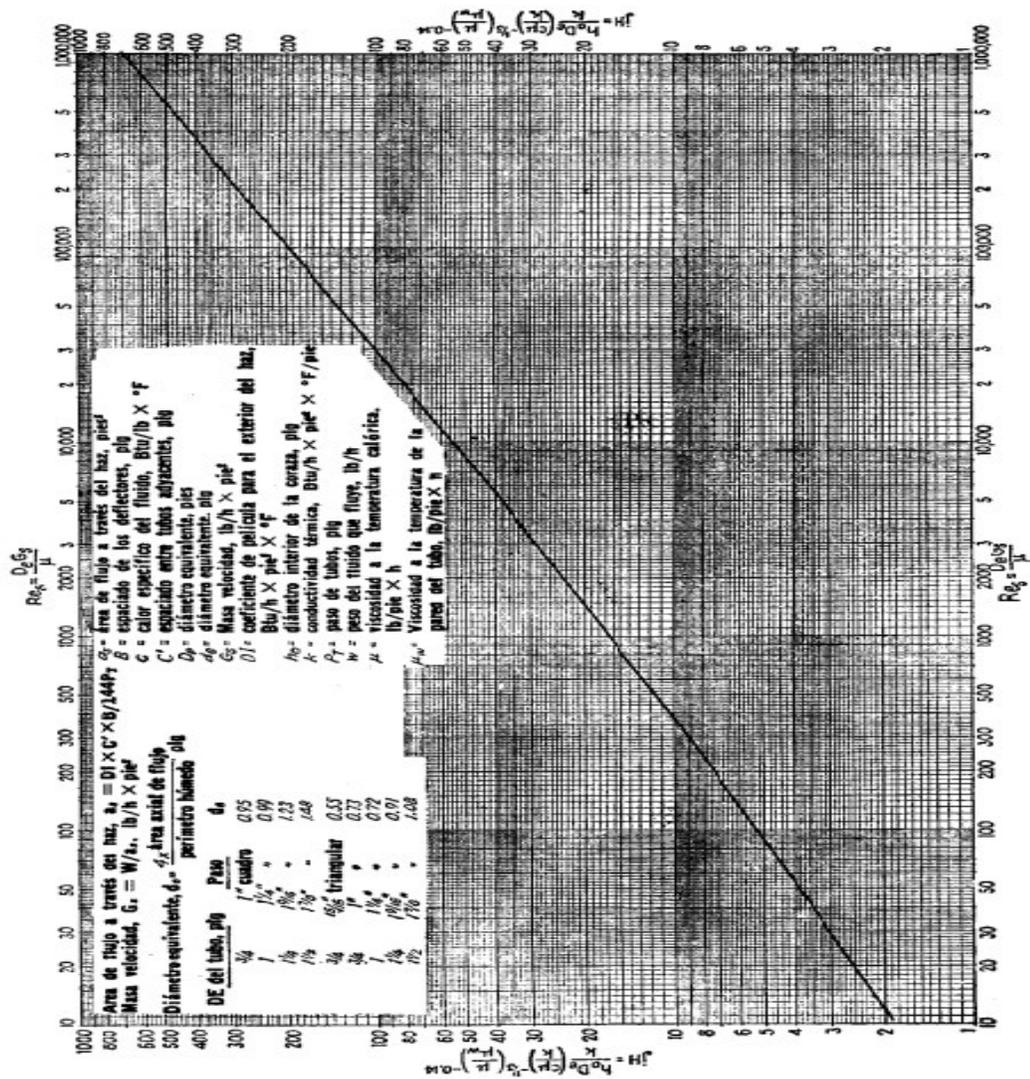
Líquido	x	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	90.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35 %	7.9	18.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.2
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.0	18.0	Metilacetona	13.9	8.6
Alcohol Octílico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	116.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26 %	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bóxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bóxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl <sub>2</sub> 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sulfato	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Clorofórmica	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	16.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.3
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfúrico	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

\* De Ferry, J. H. "Chemical Engineers' Handbook 3d. ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.

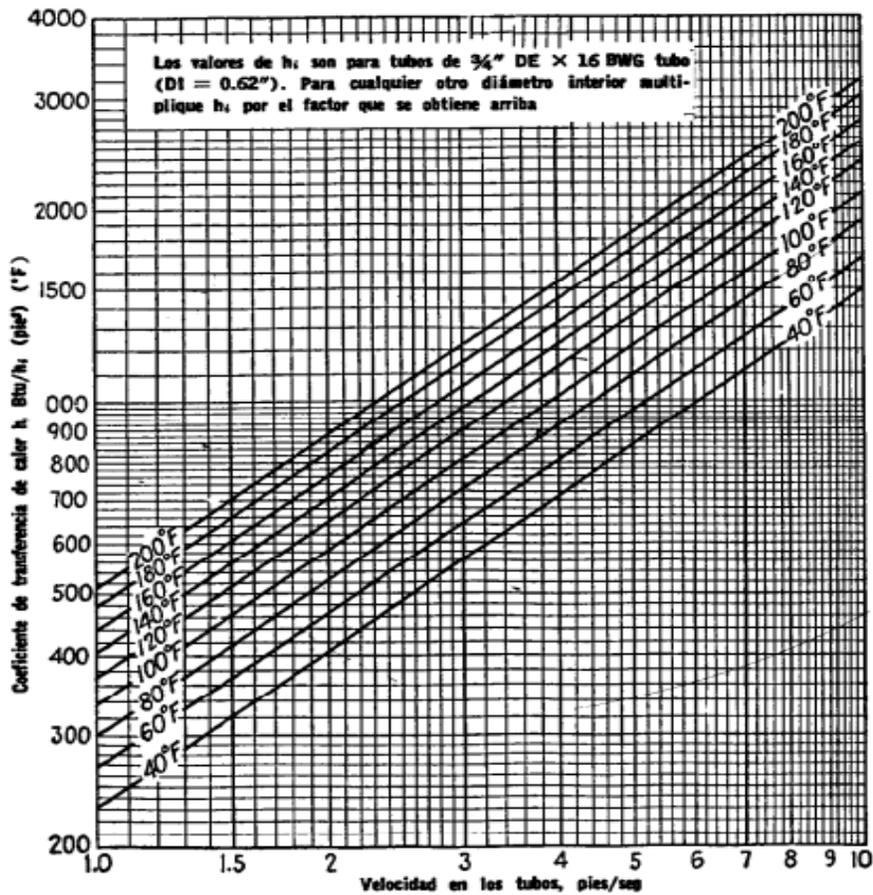
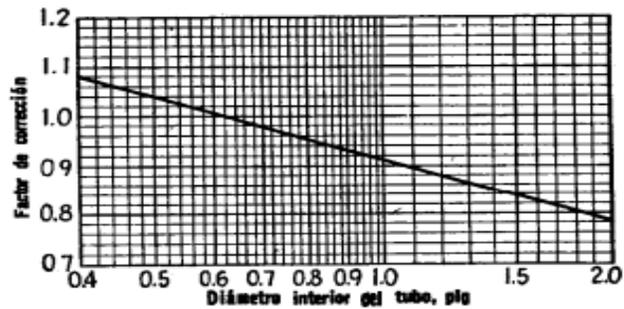
## F. Anexo: Viscosidad de líquidos



# G. Anexo: Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25%



## H. Anexo: Curva de transferencia de calor, agua en los tubos.



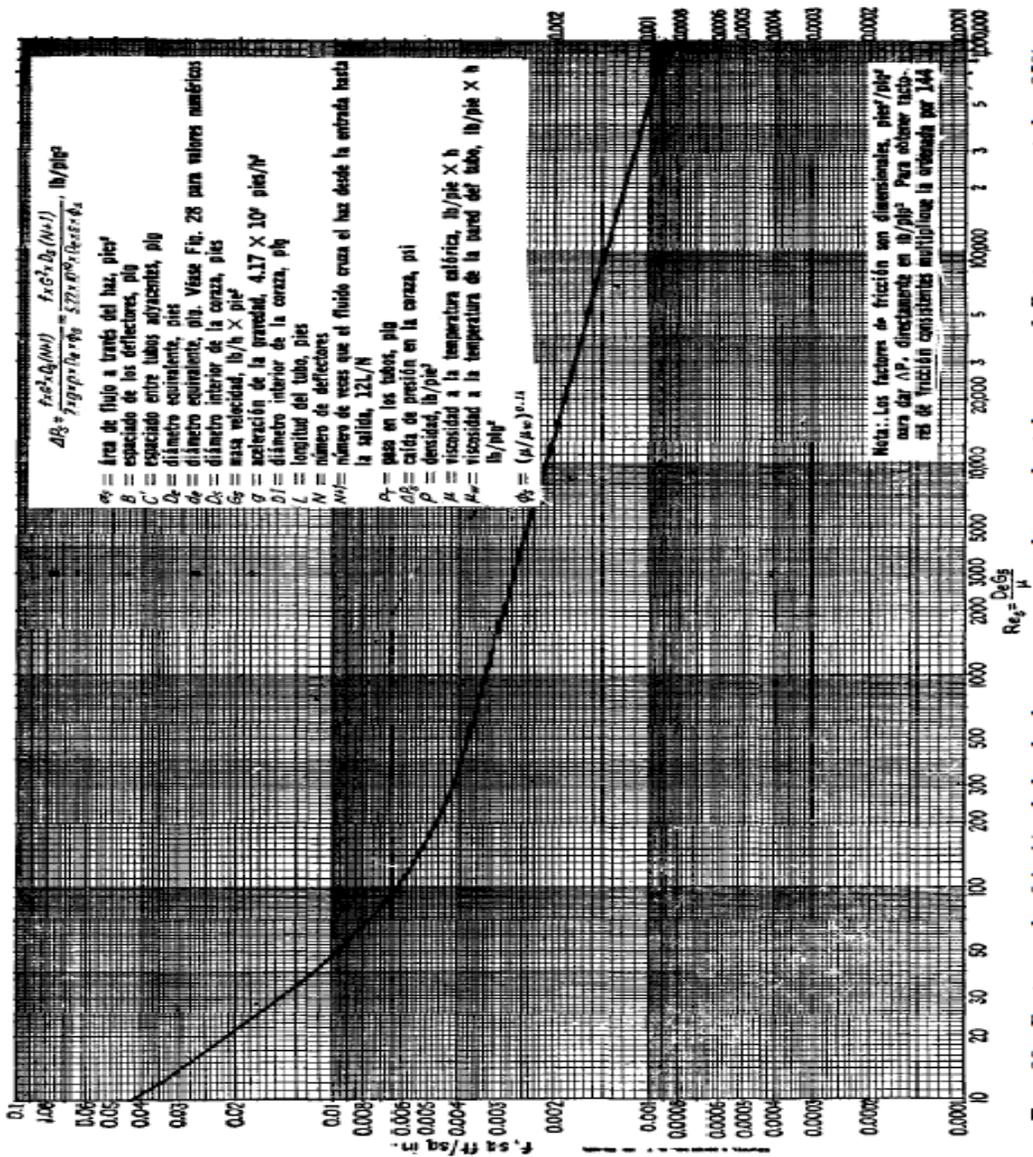
# I. Anexo: Conductividades térmicos de líquidos.

$$k = \frac{1}{h}(\text{pie}^2)(\text{°F}/\text{pie})$$

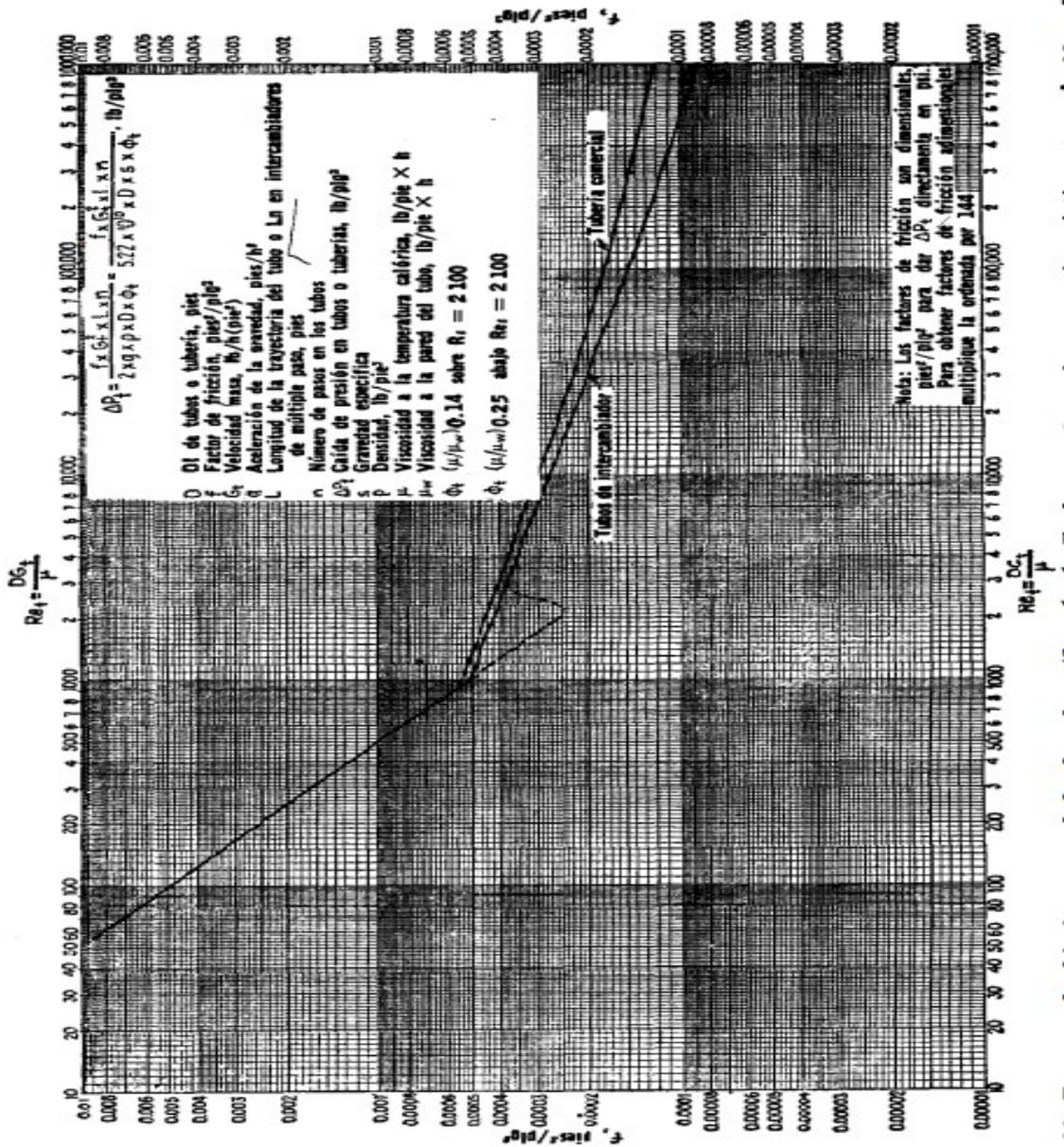
Puede suponerse una variación lineal con la temperatura. Los valores extremos que se dan constituyen también los límites de temperatura en los cuales se recomiendan los datos.

Líquido	°F	k	Líquido	°F	k
Aceites			Bromobenceno	86	0.074
Ricino	68	0.104	Dióxido de azufre	212	0.070
Oliva	68	0.097	Bisulfuro de carbono	5	0.128
Acetato de etilo	212	0.095	Tetracloruro	86	0.111
Alcohol 100%	68	0.101	Cloruro de calcio, salmuera 30%	86	0.088
80%	68	0.105	15%	167	0.107
60%	68	0.137	12.5%	32	0.094
40%	68	0.176	Cloruro de sodio, salmuera 25.0%	86	0.32
20%	68	0.234	12.5%	86	0.34
100%	68	0.281	Clorobenceno	86	0.083
Benceno	122	0.087	Cloroformo	86	0.080
Bromuro	86	0.086	Cymene (para)	86	0.078
Éter	140	0.070	Decano (n-)	140	0.079
Yoduro	86	0.080	86	86	0.085
167	167	0.076	140	140	0.083
104	20	0.064	20	20	0.057
167	60	0.063	60	60	0.053
50	100	0.083	100	100	0.048
Alcohol (n-)	86	0.094	140	140	0.042
167	180	0.089	180	180	0.038
86	122	0.088	122	122	0.082
167	5	0.087	5	5	0.111
77-86	86	0.085	86	86	0.096
Alcohol (n-)	86	0.097	167	167	0.073
(iso-)	167	0.095	86	86	0.073
66	66	0.091	32	32	0.153
86	167	0.102	86	86	0.078
167	68	0.095	68	68	0.164
167	68	0.099	68	68	0.189
68	68	0.20	68	68	0.220
212	68	0.0786	68	68	0.259
Acido esteárico	212	0.102	68	68	0.278
Acido láurico	212	0.0925	212	212	0.164
Acido oleico	212	0.0835	86	86	0.081
Acido palmítico	212	0.21	140	140	0.079
Acido sulfúrico 90%	86	0.25	86	86	0.080
60%	86	0.30	140	140	0.078
30%	32	0.330	86	86	0.086
86	140	0.356	167	167	0.081
176	82	0.381	82	82	4.83
140	86	0.398	86	86	0.095
77-86	212	0.104	212	212	0.088
Alcohol alílico	86	0.094	86	86	0.125
Alcohol heptílico (n-)	167	0.091	140	140	0.120
86	167	0.097	86	86	0.084
Alcohol hexílico (n-)	167	0.094	140	140	0.082
86	68	0.124	86	86	0.083
Alcohol metílico 100%	68	0.154	140	140	0.081
80%	68	0.190	86	86	0.084
60%	68	0.234	212	212	0.078
40%	68	0.284	86	86	0.078
20%	122	0.114	167	167	0.074
100%	5	0.111	122	122	0.092
Cloruro	86	0.086	212	212	49
Alcohol propílico (n-)	86	0.099	410	410	46
167	167	0.095	86	86	0.086
Alcohol (iso-)	86	0.091	167	167	0.084
140	140	0.090	122	122	0.077
5-86	68	0.29	122	122	0.080
Amoniaco	140	0.29	59	59	0.074
Amoniaco, acuoso, 26%	140	0.29	59	59	0.106
32-68	86	0.092	68	68	0.090
Anilina	140	0.087	68	68	0.090
Benceno	140	0.087	68	68	0.090

# J. Anexo: Factores de fricción lado de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%



# K. Anexo: Factores de fricción, para lado tubo.





## **Bibliografía**

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. México, D.F: McGraw-Hill Companies, Inc.

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Mexico, D.F.: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Hirschtick, J. (1995). *SolidWorks*. Massachusetts.

Kern, D. Q. (1999). *Procesos de transferencia de calor*. Mexico: McGraw Hill Book Company, Inc.