

# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK



## Facultad de Ciencias Ambientales

Tesis de Grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico Industrial

### DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, Y OPERACIONALIZACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CARCASA, DESTINADO PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

**Autores:**

**Antonio Sebastián Almeida Barragán**

**Daniela Cristina Armas Landázuri**

**Director:**

**Ing. Diego Tapia Ayala**

**Quito – Ecuador**

**2013**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de investigación a mis padres Ligia Landázuri y Stalin Armas quienes supieron inculcarme valores y principios que han guiado mi vida. Gracias por ese apoyo incondicional que siempre me han brindado. Sin ustedes no hubiese logrado conseguir esta gran meta.

A mi hermana Renata Armas, compañera de toda mi vida y mejor amiga.  
Gracias por ser parte de mi vida.

Daniela Armas Landázuri.

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mis abuelos Ángel Octavio Barragán Lara y Laura del Carmen Chauvín Moncayo, por su inspiración y pilar fundamental en mi vida. A mis padres Laura Barragán y Mauricio Almeida, quienes supieron inculcarme valores y principios para formarme como persona y profesional. A mis hermanos Mauricio Daniel y Santiago David, por ser mis mejores amigos y apoyo incondicional. Sin ustedes no hubiese logrado conseguir esta gran meta.

Antonio Almeida Barragán.

## **AGRADECIMIENTO**

A los profesores Diego Tapia, Ana Rodríguez y Alexandra Jami por su acertada dirección de la tesis. Su profesionalismo y entrega fueron determinantes a la hora de conformar este trabajo.

A mis padres por su apoyo tanto emocional como económico. Sin su ayuda no hubiese sido posible conseguir el objetivo de este proyecto.

A mi compañero de trabajo Antonio Almeida por su colaboración, entrega y esfuerzo al realizar la investigación.

Daniela Armas Landázuri.

## AGRADECIMIENTO

A los profesores Diego Tapia, Ana Rodríguez y Alexandra Jami por su participación y apoyo ilimitado en la realización de la presente tesis.

A todos los profesores que conforman la Facultad de Ciencias Ambientales, que a más de formarnos profesionalmente, nos enseñaron valores y principios humanos.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida. Sin su ayuda no hubiese sido posible conseguir el objetivo de este proyecto.

A mi compañera y amiga de trabajo Daniela Cristina Armas Landázuri, por inmensa colaboración, entrega y esfuerzo al realizar la investigación.

Antonio Almeida Barragán.

## RESUMEN

Los Intercambiadores de Calor son uno de los equipos más comunes encontrados en la mayoría de industrias. Existen varios tipos de intercambiadores de calor y actualmente alrededor del mundo se ofrece en el mercado varios diseños de estos. Sus orígenes radican en el estudio de la transferencia de calor y cantidad de movimiento como una forma necesaria para el aprovechamiento de energía. Es por esta razón, que científicos e ingenieros han investigado el funcionamiento, diseño y condiciones de operación.

Los objetivos del actual trabajo son diseñar, construir y operar un intercambiador de calor tipo tubo-carcasa en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Internacional SEK. La finalidad es conectar los conceptos teóricos con la aplicación práctica para la formación profesional.

## **PALABRAS CLAVES**

Intercambiador de Calor tipo Tubo Carcasa, Transferencia de Calor, Temperatura Media Logarítmica, Coeficiente Individual de Transferencia de Calor, Coeficiente Global de Transferencia de Calor.

## **ABSTRACT**

Heat Exchangers are one of the most common equipment found in most industries. There are several types of heat exchangers and around the world are currently on the market offers various designs of these. Their origins lie in the study of heat transfer and movement amount as a form required for energy utilization. For this reason, scientists and engineers have investigated the performance, design and operating conditions.

The objectives of the present work are to design, build and operate a heat exchanger tube-shell type in the unit operations laboratory International University SEK. The aim is to connect the theoretical concepts with practical application for vocational training

## **KEY WORDS**

Tube type Heat Exchanger Housing, Heat Transfer Medium Temperature Logarithmic, Individual Coefficient Heat Transfer Coefficient Heat Transfer Global.

## INDICE

CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1.1.1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....	1
1.1.1.2 PRONÓSTICO .....	2
1.1.1.3 CONTROL DE PRONÓSTICO.....	2
1.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.1.4 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.1.6 JUSTIFICACIONES .....	4
CAPÍTULO II.....	5
2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA .....	5
2.2 ADOPCIÓN DE UNA PERSPECTIVA TEÓRICA .....	7
2.3 MARCO CONCEPTUAL .....	7
2.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR.....	7
2.3.1.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.....	9
2.3.1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	13
2.3.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN.....	17
2.3.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR .....	17
2.3.2.1 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR .....	19
2.3.2.2 INTERCAMBIADOR DE TUBERÍA DOBLE .....	20

2.3.2.3	INTERCAMBIADORES DE PLACAS.....	21
2.3.2.4	INTERCAMBIADORES ENFRIADOS POR AIRE .....	22
2.3.2.5	INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO CARCASA .....	24
2.3.3	CONDICIONES PRINCIPALES DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR .....	30
2.3.4	VARIABLES DE OPERACIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR .....	30
2.3.4.1	COEFICIENTE INDIVIDUAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	31
2.3.4.2	COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	32
2.3.4.3	DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARITMICA (LMTD).....	34
2.3.4.4	DIÁMETRO EQUIVALENTE.....	35
2.3.4.5	CAIDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS Y A TRAVES DE BANCO DE TUBOS.....	36
CAPÍTULO III .....		38
3	DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CARCASA..	38
3.1	SELECCIÓN DE FLUIDOS.....	40
3.2	ESQUEMA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR .....	41
3.3	SELECCIÓN DE MATERIALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	42
3.3.1	Tubería de cobre.....	42
3.3.2	Carcasa, tanque de almacenamiento de aceite y flauta de distribución- acero al carbón.....	46
3.3.3	Manguera de caucho y lona .....	48
3.4	SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS ADICIONALES.....	49
3.4.1	Bomba de aceite.....	49
3.4.2	Soplador de aire o blower.....	50
3.4.3	Termómetros.....	50

3.4.4	Anemómetro.....	50
3.5	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURAS DE DISEÑO.....	50
4	DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR .....	55
4.1	CALCULOS TEÓRICOS.....	56
	CARCASA ( <i>Fluido AIRE</i> ).....	64
4.2	CÁLCULOS REALES.....	73
	CARCASA ( <i>Fluido AIRE</i> ).....	80
	CAPÍTULO IV .....	87
5	CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO CARCAZA .....	87
	CAPÍTULO V .....	94
6	OPERACIONALIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	94
	CAPÍTULO VI.....	98
7	RESULTADOS .....	98
	CAPITULO VII.....	105
8	IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	105
9	MÉTODO.....	105
9.1	NIVEL DE ESTUDIO .....	105
9.2	MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN .....	106
9.3	MÉTODO.....	107
9.4	SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	107
9.5	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS.....	107
9.6	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	107
10	ASPECTOS ADMINISTRATIVOS .....	107
10.1	RECURSOS HUMANOS.....	108
10.2	RECURSOS TÉCNICOS Y MATERIALES.....	108
10.2.1	EQUIPOS.....	108
10.2.2	MATERIALES.....	108

10.2.3	LOGÍSTICA.....	109
10.2.4	OTROS.....	109
10.3	RECURSOS FINANCIEROS.....	110
10.4	CRONOGRAMA DE TRABAJO.....	112
CAPÍTULO VIII.....		113
11	CONCLUSIONES.....	113
12	RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....		117
ANEXOS.....		120
13	ANEXO 1:.....	120
13.1	MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	120
14	ANEXO 2:.....	134
14.1	PRACTICAS DE LABORATORIO.....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Números Adimensionales .....	14
Tabla 2. Tipos y aplicaciones de tubería de cobre.....	44
Tabla 3. Dimensiones y características de tubería rígida de cobre. ....	45
Tabla 4. Presiones de trabajo interno (kg/cm <sup>2</sup> ) de tubo tipo M, L y K. ....	46
Tabla 5. Variación de temperatura utilizando aceite - agua a volúmenes iguales...	51
Tabla 6. Variación de temperaturas utilizando aceite y agua en relación de volumen 1:2. ....	52
Tabla 7. Resumen: Cálculos teóricos antes de la corrección de viscosidad.....	64
Tabla 8. . Resumen de los cálculos teóricos con la corrección de viscosidad.....	71
Tabla 9. Resumen: Cálculos reales antes de la corrección de viscosidad. ....	80
Tabla 10. Resumen de los cálculos reales con la corrección de viscosidad. ....	86
Tabla 11. Materiales del Intercambiador de Calor.....	87
Tabla 12. Prueba número 1 del intercambiador con velocidad de aire de 2,4 m/s...	99
Tabla 13. Variaciones de temperatura de la Prueba número 1 .....	100
Tabla 14. Prueba número 2 del intercambiador con velocidad de aire de 2,14 m/s.....	101
Tabla 15. Variaciones de temperatura de la Prueba número 2. ....	101
Tabla 16. Prueba número 3 del intercambiador con velocidad de aire de 1,94 m/s.....	102
Tabla 17. Variaciones de temperatura de la Prueba número 3. ....	102
Tabla 18. Prueba número 4 del intercambiador con velocidad de aire de 1,25 m/s.....	103
Tabla 19. Variaciones de temperatura de la Prueba número 4. ....	104
Tabla 20. Financiamiento del Intercambiador de calor .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercambiador de tubería doble .....	21
Figura 2. Intercambiador de placas.....	22
Figura 3. Intercambiador enfriado por aire de tiro forzado .....	23
Figura 4. Intercambiador enfriado por aire de tiro inducido .....	23
Figura 5. Intercambiador de calor tipo tubo y carcasa .....	25
Figura 6. Intercambiador de cabezal flotante interno .....	26
Fuente: Rodríguez, 2000. ....	26
Figura 7. Intercambiador de lámina y tubo fijo.....	27
Figura 8. Intercambiador de cabezal flotante exterior.....	27
Figura 9. Intercambiador de cabezal y tubos integrados.....	28
Figura 10. Rehervidor de caldera. ....	29
Figura 11. Condensador de flujo dividido.....	29
Figura 12. Sentido de flujo de transferencia .....	35
Figura 13. Diámetro equivalente. ....	36
Figura 14. Esquema del intercambiador de calor tubo y carcasa .....	41
Figura 15. Intercambiador de Calor Tubo – Carcasa, fase de construcción.....	91
Figura 16. Tanque de almacenamiento de aceite, bomba de aceite y flauta de distribución.....	92

Figura 17. Intercambiador de Calor, tanque de almacenamiento de aceite y bomba.....	93
Figura 18. Distribución de tubos dentro del intercambiador de calor.....	94
Figura 19. Flauta de distribución y manueras de lona y caucho.....	95
Figura 20. Caja de Switch. Botón derecho encendedor Blower. Botón izquierdo encendedor bomba.....	96
Figura 21. Bomba de aceite.....	97
Figura 22. Blower.....	98



## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUCCIÓN

#### 1.1 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

##### 1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

###### 1.1.1.1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

La Universidad Internacional SEK con el fin de formar ingenieros capaces de aprovechar los recursos naturales que el país ofrece y transformarlos en productos que satisfagan las necesidades de los ciudadanos, instauró la carrera de Ingeniería Química Industrial en el año 2008 formando parte de la Facultad de Ciencias Ambientales.

La formación de dichos profesionales, requiere a la par el estudio de los conceptos teóricos y la aplicación práctica. Por lo tanto, la preparación universitaria debe aportar con esos dos componentes para garantizar su formación.

Es por esto que la Facultad de Ciencias Ambientales ha implementado cuatro laboratorios altamente equipados para que los estudiantes puedan realizar ensayos, prácticas o pruebas piloto, utilizando y comparando los conocimientos teóricos obtenidos. Sin embargo existe un déficit de equipos para el aprendizaje de



## **Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

operaciones unitarias. Estos equipos ayudarán a los estudiantes a aplicar el conocimiento teórico.

### **1.1.1.2 PRONÓSTICO**

En caso de mantenerse la insuficiencia de dichos equipos en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad, subsistirá el impedimento, de que los estudiantes trasladen su conocimiento teórico a la práctica.

### **1.1.1.3 CONTROL DE PRONÓSTICO**

La construcción y el funcionamiento del intercambiador de calor, siendo éste un equipo de operaciones unitarias, facilitará a los estudiantes incrementar su conocimiento práctico.

## **1.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuáles son los fundamentos necesarios para el diseño, construcción y puesta en marcha de un intercambiador de calor tipo tubo carcasa?

### **1.1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuáles son las variables de diseño del intercambiador de calor tipo tubo carcasa?



¿Qué tipo de material va a ser empleado para la construcción del intercambiador de calor tipo tubo carcasa?

¿Cuáles son las condiciones reales de operación del intercambiador de calor tipo tubo carcasa y su desviación respecto de las condiciones teóricas?

#### **1.1.4 OBJETIVO GENERAL**

**1.1.4.1** Diseñar, construir y operar un intercambiador de calor tipo tubo carcasa.

#### **1.1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**1.1.5.1** Seleccionar los fluidos que intervendrán en el proceso de intercambio térmico, de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas.

**1.1.5.2** Identificar las variables de diseño del intercambiador de calor tipo tubo carcasa.

**1.1.5.3** Dimensionar el intercambiador de calor y seleccionar los materiales para su construcción.

**1.1.5.4** Construir el intercambiador de calor de acuerdo al diseño realizado.

**1.1.5.5** Instalar el intercambiador de calor en el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales.



**1.1.5.6** Determinar las condiciones reales de operación del intercambiador de calor tipo tubo carcasa.

**1.1.5.7** Comparar los datos teóricos calculados para el diseño versus los datos reales obtenidos de la Operacionalización del Intercambiador de Calor.

**1.1.5.8** Realizar un manual de operación del equipo construido.

### **1.1.6 JUSTIFICACIONES**

Hoy en día, la educación no solo se fundamenta en la teoría, sino también en su aplicación práctica. Estos dos elementos son de gran relevancia en la vida profesional de todo individuo. Este es el motivo elemental, para que la mayoría de universidades busquen poseer laboratorios altamente equipados. Para ello, se incentiva a los estudiantes a la construcción de equipos que permitan emplear sus conocimientos adquiridos a lo largo de su carrera estudiantil. Consecuentemente, esto beneficia a los mismos, así como a las futuras generaciones.

La Carrera de Ingeniería Química Industrial al ser creada recientemente en la Universidad Internacional SEK, cuenta con escasos equipos de laboratorio de química, que impiden a los estudiantes llevar el conocimiento teórico a la práctica. La falencia antes descrita, se convierte en una oportunidad a favor de los alumnos para que, mediante los proyectos de fin de carrera y los conocimientos adquiridos durante su formación profesional diseñen, construyan y operen los equipos más



utilizados en la industria Química, como es el caso de un intercambiador de calor tipo tubo carcasa.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA

Los Intercambiadores de Calor son uno de los equipos más comunes encontrados en la mayoría de industrias. Existen varios tipos de intercambiadores de calor y actualmente alrededor de todo el mundo se ofrece en el mercado varios diseños de estos. Sus orígenes radican en el estudio de transferencias de calor y cantidad de movimiento como una forma necesaria para el aprovechamiento de la diferencia de temperatura en fluidos. Es por esta razón, que muchos científicos e ingenieros han investigado el funcionamiento, diseño y condiciones de operación.

Su origen se lo acredita a un prolífico ingeniero a mediados del XIX. Fue Ericson, quien en 1852 inventó el cambiador de calor de tubos y carcasa, utilizándolo para el condensador de las máquinas de vapor marinas. Este se fundamenta en los principios de la termodinámica clásica, ciclo de Carnot (un equipo que trabaja absorbiendo una cantidad de calor de alta temperatura, lo cede a uno de baja temperatura, produciendo un trabajo sobre el exterior) (Martinez, 2000).



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

Tras este descubrimiento, se fueron encontrando nuevos diseños de intercambiadores de calor. Es así como, la primera patente que se extendió para un intercambiador de calor por suspensión del crudo en los gases, fue en favor del ingeniero M. Vogel-Jørgensen, de Frederiksberg, Copenhague, en la Oficina de Patentes de la República de Checoslovaquia, en Praga, el 1 de junio de 1932, con el título "Organización y tipo de alimentación de un horno rotatorio con material finamente pulverizado". La patente le fue concedida el 25 de julio de 1934, con el número 48169 (Martinez, 2000).

En la antigüedad, los intercambiadores de calor eran construidos con materiales de acero al carbón o acero de baja aleación, debido a la falta de conocimientos sobre factores que acortan el tiempo de vida útil de un equipo, como la corrosión, incrustaciones, entre otros. Es por esta razón, que durante el continuo uso de estos equipos iban presentando fallas de operación y mantenimiento. Al pasar los años, se realizaron estudios de cuáles son los materiales óptimos para la construcción de los intercambiadores de calor. Actualmente por ejemplo, la UOP (Universal Oil Products) y la ASM (American Society of Metals) ofrecen una amplia gama de consejos acerca del uso de distintos materiales dependiendo de las características de los fluidos, temperaturas y presiones a las que se vaya a operar un intercambiador.



## 2.2 ADOPCIÓN DE UNA PERSPECTIVA TEÓRICA

En la actualidad, existen varios tipos de intercambiadores de calor. Estos son elaborados con diferentes materiales, tamaños, y características dependiendo de las necesidades de uso, tipo de fluidos y volúmenes que se van a manejar.

Tras el análisis de los diversos tipos de cambiadores de calor, se ha decidido optar por el modelo propuesto por Ericson, es decir, un intercambiador de calor tipo tubo carcasa. Se ha seleccionado dicho equipo, debido a su amplio uso a nivel industrial y a su fácil funcionamiento. Además, éste es un modelo que puede ser utilizado con fines didácticos. Los materiales de este intercambiador serán analizados dependiendo del tipo de fluidos que circulará por su interior para garantizar el óptimo funcionamiento y tiempo de vida útil.

## 2.3 MARCO CONCEPTUAL

### 2.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es un proceso donde se transporta energía, ya sea en forma de trabajo o calor por los diferentes medios de contacto. Para ello, es indispensable que exista un gradiente de temperatura y un medio transmisor (Esplugas & Chamarro, 2005).



Esta transferencia de energía obligatoriamente se rige a las leyes de la termodinámica. Por lo tanto, según Esplugas & Chamarro “el calor emitido desde un sistema a temperatura superior debe de ser exactamente igual al calor absorbido por un sistema a temperatura inferior” (2005).

Se debe tomar en cuenta que, existe una velocidad de transferencia de calor. Esta es conocida como flujo de calor y es la expresión de la energía térmica transportada por unidad de tiempo. Además, se debe considerar la densidad de flujo de calor, que es la velocidad de transferencia de calor por unidad de área.

El estudio de la transferencia de calor se halla interesada por las ramas de la física, ingenierías mecánica, civil y alimentaria, arquitectura y especialmente por la ingeniería química. Por tanto, ésta tiene un rol importante en las industrias como es el caso, de reactores con absorción o desprendimiento de calor, en el diseño de equipos para intercambiar calor entre fluidos, resistencia térmica de materiales, entre otras (Esplugas & Chamarro, 2005).

Existen diferentes mecanismos de transferencia de calor o denominados medios de contacto. Según Incoprena & De Witt “cuando existe una gradiente de temperatura en un medio estacionario, que puede ser sólido o un fluido, se define como transferencia de calor por conducción. En cambio, el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre entra una superficie y un fluido en



movimiento a diferentes temperaturas. Finalmente, la radiación térmica es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas de sustancias que tengan una superficie con temperatura finita; esto se realiza en ausencia de un medio” (1999).

### **2.3.1.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN**

Es uno de los mecanismos de transferencia de calor que se da en escala atómica. La energía en forma de calor que pasa a través de la materia se da gracias a la actividad molecular. El choque de unas moléculas con otras permite esta transferencia. Las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. El principal requisito de la conducción de calor es que exista una diferencia de temperatura entre dos partes del medio conductor. Además, la transferencia de calor por conducción aparece tanto en sólidos, líquidos y gases. Los mejores conductores de calor que existen son los metales, entre ellos el acero inoxidable, hierro, cobre, entre otros. Por otro lado, se pueden encontrar materiales cuya conducción de calor es baja tendiendo a ser nula, como por ejemplo el corcho o la espuma de poliestireno. A este tipo de materiales se les denomina aislantes ya que más que permitir el paso rápido de calor, lo delimitan (Levenspiel, 1996).



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

La velocidad de transferencia de calor por conducción se calcula macroscópicamente y se encuentra regida por la Ley de Fourier. Esta ley determina que la velocidad de transferencia de calor por conducción se da en estado estacionario, y depende del material y de una gradiente de temperatura. La ley de Fourier se expresa por la ecuación:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Dónde:

- $H$  es el calor transferido por unidad de tiempo, es decir la velocidad de transferencia de calor (watts);  $dx$  es el espesor de la capa
- $A$  es el área transversal cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes temperaturas ( $T_1$  y  $T_2$ ) y donde  $T_2 > T_1$
- $dQ$  es el calor transferido en un tiempo  $dt$  que fluye del extremo caliente al frío
- $k$  es una propiedad de cada uno de los materiales conocido como conductividad. Esta magnitud representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura (W / m K)
- $\frac{dT}{dx}$  es la gradiente de temperatura.



- El signo menos indica que la conducción de calor es en dirección decreciente de la temperatura.

Esta es la ley General de Fourier para un cuerpo sólido plano. En el caso de un intercambiador de calor, la tubería al ser cilíndrica hueca se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -2\pi kL \frac{T_2 - T_1}{\ln[r_2/r_1]}$$

Dónde:

- $L$  es la longitud de la tubería
- $T_2$  es la temperatura exterior a la tubería
- $T_1$  es la temperatura interior de la tubería
- $r_2$  es el radio exterior y  $r_1$  es el radio interior de la tubería (Levenspiel, 1996).

**Conductividad térmica (k):** es una característica de todo material que representa la resistencia ante un flujo de calor. Este se obtiene al multiplicar el espesor de un material, área de contacto, tiempo, diferencia de temperaturas y la conductancia que es la inversa de la resistencia (Toro, 2002).



Es importante mencionar que la transferencia de calor se ve afectada por ciertos factores como son:

- **Ensuciamiento.** Este es un factor que aparece después de un periodo de tiempo en todo equipo de transferencia de calor debido a la interacción entre los fluidos y los materiales empleados en la fabricación del equipo. Existen depósitos presentes en las corrientes que pueden corroer los materiales. Estos generan una resistencia adicional a los flujos de calor y por lo tanto, una disminución en la transferencia. Este efecto se representa mediante un factor de suciedad  $R_f$  y se lo calcula experimentalmente mediante la determinación de los valores de  $U$  (coeficiente global de transferencia de calor) en los equipos de transferencia de calor tanto en condiciones de limpieza como de suciedad.
- **Naturaleza del material.** Todo material, sea en el estado físico en el que se encuentre, son capaces de transmitir calor a través de ellos en diferentes escalas. Unos pueden ser conductores o aislantes, dependiendo del grado de facilidad o dificultad para que permitan el paso de calor a su través. Esto se traduce por medio de una magnitud conocida como conductividad térmica de los materiales.



- Superficie de contacto. Es el área en la que fluidos y materiales tienen contacto directo.

### 2.3.1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Es el mecanismo de transferencia de calor por gradientes de temperatura debido al movimiento de un fluido (gas o líquido) que está en contacto con una superficie sólida. Esta transferencia depende de un factor de proporcionalidad denominado coeficiente de transferencia de calor; este es un parámetro empírico mas no una propiedad termodinámica (Moran & Shapiro, 2005).

La convección puede ser de dos tipos; natural o forzada. La Primera debido a la diferencia de densidades de la materia en el cual el movimiento de estos es relativamente lento, y la segunda, cuando se obliga a la materia a moverse ya sean estos impulsados por ventiladores o bombas. En el caso de la convección forzada, el coeficiente de transferencia térmica es mayor que cuando se produce por convección natural (Moran & Shapiro, 2005).

La velocidad de transferencia de energía ( $H$ ) desde el sistema al fluido puede calcularse gracias a la ecuación empírica de Newton, denominada Ley de Enfriamiento (Levenspiel, 1996). Esta se define por la siguiente ecuación:

$$H = hA (T_s - T_f)$$



Donde:

- $h$  es el coeficiente de convección ( $W/m^2K$ )
- $A$  es la superficie de contacto
- $T_s$  es la temperatura de la superficie
- $T_f$  es la temperatura del fluido.

Cuando el flujo de calor por convección va desde la superficie al fluido ( $T_s > T_f$ ) será positivo  $H$ , por el contrario será negativo cuando el calor se transfiere del fluido a la superficie ( $T_s < T_f$ ) (Levenspiel, 1996).

El coeficiente de convección  $h$ , definido en la ecuación anterior depende de las propiedades físicas del fluido y de sus características de movimiento ya sean natural o forzado con respecto a la superficie.

Su cálculo se basa en el análisis dimensional, siendo los módulos adimensionales los más utilizados. De estos se puede encontrar los siguientes:

**Tabla 1. Números Adimensionales**

<b>Número adimensional</b>	<b>Ecuación</b>
Nusselt	$Nu = h D/k$
Stanton	$St = h / (e G) = Nu/(Re Pr)$
Reynolds	$Re = uD\rho/\mu = GD/\mu$
Prandtl	$Pr = e \rho/\mu$



Número adimensional	Ecuación
Grashof	$Gr = (g D^3 / \nu^2) (b Dt)$
Condensación	$Co = (g D^3 / \nu^2) (\lambda / c Dt)$
Peclet	$Pe = D G e / k = uD/a$

Fuente: Ocon & Tojo, 1993.

Según Ocon & Tojo (1993), el cálculo del coeficiente de convección se determina para distintas condiciones de la siguiente manera:

a) Fluidos en el interior de tubos

- Flujo turbulento: Se lo determina a partir de la ecuación de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$$

- Flujos turbulentos en calentamiento

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

- Flujos turbulentos en enfriamiento

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

- Gases: En el caso de los gases Pr es igual a 0.74 por lo tanto:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8}$$

- Flujo isoterma:

$$h = 0.023 \left( \frac{G}{D^{0.2}} \right) \left( \frac{Cv^{0.4} k^{0.6}}{u^{0.4}} \right)$$

- Líquidos de conductividad grande (metales fundidos):



$$h = 7 + 0.025 Pe^{0.8}$$

- Flujo laminar: El coeficiente de convección para flujo laminar se determina por:

$$Nu = 2 \left( \frac{W Cp}{k L} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{u}{u_s} \right)^{0.14}$$

b) Fluidos en el exterior de tubos:

- Flujo turbulento: Se determina para líquidos y gases.

- Líquidos:

$$Nu = (0.35 + 0.47 Re^{0.52}) Pr^{0.3}$$

- Gases:

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

- Aire y gases diatómicos

$$Nu = (0.32 + 0.43 Re^{0.52})$$

- Flujo laminar: Se determina para líquidos y gases.

- Líquidos con  $Re$  entre 0.1 y 200:

$$Nu = 0.86 Pr^{0.3} Re^{0.43}$$

- Líquidos con  $Re > 200$  y gases  $0.1 < Re < 1000$

$$Nu = (0.35 + 0.47 Re^{0.52}) Pr^{0.3}$$

- Aire y gases diatómicos:

$$Nu = 0.24 Re^{0.6}$$



### 2.3.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

Es una forma de transferencia de calor producido como resultado de alteraciones electrónicas de moléculas y átomos en el interior de los materiales. El transporte de la energía se da a través de fotones u ondas electromagnéticas. La radiación puede propagarse sin limitación ya que no necesita de un medio, es decir puede hacerlo incluso en el vacío (Moran & Shapiro, 2005).

### 2.3.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Son equipos que permiten la circulación interna de fluidos a través de ellos con la finalidad de transferir energía calórica por gradientes de temperatura. Esto se logra a través de un fluido calentador o un refrigerante. Este tipo de aparatos son ampliamente utilizados en todo tipo de industria, especialmente en la química y petroquímica. Estos equipos generan en las empresas ventajas competitivas debido al ahorro y uso eficiente de la energía que proporcionan, así como también a la disminución del consumo de agua en sus procesos de producción. Por lo tanto, para los diferentes escenarios y factores de trabajo que presentan estos procesos, existen diferentes tipos de intercambiadores (Costa López, Cervera March, Cunill García, Esplugas Vidal, Mans Teixidó & Mata Álvarez, 2004).

Los factores de trabajo que se deben tomar en cuenta para la elección de un tipo de intercambiador dado el servicio que se necesite son:

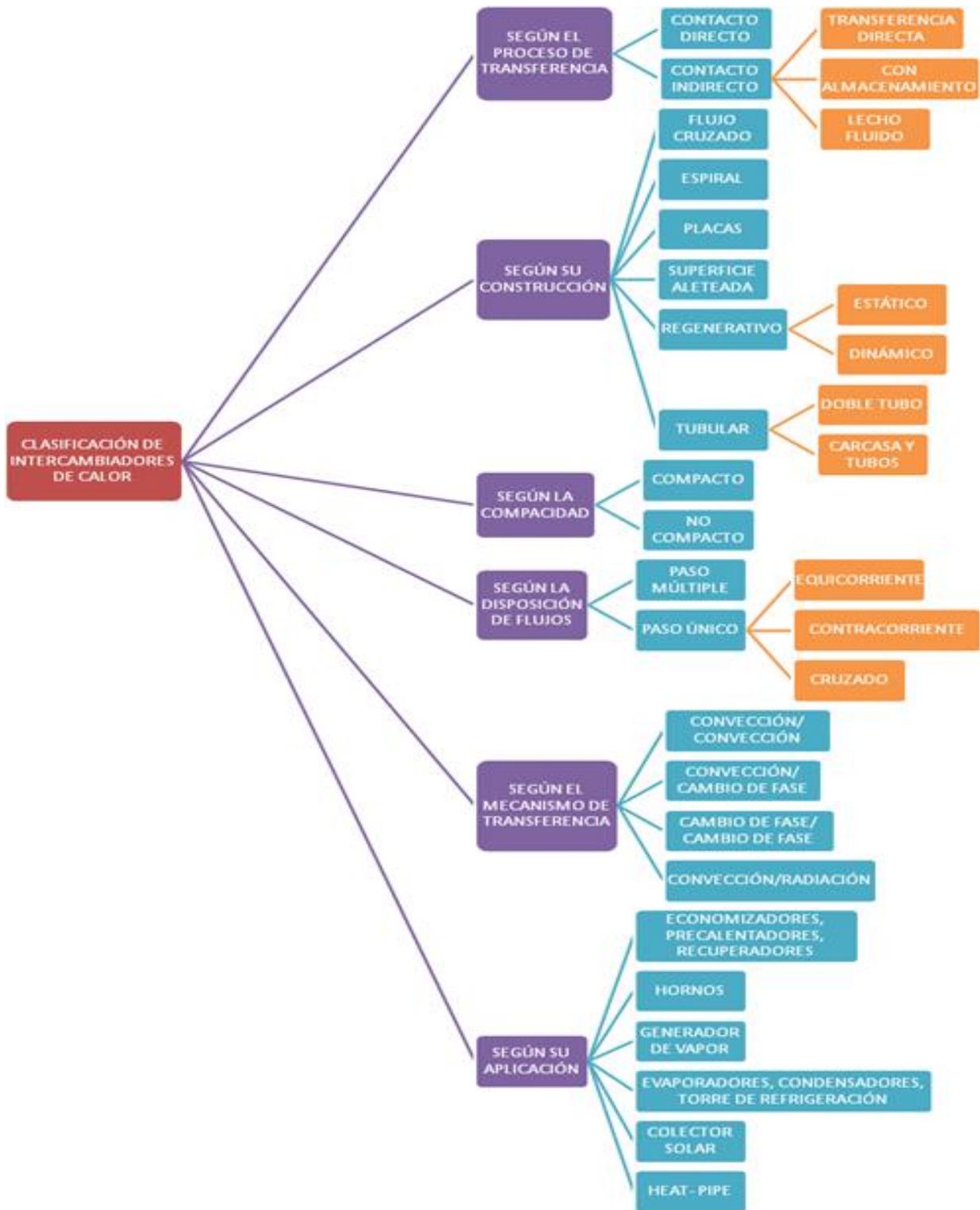


**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

- Temperaturas de entrada y salida de trabajo.
- Estado físico de los fluidos.
- Presiones de las corrientes.



### 2.3.2.1 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR



Fuente: Intescam, 2007.



Los principales tipos de intercambiadores son de tubería doble, enfriados por aire, tipo placa y tubo carcasa.

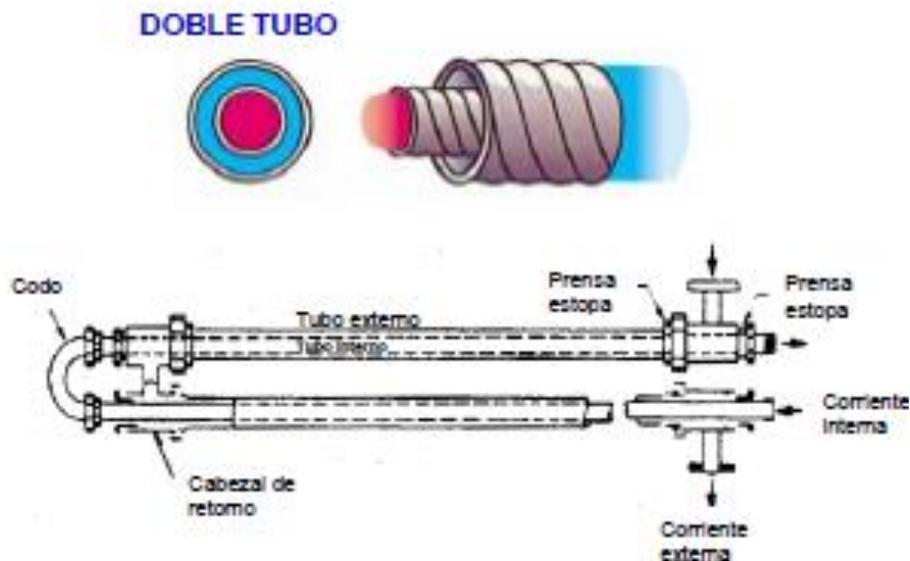
### **2.3.2.2 INTERCAMBIADOR DE TUBERÍA DOBLE**

Son los intercambiadores más sencillos que hay. Son empleados para el intercambio de calor de pequeños caudales. Están formados por dos tubos concéntricos. Un fluido circula por el interior de los tubos y otro fluido con diferente temperatura pasa por el espacio anular. El intercambio de calor se da por convección y conducción a través de la pared que separa a ambos fluidos (Costa et al, 2004).

Además, presentan diversas ventajas como la simplicidad de la construcción, facilidad de mantenimiento, flujo verdadero a contracorriente, posibilidad de uso de tubos aleteados y soporta altas presiones (Jiménez, 2003).



Figura 1. Intercambiador de tubería doble



Fuente: Intescam, 2007.

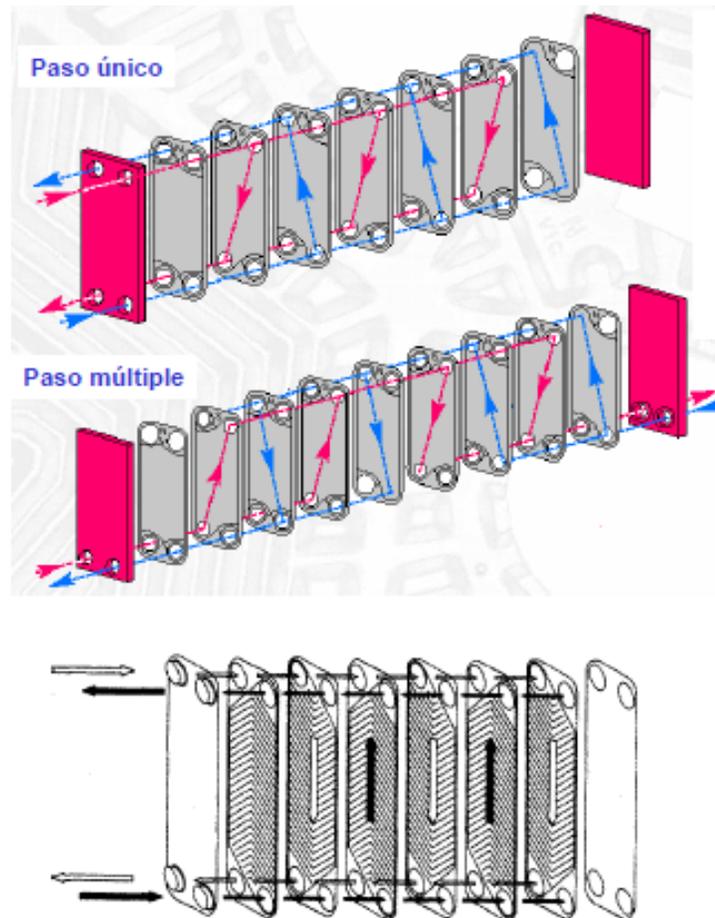
### 2.3.2.3 INTERCAMBIADORES DE PLACAS

Son aquellos intercambiadores que se encuentran formados por placas paralelas de espesor entre 0,06 a 0,13 cm, montadas en marcos fijos. Estos marcos ayudan también a repartir y separar los fluidos manejados. Las placas se encuentran separados unas de otras por una distancia que va entre 0,1 a 0,2 cm (Martinez, 2005).

Las principales aplicaciones de este tipo de intercambiador se centran en la industria farmacéutica y alimenticia ya que ofrecen ventajas como su gran flexibilidad de modificar su área de transferencia de calor y además por su facilidad de limpieza (Martinez, 2005).



Figura 2. Intercambiador de placas



Fuente: Intescam, 2007.

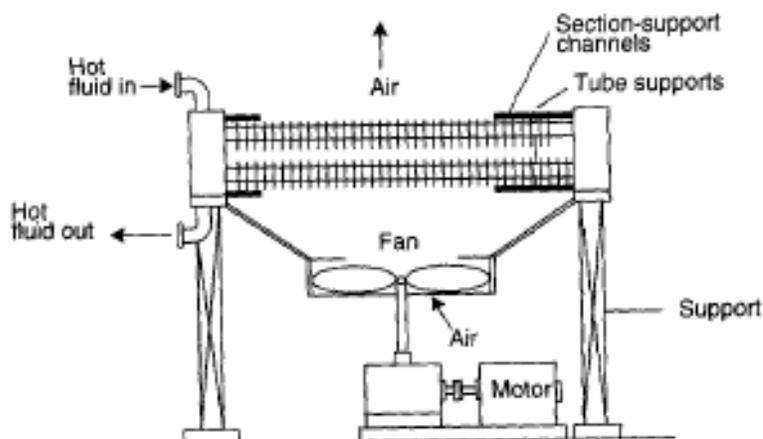
#### 2.3.2.4 INTERCAMBIADORES ENFRIADOS POR AIRE

Son intercambiadores que poseen dos cabezales que contienen a un haz de tubos alternados externamente. El cabezal permite la recolección y la distribución del fluido. Asimismo contiene ventiladores que fuerzan la circulación del aire que pasa por el haz de tubos. Existen dos tipos de intercambiadores enfriados por aire, estos son de tiro forzado y tiro inducido (Martinez, 2005).



- ✓ **Intercambiadores Enfriados por Aire de Tiro Forzado:** posee un ventilador que se encuentra localizado antes del paso del aire por los tubos. Se lo utiliza para enfriar o condensar. Su temperatura mínima de proceso es  $65^{\circ}\text{C}$  (Coulson & Richardson, 1993).

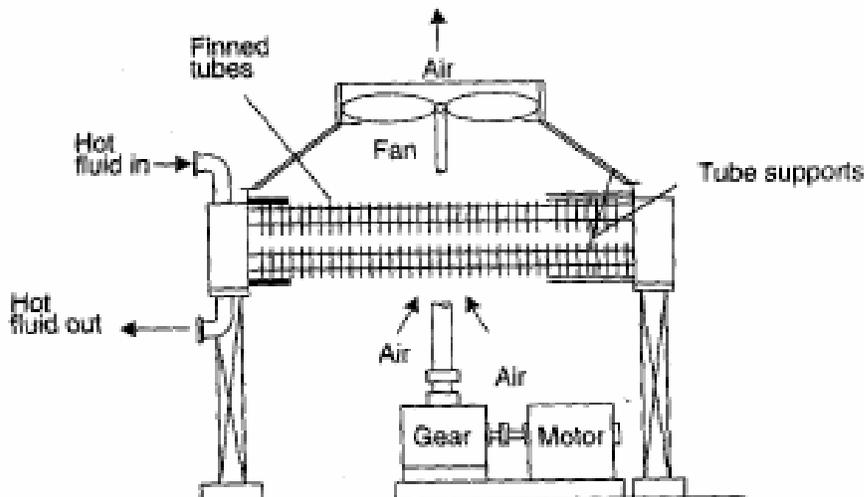
**Figura 3. Intercambiador enfriado por aire de tiro forzado**



Fuente: Coulson & Richardson, 1993.

- ✓ **Intercambiadores Enfriados por Aire de Tiro Inducido:** Contiene un ventilador localizado después del paso del aire por los tubos. Se los utiliza para tratar agua cuando los tratamientos químicos son muy costosos o cuando el lugar donde se lo va a emplear se enfrenta contra la escasez de agua. La desventaja de este intercambiador es su alto costo de adquisición (Coulson & Richardson, 1993).

**Figura 4. Intercambiador enfriado por aire de tiro inducido**



Fuente: Coulson & Richardson, 1993.

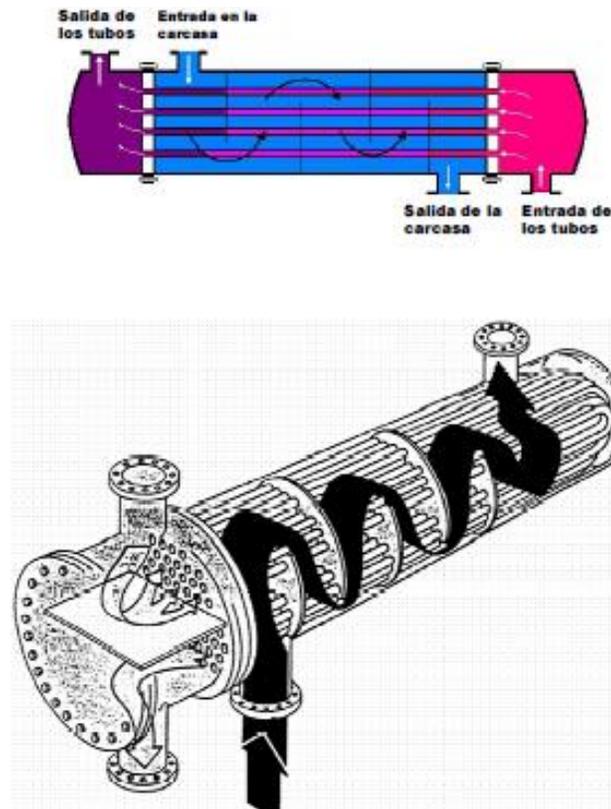
### 2.3.2.5 INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO CARCASA

Son equipos compuestos por una carcasa cilíndrica en cuyo interior se dispone tubos de diámetro pequeño, en paralelo al eje del cilindro. En el interior de éstos últimos, circula un fluido a una temperatura, velocidad y presión determinada. Por su exterior, atraviesa un segundo fluido con diferentes propiedades físicas. En los extremos del paquete de tubos se encuentran los cabezales, que por su apropiada ubicación de las placas, obligan al fluido circular por el interior de los tubos. Además cuenta con tabiques deflectores colocados en la carcasa, que permiten al fluido externo circular varias veces en posición perpendicular respecto al paquete de tubos. La finalidad de que haya más de una pasada es controlar la velocidad del fluido en los tubos y la carcasa, pudiendo aproximarse con más exactitud la temperatura entre los dos fluidos. Existe variedad de intercambiadores de calor tipo tubo carcasa. Estos son los más utilizados a nivel industrial debido a su fácil y



eficiente funcionamiento. Estos equipos son de accesible mantenimiento ya que los cabezales pueden ser retirados para su limpieza y reparación (Costa López *et al*, 2004).

Figura 5. Intercambiador de calor tipo tubo y carcasa



Fuente: Intescam, 2007.

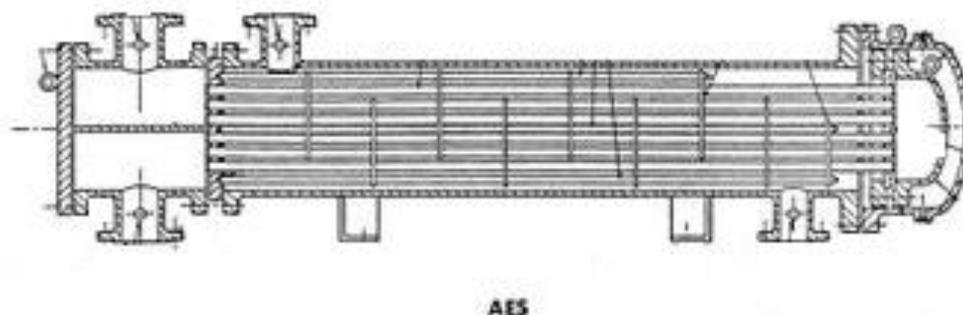
Existen varios diseños de este tipo de intercambiador como son:

- ✓ **Intercambiador de cabezal flotante interno:** son los intercambiadores más utilizados en la industria ya que son fáciles de desmontar. Estos se encuentran compuestos por tubos de doble paso, cabezal flotante, desviadores transversales de flujo y placas de apoyo. Sus tubos pueden



fácilmente expandirse con el cambio de temperatura. Además se puede variar las condiciones del fluido gracias a los desviadores ya que permiten un cambio en la velocidad del mismo en el casco. El flujo es contracorriente al inicio y final de los tubos mientras que en la mitad de estos se vuelve a favor de corriente (Walas, 1990).

**Figura 6. Intercambiador de cabezal flotante interno**

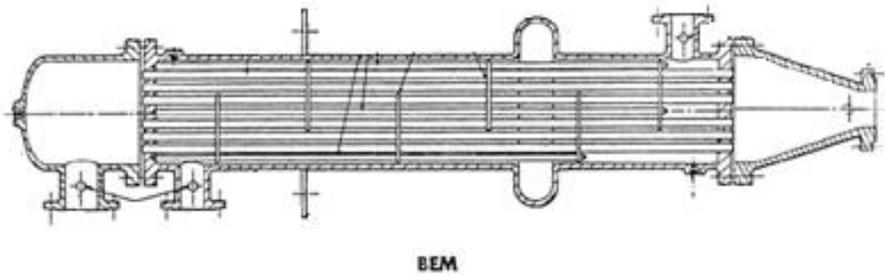


**Fuente:** Rodríguez, 2000.

- ✓ **Intercambiador de lámina y tubo fijo:** posee espejos soldados a la coraza, los cuales sirven también como brida que sujeta a los cabezales del lado de los tubos. Asimismo, tienen una junta de expansión en la carcasa, lo que le ayuda a soportar la diferencia de temperatura. La velocidad de circulación del fluido dentro de los tubos se encuentra limitada debido a que es de un paso. Esto ocasiona además, que el coeficiente de transferencia de calor sea bajo. Su limpieza se ve limitada debido a la imposibilidad de apertura del casco (STEMA, 2007).



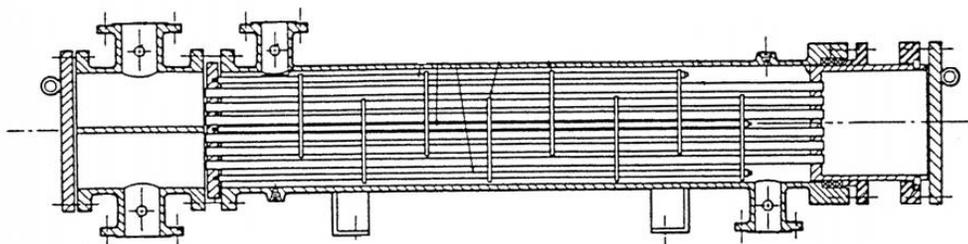
**Figura 7. Intercambiador de lámina y tubo fijo**



**Fuente:** Rodríguez, 2000.

- ✓ **Intercambiador de cabezal flotante exterior:** posee haces de tubos rectos y desmontables. Asimismo, tiene espejos flotantes y anillos de cierre hidráulico tanto en la coraza como en los tubos. Es la menos costosa en comparación a los intercambiadores que contienen las mismas características de tubos. Este tipo de modelo admite el movimiento del cabezal lo que facilita la limpieza interior del intercambiador. Su inconveniente es la necesidad constante de mantenimientos con el fin de prevenir las fugas y mantener el empaquetado (Kuppan, 2000).

**Figura 8. Intercambiador de cabezal flotante exterior.**

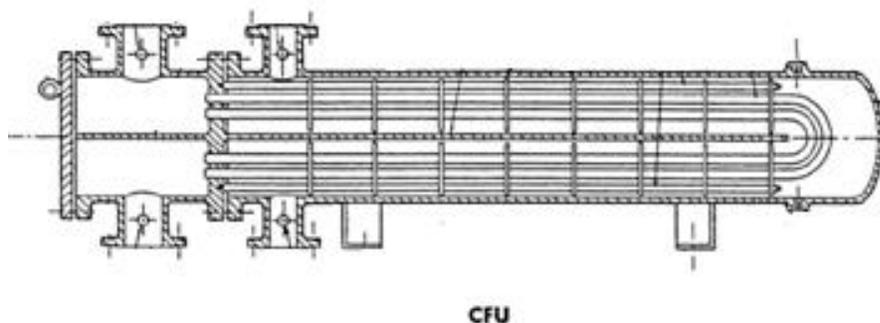


**Fuente:** Rodríguez, 2000.



- ✓ **Intercambiador de cabezal y tubos integrados:** este intercambiador consta de un haz de tubos en U, deflectores, cabezales y coraza. Su propiedad más importante es la capacidad de contracción y dilatación que pueden tener cada uno de los tubos. El haz de tubos es fácil de retirar de la coraza lo que permite una mejor limpieza. El inconveniente de este tipo de intercambiador es la dificultad de sustituir un tubo cuando este se encuentre dañado (Kuppan, 2000).

**Figura 9. Intercambiador de cabezal y tubos integrados.**

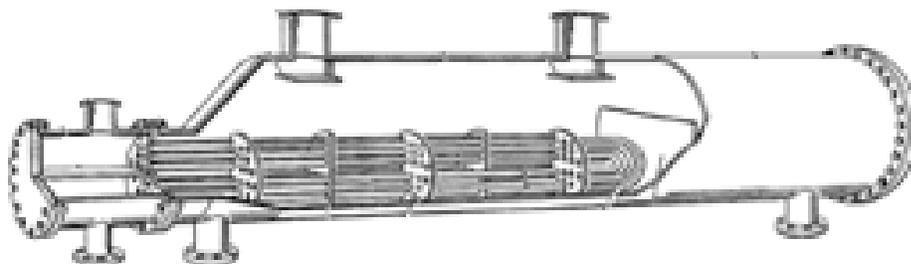


**Fuente:** Rodríguez, 2000.

- ✓ **Rehervidor de caldera:** este tipo de intercambiador es utilizado para calentar líquidos. Por lo general se emplea como fluido caliente al vapor de agua para que este ceda calor a un fluido frío. El caudal del vapor se controla dependiendo a la necesidad de temperatura final. Una aplicación práctica de este tipo de intercambiador es en el proceso de destilación en cual se calienta a la mezcla líquida que va a ser destilada. Este se lo coloca en el fondo del destilador para lograr dicho proceso (Mavaisan, 2008).



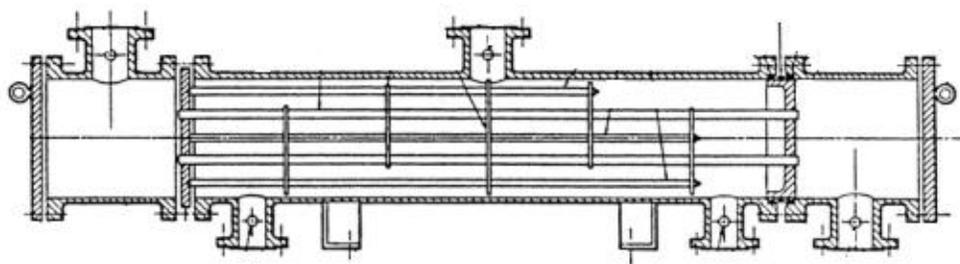
Figura 10. Rehervidor de caldera.



Fuente: Mavaisan, 2008.

- ✓ **Condensador de flujo dividido:** este tipo de intercambiadores tiene la propiedad de trabajar como condensador en su primera sección y como enfriador en su segunda sección. Además, posee un desviador central que se encarga de dividir el flujo en dos. El resto de desviadores llevan el flujo por los tubos para enfriarlo. En la industria su aplicación fundamental es como condensador de vapores ya que estos evitan las pérdidas de carga (Mavaisan, 2008).

Figura 11. Condensador de flujo dividido.



AJW

Fuente: Rodríguez, 2000.



### 2.3.3 CONDICIONES PRINCIPALES DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para la elección de un intercambiador de calor se debe tomar en cuenta: Temperaturas de trabajo (especialmente la temperatura media logarítmica, que es la fuerza que impulsa la transferencia de calor en sistemas de flujo) y estado físico de los fluidos; presión de las corriente y sus pérdidas; acción corrosiva e incrustante, flujos volumétricos y espacio disponible para la instalación del equipo (Costa López *et al*, 2004).

### 2.3.4 VARIABLES DE OPERACIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para el diseño de un intercambiador de calor es necesario conocer el tipo de fluidos que van a circular tanto por los tubos como por la carcasa, sus temperaturas de entrada y salida, el caudal y la cantidad de calor trasferido. A partir de estas variables se pueden calcular cinco variables que son de gran importancia en los intercambiadores de calor. Estas son:

- ✓ Coeficiente Individual de Transferencia de calor (h).
- ✓ Coeficiente global de trasferencia de calor (U).
- ✓ Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD).
- ✓ Diámetro Equivalente.



- ✓ Caída de presión en tuberías y a través de bancos de tubos

### 2.3.4.1 COEFICIENTE INDIVIDUAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Es una medida que representa la rapidez a la cual los fluidos transfieren calor. Además este muestra el calor transferido por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de diferencia de temperatura. Se lo representa con el símbolo “h” y puede ser determinado para la superficie interna ( $h_i$ ) y externa ( $h_o$ ) de los tubos por donde pasan los fluidos. Sus unidades son  $\text{KJ} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $\text{BTU} / \text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$ ) (Toro, 2005).

$$h_i = \frac{Q}{A_i \Delta T_i}$$

$$h_o = \frac{Q}{A_o \Delta T_o}$$

Donde:

- Q es la velocidad de transferencia de calor en  $\text{kJ} / \text{h}$ .
- $A_i$ ,  $A_o$  son las superficies de transferencia de calor interna y externa respectivamente en  $\text{m}^2$ .
- $\Delta t_i$ ,  $\Delta t_o$  son las diferencias de temperaturas entre el fluido que circula por el interior de los tubos y el fluido que pasa por el exterior de los tubos, es decir por la carcasa. Sus unidades son  $^\circ\text{C}$  (Perry, 2001).



### 2.3.4.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Mide la capacidad para transferir calor desde una sustancia a otra. Se define en términos de la resistencia térmica total (conducción, radiación y convección) para la transferencia de calor entre dos o más fluidos (Incropera & De Witt, 1999). En este influye mucho la capacidad o conductividad térmica de los materiales. Los metales poseen una baja capacidad térmica ya que requieren poco calor para producir una variación relativamente grande de temperatura (Ball, 2004). Además, este representa el valor inverso de la suma de los elementos de conducción, convección y las resistencias que se presenten durante el proceso (Alarcón, 1998).

El coeficiente global de transferencia de calor tiene las unidades de  $\text{kJ} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y se lo puede obtener de la ecuación:

$$Q = U * A * \Delta t$$

Donde:

- A es la superficie total de transferencia de calor medido en  $\text{m}^2$ .
- $\Delta t$  es la diferencia de temperatura entre los dos fluidos en  $^\circ\text{C}$ .

De la ecuación anterior se puede deducir que la cantidad de calor transmitido es directamente proporcional al área superficial, a la diferencia de temperaturas y al coeficiente global de transferencia de calor. Este coeficiente está compuesto por



resistencias tales como la resistencia de la película fluida en el interior de los tubos, resistencia a las incrustaciones en el interior de los tubos, resistencia de la pared de los tubos, resistencia de las incrustaciones sobre el exterior de tubos, resistencia de la película fluida sobre el exterior de los tubos, entre otras (Bertheau & Mercado, 1997).

Se puede definir otra ecuación para el coeficiente global de transferencia de calor que es:

$$U = \frac{1}{\frac{D_o}{D_i h_i} + \frac{D_o}{D_i} \frac{1}{hd_i} + \frac{x D_i}{k D_L} + \frac{1}{hd_o} + \frac{1}{h_o}}$$

Donde:

- $h_i$  es el coeficiente de la película interior en  $\text{kJ} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- $h_o$  es el coeficiente de la película exterior en  $\text{kJ} / \text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- $hd_i$  es la resistencia a la incrustación interior o factor de ensuciamiento interior.
- $hd_o$  es la resistencia a la incrustación exterior o factor de ensuciamiento exterior.
- $D_o, D_i$  es el diámetro interno y externo de la tubería en m.



- $k$  es la conductividad del material del que está hecho la tubería  $\text{kJ} / \text{h m}^\circ\text{C}$ .
- $x$  es el espesor de la tubería en  $\text{m}$  (Bertheau & Mercado, 1997).

#### 2.3.4.3 DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARITMICA (LMTD)

La diferencia de temperatura media logarítmica representa la variación de temperaturas que van teniendo los fluidos a través de su paso por el intercambiador de calor. Las temperaturas de los fluidos que circulan por el intercambiador no son constantes. Estas van variando de un punto a otro ya que un fluido va perdiendo calor y el otro va ganando ese calor (Kreith & Bohn, 2001).

La ecuación para el cálculo de LMTD es la siguiente:

Para flujo paralelo

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\text{Ln} \left[ \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)} \right]}$$

Para flujo en contracorriente

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\text{Ln} \left[ \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]}$$

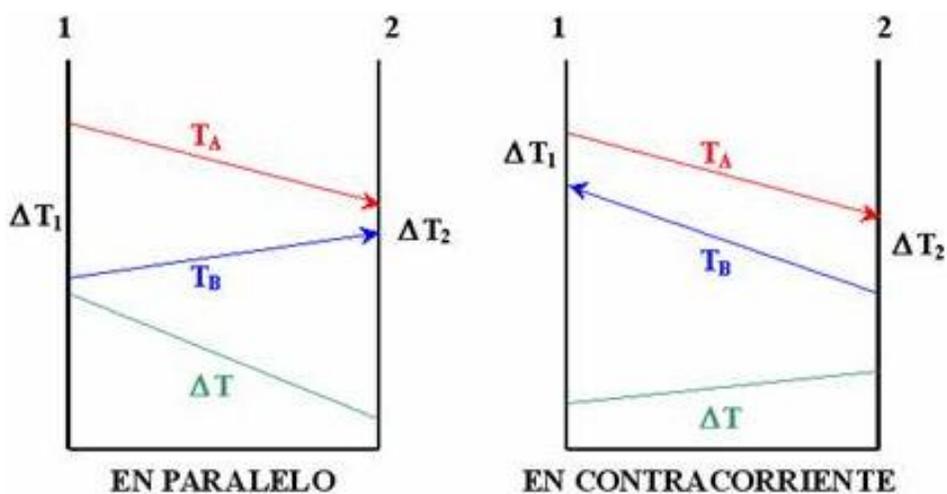
Donde:



- $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de entrada y salida del fluido caliente respectivamente. Estas se miden en  $^{\circ}\text{C}$ .
- $t_1$ ,  $t_2$  son las temperaturas de entrada y salida del fluido frío respectivamente. Sus unidades son  $^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura media logarítmica es una aproximación de la temperatura en la sección media de los tubos para poder trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor uniforme, ya que este varía dependiendo a su ubicación en el intercambiador de calor (Mickael, 2002).

Figura 12. Sentido de flujo de transferencia



Fuente: Franco, 2008.

#### 2.3.4.4 DIÁMETRO EQUIVALENTE

Es un parámetro que representa cuatro veces el valor del radio hidráulico. Este último se obtiene como razón del área de flujo al perímetro húmedo. El diámetro



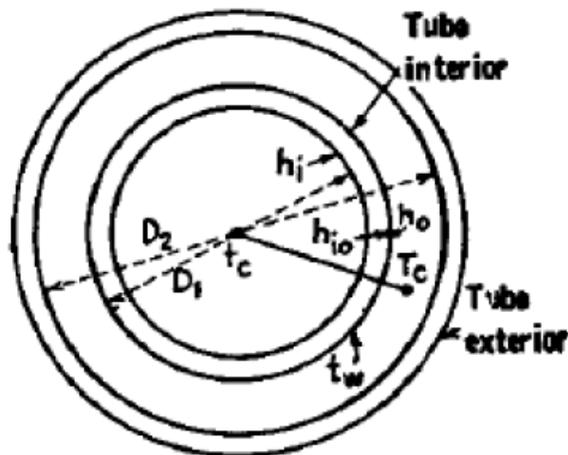
equivalente debe ser calculado debido a que un fluido fluye a través de un conducto que tiene una sección distinta a la circular (Gelmi, 2006). El diámetro equivalente se obtiene de la ecuación:

$$D_e = 4 * r_h = \frac{4 * \pi * (D_2^2 - D_1^2)}{4 * \pi * D_1} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1}$$

Donde:

- $D_1$  es el diámetro exterior del tubo interior (m).
- $D_2$  es el diámetro interior del tubo exterior (m).
- $r_h$  es el Radio hidráulico (m).

Figura 13. Diámetro equivalente.



Fuente: Mickael, 2002.

#### 2.3.4.5 CAIDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS Y A TRAVÉS DE BANCO DE TUBOS



Es la pérdida de presión producida por la fricción que tiene un fluido en contacto con la pared por la que está circulando. La caída de presión total resulta de la sumatoria de la caída de presión por contracción ( $\Delta P_{\text{entrada}}$ ) más la ocasionada en el núcleo ( $\Delta P_{\text{núcleo}}$ ) menos la ocurrida por expansión ( $\Delta P_{\text{salida}}$ ) (Gelmi, 2006).

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ent}} + \Delta P_{\text{núc}} - \Delta P_{\text{sal}}$$

La caída de presión permisible cuando un fluido es bombeado varía entre 5 a 10 psi, mientras que cuando el fluido fluye por gravedad, es decir por elevación del tanque, su caída de presión debe lograr superar las pérdidas totales por fricción incluso desde la salida del tanque (Gelmi, 2006).

La caída de presión (psi) en tuberías viene dado por la ecuación:

$$\Delta P_P = f_D * \left[ \frac{L * n}{D} \right] \frac{G^2}{2 * \delta}$$

Donde:

- D es el diámetro interior de la tubería medido en m.
- $f_D$  es el Factor de Darcy (adimensional).
- G es el flujo másico que circula por el tubo ( $\text{kg} / \text{h m}^2$ ).
- L es la longitud del tubo en m.
- n es el número de pasos por los tubos.



- $\delta$  es la densidad en  $\text{kg} / \text{m}^3$  (Gelmi, 2006).

## CAPÍTULO III

### 3 DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CARCASA

Se ha seleccionado el intercambiador de calor tipo tubo y carcasa para diseñarlo, construirlo y operarlo.

Existen varios métodos destinados para el diseño de intercambiadores tipo tubo y carcasa como son método de Kern, método de Bell & Delaware, método de Tinker, método NTU, entre otros.

El método seleccionado para el diseño fue el método de Kern. En 1950 Kern presentó una importante aportación al diseño de intercambiadores de calor con el objetivo de mostrar un diseño único. En este se toma en cuenta factores de construcción, factores de ensuciamiento, diferencia de temperatura media logarítmica, y flujo de los fluidos por el lado de la carcasa y de la tubería. El método de Kern es utilizado hasta la actualidad y más conocido para el cálculo de intercambiadores multitubulares (Valderrama, 1996).

La estructura física de este tipo de intercambiadores consta de una carcasa que contiene tubos ubicados de forma paralela y distribuidos geoméricamente a manera de cuadrados o triángulos (Abdalah, 2012).



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

Para el cálculo del intercambiador de calor se debe conocer los siguientes datos de los fluidos:

- Temperatura de entrada y salida.
- Capacidad Calorífica.
- Densidad.
- Conductividad térmica.
- Flujo másico.
- Viscosidad.

En cuanto a la tubería:

- Caída de presión permisible.
- Diámetro y longitud de la tubería.
- Factor de ensuciamiento.
- Conductividad térmica.

Con respecto a la carcasa:

- Número de pasos.
- Arreglo y disposición de los tubos.
- Espaciado entre los centros de los tubos (pt).



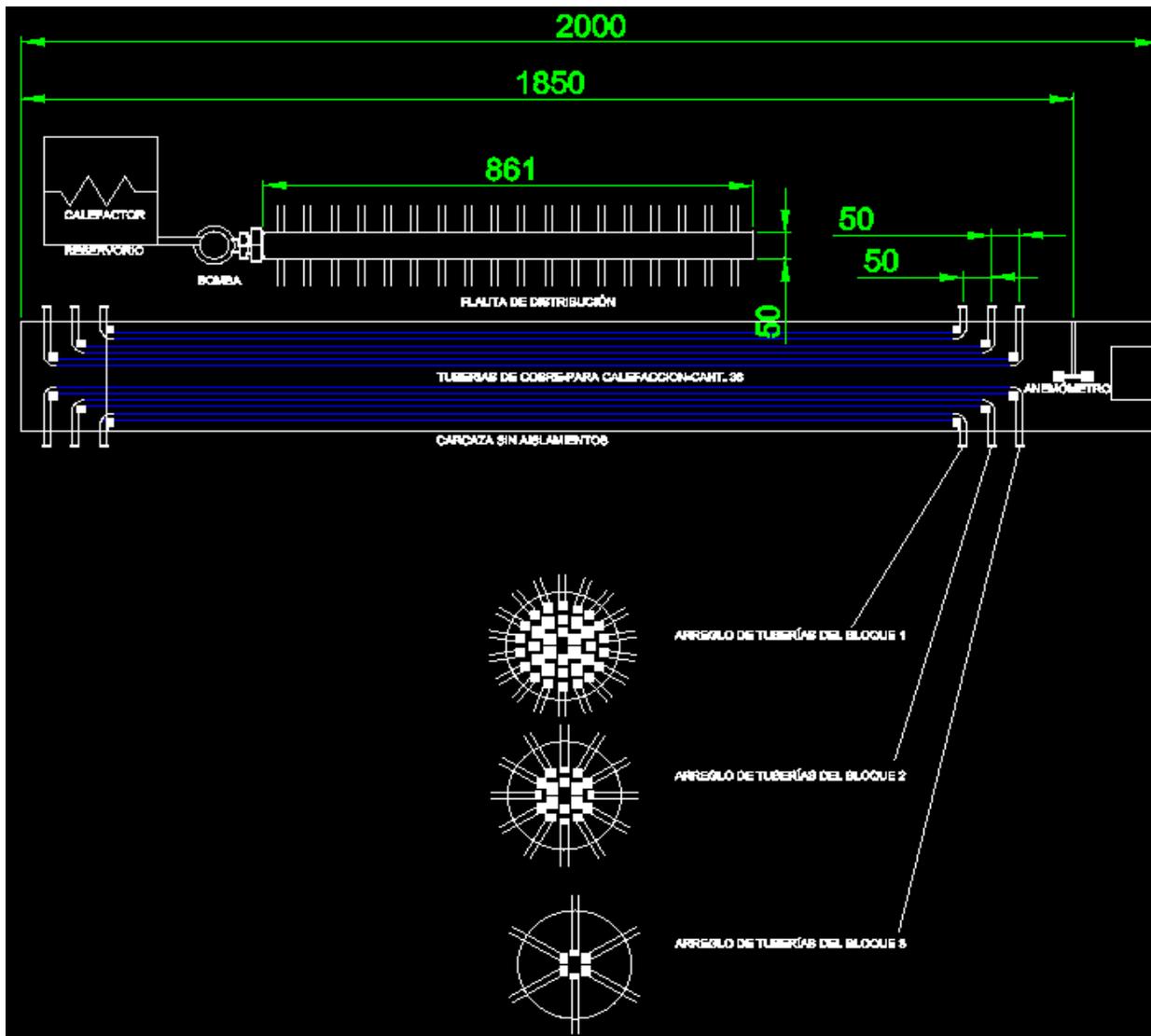
### 3.1 SELECCIÓN DE FLUIDOS

En un inicio, el intercambiador de calor iba a ser diseñado para que se dé el fenómeno de transporte de calor entre agua (fluido frío) y aceite vegetal de palma (fluido caliente), ya que este tipo instrumento es ampliamente utilizado en las diferentes industrias como la alimenticia, petrolera, entre otras. Sin embargo, debido a la poca viabilidad mecánica en la construcción de un intercambiador didáctico para laboratorio se consideró el cambio del fluido enfriador a aire. Con esto se logra diseñar el intercambiador de tal manera que se pueda observar el interior del mismo para que los estudiantes aprecien la disposición y ubicación de los tubos dentro de la carcasa. La desventaja del cambio de fluido es la baja conductividad del aire ( $0,0864 \text{ KJ} / \text{h m } ^\circ\text{C}$ ) en comparación a la del agua ( $2 \text{ KJ} / \text{h m } ^\circ\text{C}$ ) Esto provoca un intercambio de calor más lento.



### 3.2 ESQUEMA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Figura 14. Esquema del intercambiador de calor tubo y carcasa



Elaborado por: Efrén Vilatuña, 2013.

Como se aprecia en el esquema anterior, el intercambiador de calor contiene un tanque de almacenamiento que posee una resistencia eléctrica que permite calentar el aceite. Posteriormente se encuentra una bomba de engranaje que impulsa al



fluido (aceite) y lo permite circular a través del intercambiador. A continuación se encuentra una flauta de distribución de 0,5 cm de diámetro y 86,1 cm de largo que divide el flujo del aceite para los 36 tubos que contiene el intercambiador.

Posteriormente, se encuentra el intercambiador de calor que posee una carcasa de acero de 20 cm de diámetro y de longitud de 2 m. En su interior se encuentran colocados 36 tubos de cobre en arreglo triangular como se muestra en el esquema. Estos tubos se conectan al inicio con la flauta de distribución a través de mangueras de lona y caucho y al final del intercambiador se conecta los tubos con mangueras para lograr una recirculación del fluido al tanque de almacenamiento. Además, al final del intercambiador se encuentra un blower que permite impulsar el aire a través de este.

Los fluidos del intercambiador de calor se encuentran ubicados en contracorriente.

### **3.3 SELECCIÓN DE MATERIALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR**

#### **3.3.1 Tubería de cobre**

El cobre es uno de los metales más importantes industrialmente. Es un gran conductor de electricidad, es dúctil y posee una coloración rojiza. La tubería de cobre ha confirmado su reputación como material ligero, fuerte y resistente a la



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

corrosión, con años de servicio. En la actualidad, el tubo de cobre es empleado para instalaciones hidráulicas, calefacción y acondicionamiento del aire. En el mercado se dispone de tubos en temples estirado y recocido, en una amplia gama de diámetros y espesores de pared. Asimismo se encuentra con gran facilidad, accesorios prefabricados para cualquier aplicación de diseño. Las uniones son sencillas, confiables y económicas, lo que se traduce en grandes ventajas para la elección de tubería de cobre (ICALA, 2010).

Además, existen diversos tipos de tubería de cobre K, L, M o G. Cada tipo representa una serie de diámetros con diferentes espesores de pared. El tubo tipo K tiene paredes más gruesas que el tipo L, y a su vez, esta posee paredes más gruesas que la M. Los diámetros interiores dependen del tamaño del tubo y del espesor de pared (ICALA, 2010).

El tubo rígido puede unirse mediante soldadura común o soldadura fuerte (con plata), utilizando conexiones capilares (ICALA, 2010).

A continuación se presentan tablas que indican las características de cada tipo de tubería.



Tabla 2. Tipos y aplicaciones de tubería de cobre.

Código internacional de identificación		Diámetros nominales		Usos y aplicaciones
Tipo	Color	milímetros (pulg)		
M	Rojo	6 (1/4")	10 (3/8")	Casas de interés social Casas de interés medio Edificios habitacionales Edificios comerciales
		13 (1/2")	19 (3/4")	
		25 (1")	32 (1 1/4")	
		38 (1 1/2")	51 (2")	
		64 (2 1/2")	75 (3")	
		100 (4")		
L	Azul	6 (1/4")	10 (3/8")	Los mismos que el tipo "M", además de: Instalaciones de gas combustible y medicinal, tomas domiciliarias de agua potable
		13 (1/2")	19 (3/4")	
		25 (1")	32 (1 1/4")	
		38 (1 1/2")	51 (2")	
		64 (2 1/2")	75 (3")	
		100 (4")		
K	Verde	6 (1/4")	10 (3/8")	Los mismos que el tipo "L", además de: Uso industrial donde las presiones y temperaturas de trabajo son severas
		13 (1/2")	19 (3/4")	
		25 (1")	32 (1 1/4")	
		38 (1 1/2")	51 (2")	

Fuente: ICALA, 2010.



**Tabla 3. Dimensiones y características de tubería rígida de cobre.**

Medida nominal	Diámetro exterior	Diámetro interno			Espesor de pared			Peso por tramo de 6.10 mts			Presión máxima		
		M	L	K	M	L	K	M	L	K	M	L	K
1/4"	0.375"	0.324"	0.314"	0.276"	0.025"	0.030"	0.049"	2.132 lb	2.524 lb	5.385 lb	6,133 lb/pulg <sup>2</sup>	7,200 lb/pulg <sup>2</sup>	8,820 lb/pulg <sup>2</sup>
6.35 mm	9.525 mm	8.255 mm	8.001 mm	7.035 mm	0.635 mm	0.762 mm	1.245 mm	0.968 kg	1.146 kg	2.445 kg	431.15 kg/cm <sup>2</sup>	506.16 kg/cm <sup>2</sup>	620.04 kg/cm <sup>2</sup>
3/8"	0.500"	0.449"	0.429"	0.401"	0.025"	0.035"	0.049"	2.903 lb	3.965 lb	6.890 lb	4,500 lb/pulg <sup>2</sup>	6,300 lb/pulg <sup>2</sup>	7,056 lb/pulg <sup>2</sup>
9.50 mm	12.700 mm	11.43 mm	10.922 mm	10.21 mm	0.635 mm	0.889 mm	1.245 mm	1.318 kg	1.800 kg	3.128 kg	316.35 kg/cm <sup>2</sup>	442.89 kg/cm <sup>2</sup>	496.03 kg/cm <sup>2</sup>
1/2"	0.625"	0.572"	0.544"	0.494"	0.028"	0.040"	0.065"	4.083 lb	5.705 lb	12.813 lb	4,032 lb/pulg <sup>2</sup>	5,760 lb/pulg <sup>2</sup>	6,685 lb/pulg <sup>2</sup>
12.7 mm	15.875 mm	14.453 mm	13.843 mm	12.573 mm	0.711 mm	1.016 mm	1.651 mm	1.854 kg	2.590 kg	5.817 kg	283.45 kg/cm <sup>2</sup>	404.92 kg/cm <sup>2</sup>	469.95 kg/cm <sup>2</sup>
3/4"	0.875"	0.811"	0.784"	0.744"	0.032"	0.045"	0.065"	6.566 lb	9.110 lb	16.799 lb	3,291 lb/pulg <sup>2</sup>	4,632 lb/pulg <sup>2</sup>	5,200 lb/pulg <sup>2</sup>
19 mm	22.225 mm	20.601 mm	19.939 mm	18.923 mm	0.812 mm	1.143 mm	1.651 mm	2.981 kg	4.136 kg	7.627 kg	231.35 kg/cm <sup>2</sup>	325.62 kg/cm <sup>2</sup>	209.00 kg/cm <sup>2</sup>
1"	1.125"	1.054"	1.024"	0.994"	0.035"	0.050"	0.065"	9.310 lb	13.114 lb	20.824 lb	2,800 lb/pulg <sup>2</sup>	4,000 lb/pulg <sup>2</sup>	4,260 lb/pulg <sup>2</sup>
25 mm	28.575 mm	26.797 mm	26.035 mm	25.273 mm	0.889 mm	1.270 mm	1.651 mm	4.227 kg	5.954 kg	9.454 kg	196.84 kg/cm <sup>2</sup>	281.20 kg/cm <sup>2</sup>	299.47 kg/cm <sup>2</sup>
1 1/4"	1.375"	1.290"	1.264"	1.230"	0.042"	0.055"	0.072"	13.656 lb	17.700 lb	27.231 lb	2,749 lb/pulg <sup>2</sup>	3,600 lb/pulg <sup>2</sup>	3,988 lb/pulg <sup>2</sup>
32 mm	34.925 mm	32.791 mm	32.131 mm	31.267 mm	1.067 mm	1.397 mm	1.829 mm	6.200 kg	8.036 kg	12.363 kg	193.25 kg/cm <sup>2</sup>	253.08 kg/cm <sup>2</sup>	280.35 kg/cm <sup>2</sup>
1 1/2"	1.625"	1.526"	1.504"	1.459"	0.049"	0.060"	0.083"	18.821 lb	22.826 lb	41.249 lb	2,713 lb/pulg <sup>2</sup>	3,323 lb/pulg <sup>2</sup>	3,515 lb/pulg <sup>2</sup>
38 mm	41.275 mm	38.785 mm	38.227 mm	37.059 mm	1.245 mm	1.524 mm	2.108 mm	8.545 kg	10.363 kg	18.727 kg	190.72 kg/cm <sup>2</sup>	233.60 kg/cm <sup>2</sup>	247.10 kg/cm <sup>2</sup>
2"	2.125"	2.016"	1.984"		0.058"	0.070"		29.233 lb	35.042 lb		2,470 lb/pulg <sup>2</sup>	2,965 lb/pulg <sup>2</sup>	
51 mm	53.975 mm	51.029 mm	50.419 mm		1.473 mm	1.778 mm		13.272 kg	15.909 kg		173.65 kg/cm <sup>2</sup>	208.43 kg/cm <sup>2</sup>	
2 1/2"	2.625"	2.494"	2.464"		0.065"	0.080"		40.647 lb	49.658 lb		2,228 lb/pulg <sup>2</sup>	2,742 lb/pulg <sup>2</sup>	
64 mm	66.675 mm	63.373 mm	62.611 mm		1.651 mm	2.032 mm		18.454 kg	22.545 kg		156.62 kg/cm <sup>2</sup>	192.76 kg/cm <sup>2</sup>	
3"	3.125"	2.976"	2.944"		0.072"	0.090"		53.663 lb	66.645 lb		2,073 lb/pulg <sup>2</sup>	2,592 lb/pulg <sup>2</sup>	
76 mm	79.375 mm	75.597 mm	74.803 mm		1.889 mm	2.286 mm		24.363 kg	30.257 kg		145.73 kg/cm <sup>2</sup>	182.21 kg/cm <sup>2</sup>	
4"	4.125"	3.934"	3.904"		0.095"	0.110"		93.310 lb	107.729 lb		2,072 lb/pulg <sup>2</sup>	2,400 lb/pulg <sup>2</sup>	
102 mm	104.775 mm	99.949 mm	99.187 mm		2.413 mm	2.794 mm		42.363 kg	48.909 kg		145.65 kg/cm <sup>2</sup>	168.72 kg/cm <sup>2</sup>	

Fuente: ICALA, 2010.



**Tabla 4. Presiones de trabajo interno (kg/cm<sup>2</sup>) de tubo tipo M, L y K.**

Diámetro nominal	Diámetro exterior		Temperatura de servicio																		
			10°C (50°F) S=682.14 kg/cm <sup>2</sup>			38°C (100°F) S=421.94 kg/cm <sup>2</sup>			65°C (150°F) S=358.65 kg/cm <sup>2</sup>			93°C (200°F) S=337.55 kg/cm <sup>2</sup>			149°C (300°F) S=330.52 kg/cm <sup>2</sup>			205°C (400°F) S=210.97 kg/cm <sup>2</sup>			
			Tipo de tubería																		
pulg	mm	pulg	mm	M	L	K	M	L	K	M	L	K	M	L	K	M	L	K	M	L	K
1/4	6	3/8	9.525	67.961	104.264	122.839	54.409	64.493	75.983	46.248	54.819	64.585	43.527	51.594	60.786	42.620	50.520	59.520	27.205	32.247	37.991
3/8	10	1/2	12.700	65.131	88.952	129.198	40.287	55.022	79.916	34.244	46.769	67.929	32.230	44.017	63.933	31.568	43.100	62.601	20.144	27.511	39.958
1/2	13	5/8	15.875	56.375	82.340	101.818	34.871	50.932	62.979	29.640	43.292	53.532	27.897	40.748	50.383	27.316	39.897	19.33	17.436	25.466	31.489
3/4	19	7/8	22.225	46.473	68.389	97.264	28.748	41.065	60.163	24.434	34.906	51.138	22.997	32.852	48.131	22.518	32.158	47.128	14.373	20.533	30.082
1	25	1 1/8	28.575	38.421	58.375	74.703	23.765	34.871	46.208	20.201	29.640	39.277	19.012	27.897	36.966	18.616	27.316	36.196	11.883	17.436	23.104
1 1/4	32	1 3/8	34.925	38.548	50.081	60.638	23.844	30.966	37.508	20.267	26.321	31.882	19.075	24.773	30.006	18.678	24.256	29.381	11.922	15.483	18.754
1 1/2	38	1 5/8	41.275	37.772	46.588	56.375	23.364	28.617	34.871	19.860	24.495	29.640	18.591	23.054	27.897	18.302	22.574	27.316	11.682	14.409	17.436
2	51	2 1/8	53.975	34.056	41.424	53.550	21.066	25.623	30.649	17.906	21.780	26.052	16.853	20.499	24.520	16.502	20.071	24.009	10.022	12.812	15.325
2 1/2	64	2 3/8	66.675	31.234	38.264	45.351	19.320	23.666	28.052	16.422	20.118	23.845	15.456	18.935	22.442	15.134	18.540	21.974	9.660	11.834	14.026
3	78	3 1/8	79.375	28.857	36.104	43.881	17.850	22.332	27.143	15.172	18.982	23.071	14.280	17.666	21.714	13.982	17.401	21.262	8.925	11.186	13.571
4	102	4 1/8	104.775	28.584	33.389	40.975	17.681	20.653	25.345	15.028	17.555	21.544	14.144	16.522	20.278	13.850	16.178	19.854	8.840	10.326	12.673

**Fuente:** ICALA, 2010.

El tipo de tubería de cobre seleccionado fue el tipo M, debido a sus propiedades físicas como son temperatura y presión a la que puede ser sometida, así como su resistencia a la corrosión y su facilidad para transmitir calor.

### 3.3.2 Carcasa, tanque de almacenamiento de aceite y flauta de distribución- acero al carbón

El acero al carbón es una aleación formado principalmente de hierro, máximo de 1% de carbón, y otros elementos necesarios para su producción tales como silicio, magnesio e impurezas como azufre, fósforo, oxígeno e hidrógeno. Este es



considerado el material más común utilizado en las plantas de procesos y equipos industriales (Tyri, 2006).

El aumento del contenido de carbón en el acero produce un aumento de su resistencia a la tracción, un incremento del índice de fragilidad en frío y disminución de la tenacidad y la ductilidad (Tyri, 2006).

Según Tyri existen diversos tipos de acero al carbón como son:

- **Acero dulce:** Contiene porcentaje de carbón de 0,25%. Presenta una resistencia mecánica de 48 - 55 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 135 - 160 HB. Se puede soldar con una técnica adecuada. Se lo utiliza para la fabricación de piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, y herrajes.
- **Acero semidulce:** Posee 0,35% de carbón. Tiene una resistencia mecánica de 55 - 62 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 150 - 170 HB. Presenta un buen temple. Se lo utiliza para la producción de ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, y herrajes.
- **Acero semiduro:** su porcentaje de carbón es de 0,45%. Tiene una resistencia mecánica de 62 - 70 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 280 HB. Se templea bien, aunque puede tener deformaciones. Sus principales aplicaciones son la



elaboración de ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, y cilindros de motores de explosión, y transmisiones.

- **Acero duro:** El porcentaje de carbón que contiene es de 0,55%. Tiene una resistencia mecánica de 70 - 75 kg/mm<sup>2</sup>, y una dureza de 200 - 220 HB. Temple bien en agua y en aceite. Se lo utiliza para la producción de ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados (2006).

El tipo de acero seleccionado fue acero dulce debido a su facilidad de dobles, es decir por su baja dureza, bajo contenido de carbón, y su buena resistencia mecánica.

### 3.3.3 Manguera de caucho y lona

El intercambiador de calor necesita de conectores que lleven el fluido desde la flauta de distribución al inicio de los tubos dentro de la carcasa y del final tubería de cobre hacia el tanque de almacenamiento de aceite para permitir la recirculación.

El tipo de manguera de caucho y lona selecciona fue la multipropósitos ya que esta se encuentra en el mercado desde un diámetro de 3/16" (4,76 mm) hasta 2" (50,80 mm).



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

Esta es apta para soportar presiones de operación de 150 a 300 psi y una temperatura máxima de 90°C en el caso de que su utilización sea continua (SOLMAQ, 2011).

Normalmente este tipo de manguera se utiliza para la conducción de derivados del petróleo, gasolina, keroseno, grasas minerales, vegetales y animales, alcoholes, aire y agua (SOLMAQ, 2011).

Todas las características presentadas hacen óptimas la selección de este tipo de manguera para los fines pertinentes. Además que su costo es inferior a la tubería de cobre flexible tipo G que también fue un posible material para usar. A comparación con las mangueras este necesita soldadura de plata por lo que incrementa aún más el costo. Con respecto a la manguera para asegurar su buena conexión se necesita emplear abrazaderas de acero inoxidable tipo 8 (SOLMAQ, 2011).

### **3.4 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS ADICIONALES**

El sistema de intercambio de calor además de los componente básicos del intercambiador tipo tubo carcasa, necesita de ciertos instrumentos adicionales que permiten su perfecto funcionamiento. Estos se detallan a continuación:

#### **3.4.1 Bomba de aceite**



Se utilizó una bomba de engranajes marca Caterpillar de aceite de 1/8 HP para impulsar el flujo de salida desde el tanque de almacenamiento de aceite hasta su retorno al mismo tras el paso de este por los tubos del intercambiador de calor. Su flujo es 700 kg / h.

### **3.4.2 Soplador de aire o blower**

El blower es un instrumento que permite soplar aire a diferentes velocidades, caudales y flujo. El blower seleccionado posee una potencia de 1/10 HP y genera un flujo másico de 350 kg / h.

### **3.4.3 Termómetros**

Para poder hacer los controles adecuadas de la temperatura se han empleado 5 termómetros digitales cuyo rango de medición van desde 0 °C hasta 300 °C.

### **3.4.4 Anemómetro**

Es el instrumento empleado para medir el flujo de aire tanto a la entrada como a la salida del intercambiador de calor.

## **3.5 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURAS DE DISEÑO**

Para la estimación de la temperatura se realizó dos experimentos con los fluidos agua y aceite que eran los fluidos que inicialmente se iban a emplear. La prueba se realizó debido a que era necesario conocer el rango de temperatura en



los que se iban a trabajar. El agua ayudó a determinar este rango de variación que era posible alcanzar y una vez obtenido podía obtenerse como nueva variable el flujo másico del aire que es necesario ocupar para lograr el mismo rango de temperatura que el obtenido con el agua.

La prueba consistió en calentar aceite a 100 °C en un recipiente de acero quirúrgico. Posteriormente se colocó el recipiente dentro de otro que contenía agua a temperatura ambiente. Se tomó las temperaturas iniciales de los fluidos y la variación de estas a través del tiempo (cada treinta segundos transcurridos) por los primero cinco minutos. De esta manera se pudo apreciar el cambio de la temperatura entre los fluidos. La diferencia de los dos experimentos realizados es el volumen de agua empleado. En el primer experimento el volumen del agua era igual al del aceite, siendo estos de 950 ml cada uno. En el segundo experimento el volumen del agua era dos veces el volumen del aceite, siendo 1900 ml y 950 ml respectivamente. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 5. Variación de temperatura utilizando aceite - agua a volúmenes iguales**

TEMPERATURA ACEITE (°C)	TEMPERATURA AGUA (°C)	TIEMPO TRANSCURRIDO (min)
100	17.5	0
94	18.3	0,3
90.6	20.1	1
80.5	59.7	1,3



TEMPERATURA ACEITE (°C)	TEMPERATURA AGUA (°C)	TIEMPO TRANSCURRIDO (min)
79.3	61.8	2
74.1	69.5	2,3
69.9	70.4	3
66.3	72.3	3,3
63.7	75.9	4
60.1	79.9	4,3
59.8	80.2	5

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

De acuerdo con los datos obtenidos en el experimento (tabla 5) se denota que la variación de temperatura en ambos fluidos no es uniforme y presentan diferente desviación estándar (2,08 aceite y 0,74 agua).

En esta prueba realizada se puede apreciar que es posible disminuir la temperatura del aceite de 90.6 a 80.5 °C en un rango de tiempo de 30 s y la temperatura del agua varia en 39.6 °C en este rango tomado.

**Tabla 6. Variación de temperaturas utilizando aceite y agua en relación de volumen 1:2.**

TEMPERATURA ACEITE (°C)	TEMPERATURA AGUA (°C)	TIEMPO TRANSCURRIDO (min)
100	18	0
93	20	0,3
92	21,6	1
86	22	1,3



TEMPERATURA ACEITE (°C)	TEMPERATURA AGUA (°C)	TIEMPO TRANSCURRIDO (min)
79	22,6	2
74	23.8	2,3
71	25.4	3
66	26.1	3,3
63	27.1	4
60	28.1	4,3
59	28.6	5

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

Según los datos obtenidos en el segundo experimento (tabla 6), muestra una variación de temperatura no uniforme en los fluidos, presentando diferentes desviaciones estándar (2,23 aceite y 0,54 agua).

Comparando las dos tablas anteriores se identifica que la desviación estándar entre los dos experimentos realizados con respecto al aceite no presenta una gran variación como lo muestra en el agua. Esto se debe a que el volumen del aceite es igual en los tres experimentos, mientras que del agua varió en relación 1 a 2, y 1 a  $\frac{1}{2}$  respectivamente. Es por esta razón que la temperatura del agua cuando el volumen es el doble presenta un menor incremento que cuando el volumen es igual al aceite. Mientras que la temperatura del agua presenta mayor variación cuando el volumen es la mitad de la del aceite.



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

Una vez obtenidos los resultados se verificó que es posible que se reduzca la temperatura del aceite de 90 °C (194 °F) a 80 °C (176 °F) en un tiempo aproximado de 30 segundos que es el tiempo estimado que tarda en pasar el aceite a través de los tubos del intercambiador de calor. A partir de estos resultados se calculó el calor del aceite:

$$Q = W * C_{p_{ACEITE}} * (T_1 - T_2)$$

$$Q = 700,0 \frac{kg}{h} * 2,0 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (90,6^{\circ}C - 80,5^{\circ}C)$$

$$Q = 14000,0 KJ = 13269,437 BTU$$

Una vez determinado el calor que pierde el aceite se puede calcular el flujo másico del aire

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$14000,0 KJ = W * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (39,6^{\circ}C)$$

$$W_{aire} = 350,0 \frac{kg}{h}$$

Con este calor y flujo másico obtenido se calculó la temperatura final del aire partiendo de una temperatura de entrada de 20 °C (68 °F), siendo esta de:

$$Q_{perdido (aceite)} = Q_{ganado (aire)}$$

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$



$$14000,0 \text{ KJ} = 350,0 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1,0111 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } \Delta^{\circ}\text{C}} * (t_2 - 20^{\circ}\text{C})$$

$$t_2 = 59,6^{\circ}\text{C}$$

La prueba realizada con agua ayudó a determinar si era posible bajar la temperatura del aceite en 10 °C. Este era el objetivo que se deseaba alcanzar en un corto tiempo. A pesar que el calor específico del agua es mayor que el del aire, es posible teóricamente, conseguir la disminución de la temperatura del aceite en 10 °C como se desea. La diferencia entre el agua y el aire radica en el flujo másico que se necesita (impuesta por la potencia del blower) y la temperatura de salida del aire.

#### 4 DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

A continuación se procede a realizar los cálculos basados en la metodología de Kern, partiendo de los datos previamente establecidos. Los fluidos que se emplearon para el diseño de este intercambiador de calor fueron: como fluidos caliente aceite de palma que circulará por el interior de la tubería y como fluido que va a enfriar, aire que fluirá por el interior de la carcasa.



#### 4.1 CALCULOS TEÓRICOS

##### DATOS:

Calor específico del aire ( $C_{p, \text{AIRE}}$ )	1,0111	$\text{kJ} / \text{kg } \Delta^{\circ}\text{C}$
Calor específico del aceite ( $C_{p, \text{ACEITE}}$ )	2,0000	$\text{kJ} / \text{kg } \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica cobre ( $k_{\text{COBRE}}$ )	13,6800	$\text{kJ} / \text{h m } \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica aire ( $k_{\text{AIRE}}$ )	0,0864	$\text{kJ} / \text{h m } \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad Térmica aceite ( $k_{\text{ACEITE}}$ )	0,6047	$\text{kJ} / \text{h m } \Delta^{\circ}\text{C}$
Temperatura de entrada aceite ( $T_1$ )	90,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de salida aceite ( $T_2$ )	80,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de entrada aire ( $t_1$ )	20,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de salida aire ( $t_2$ )	59,6	$^{\circ}\text{C}$
Flujo másico aceite ( $W_{\text{ACEITE}}$ )	700,0000	$\text{kg} / \text{h}$
Flujo másico aire ( $w_{\text{AIRE}}$ )	350,0000	$\text{kg} / \text{h}$
Densidad aceite ( $\delta_{\text{ACEITE}}$ )	869,0001	$\text{kg} / \text{m}^3$
Densidad aire ( $\delta_{\text{AIRE}}$ )	1,2900	$\text{kg} / \text{m}^3$
Viscosidad dinámica aceite $75^{\circ}\text{C}$ ( $\mu_{\text{ACEITE}}$ )	47,1454	$\text{kg} / \text{m h}$
Viscosidad dinámica aire $28,5^{\circ}\text{C}$ ( $\mu_{\text{AIRE}}$ )	0,0610	$\text{kg} / \text{m h}$
Caída de presión		
Diámetro externo tubería ( $d_o$ )	0,0159	$\text{m}$
Radio externo tubería ( $r_o$ )	0,0079	$\text{m}$
Diámetro interno tubería ( $d_i$ )	0,0141	$\text{m}$
radio interno tubería ( $r_i$ )	0,0071	$\text{m}$
Longitud de tubos	1,5000	$\text{m}$
Número de pasos de tubos (n)	1	<b>adimensional</b>
Espaciado entre centro tubos (pt)	0,0206	$\text{m}$

##### 1. CÁLCULO DEL CALOR (BALANCE DE ENERGÍA)

$$Q = Q_{\text{perdido (ACEITE)}} = Q_{\text{ganado (AIRE)}}$$

$$Q = W * C_{p\text{ACEITE}} * (T_1 - T_2) = w * C_{p\text{AIRE}} * (t_2 - t_1)$$

$Q_{\text{perdido (ACEITE)}}$	13999,9957	$\text{kJ} / \text{h}$
$Q_{\text{ganado (AIRE)}}$	13999,9957	$\text{kJ} / \text{h}$



## 2. LTDM Temperatura Media Logarítmica ( $\Delta T_{ln}$ ) tomando en cuenta que el flujo es contra corriente

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

$\Delta T_{ln}$	43,6	$^{\circ}\text{C}$
-----------------	------	--------------------

## 3. Temperaturas Promedio ( $T_{prom\ ACEITE}$ ) y ( $t_{prom\ AIRE}$ )

$$T_{prom\ ACEITE} = T_C = \frac{T_1 - T_2}{2}$$

$$t_{prom\ AIRE} = t_C = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

$T_{prom\ ACEITE}$	85,0	$^{\circ}\text{C}$
$t_{prom\ AIRE}$	39,8	$^{\circ}\text{C}$

## 4. Parámetros R y S

R representa la razón entre las temperaturas del fluido caliente para el fluido frío. S es la razón entre el calor real transferido en el intercambiador y el máximo calor que termodinámicamente sería posible transferir entre dos fluidos con temperaturas de entrada y caudales dados.

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

R	0,253	<b>adimensional</b>
S	0,565	<b>adimensional</b>



**5. Factor de corrección de temperatura para intercambiadores de 1 -2 (1paso carcasa 2 de tubería)**

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} * \ln\left(\frac{1 - S}{1 - RS}\right)}{(R - 1) * \ln\left[\frac{2 - S * (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S * (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right]}$$

F                      0,9633                      **adimensional**

**6. DT<sub>media</sub> efectiva**

$$\Delta T_{media\ efectiva} = \Delta T_{Ln} * F$$

**Δt<sub>media</sub> efectiva                      42,0                      Δ°C**

**7. Coeficiente Global de Transferencia (U<sub>Ds</sub>), estimado en tablas**

Para aceite ligero - aire (Libro introducción a la termodinámica de Jorge A. Rodriguez

Intercambiador de calor tubo - carcasa	80 a 125	kJ / m <sup>2</sup> Δ°C h
Enfriadores	400 a 600	kJ / m <sup>2</sup> Δ°C h

**U<sub>Ds</sub> escogida                      125                      kJ / m<sup>2</sup> Δ°C h**

**8. Cálculo de Área total de transferencia estimada a partir de un U<sub>Ds</sub> escogida (As)**

$$As = \frac{Q}{\Delta T_{media\ efectiva} * U_{Ds\ escogida}}$$

**As                      2,6689                      m<sup>2</sup>**

**9. Superficie externa del tubo por pie lineal (a'')**

Tubería de cobre de 1/2 pulgada (0,0127 m) con diámetro externo de tubería de 0,0159 m

$$a'' = \pi * d_o$$

**a''                      0,0499                      m**



### 10. Número de tubos ( $N_T$ )

Se aproxima al entero superior que sea divisible entre el número de pasos por los tubos

$$N_T = \frac{As}{a'' * L}$$

$N_T$	35,69	tubos
$N_T$ Real	36	adimensional

### 11. Cálculo del área de la configuración de los tubos ( $A_{ct}$ )

Para el cálculo de dicha configuración se necesita el espaciado entre los centros de los tubos (pt).

Según Perry (pag 1114), una configuración triangular a  $60^\circ$  y con un diámetro exterior de 1/2 pulgada (0,0127 m), el pt es de 0,812 pulgada (0,0206248 m)

$$A_{ct} = \frac{1}{2} * pt^2 * \sin 60^\circ$$

$A_{ct}$	0,0002	$m^2$
----------	--------	-------

### 12. Cálculo del área total de los tubos para una configuración triangular que es la más común ( $A_t$ )

$$A_t = 2 * N_{Treal} * A_{ct}$$

$A_t$	0,0133	$m^2$
-------	--------	-------

### 13. Cálculo del diámetro mínimo de la carcasa ( $D_S$ )

$$D_S = \sqrt{\frac{4 * A_t}{\pi}} + 2 * d_o$$

$D_S$	0,1617	m
-------	--------	---

### 14. Estimado del espaciado de los deflectores (B)

Se debe revisar siempre dependiendo la caída de presión

$$D_S \geq B \geq \frac{D_S}{5}$$

	Min	Max	
B	0,0323	0,1617	m
B para cálculos	0,0970	m	



**15. Espesor deflectores se estable en 0,5 pulgadas (0,0127 m)**

	0,0127	m
--	--------	---

**16. Cálculo del número de deflectores ( $N_b$ ) y se aproxima al número entero superior**

$$N_b = \frac{L - B}{\text{espesor} + B}$$

$N_b$	12,7880	adimensional
Real $N_b$	0	adimensional

**17. Corrección del espacio entre los deflectores ( $B_C$ )**

$$B_C = \frac{L - N_b * \text{espesor}}{N_b + 1}$$

$B_C$	1,5000	m
-------	--------	---

**18. Cálculo del número de cruces por el intercambiador (N+1)**

$$(N + 1) = \frac{L}{B_C}$$

(N+1)	1,0000	adimensional
-------	--------	--------------

**19. Corrección del Área de transferencia de calor supuesto ( $A_{SC}$ )**

$$A_{SC} = a'' * N_T * L$$

$A_{SC}$	2,6923	m <sup>2</sup>
----------	--------	----------------

**20. Recálculo del Coeficiente Global de transferencia de calor supuesto ( $U_{DSC}$ )**

$$U_{DSC} = \frac{Q}{A_{SC} + \Delta T_{mef}}$$

$U_{DSC}$	123,9159	kJ / h m Δ°C
-----------	----------	--------------



## PARA LOS CÁLCULOS DE LA CARCASA

### 21. Area de flujo para la carcasa ( $a_s$ )

$$a_s = D_s * \left( \frac{C'}{pt} \right) * B_c$$

$$C' = pt - d_0$$

$C'$	0,0048	m	espaciado entre los tubos (pies)
$a_s$	0,0559	m <sup>2</sup>	

### 22. Velocidad Másica del aire en la carcasa ( $G_{S\text{ AIRE}}$ )

$$G_{S\text{ AIRE}} = \frac{W_s}{a_s}$$

$G_{S\text{ AIRE}}$	6259,8271	kg / h m <sup>2</sup>
---------------------	-----------	-----------------------

### 23. Cálculo del Diámetro equivalente ( $D_e$ ), dependiendo el arreglo

Arreglo triangular

$$D_e = \frac{4 \left[ A_{ct} - \frac{1}{2} * \pi * d_0^2 \right]}{\frac{1}{2} * \pi * d_0}$$

$D_e$	0,0137	m
-------	--------	---

### 24. Cálculo de Reynolds (Re) para la carcasa

$$R_e = \frac{D_e * G_{S\text{ AIRE}}}{\mu}$$

Re	1404,4452	adimensional
----	-----------	--------------



### 25. Cálculo del número de Prandtl (Pr) para la carcasa

$$Pr = \frac{\mu * Cp_{S\ AIRE}}{k_{AIRE}}$$

Pr                      0,7139                      **adimensional**

### 26. Cálculo del número de Nusselt para la carcasa (Nu)

Se asume que el factor de corrección de la viscosidad  $(\mu/\mu_w)^{0,14}$  es igual a uno, debido a que aún no se conoce la temperatura de la pared. Prandtl se asume un valor de 0,74 cuando son Gases. Este valor ya está incluido en la constante 0,24 de la siguiente ecuación:

$$Nu = 0,24 * Re^{0,6} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Nu                      18,5658                      **adimensional**

### 27. Cálculo del coeficiente individual externo ( $h_o$ )

$$h_o = \frac{Nu * k_{S\ AIRE}}{D_e}$$

$h_o$                       117,2075                      **kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C**

## PARA LOS CÁLCULOS DE LA TUBERÍA

### 28. Área de flujo por tubo ( $a'_t$ )

$$a'_t = \frac{\pi * d_o^2}{4}$$

$a'_t$                       0,0002                      **m<sup>2</sup>**

### 29. Área de flujo total en los tubos ( $a_t$ )

$$a_t = \frac{N_T * a'_t}{n}$$

$a_t$                       0,0071                      **m<sup>2</sup>**

### 30. Velocidad Másica del aceite por tubería ( $G_t$ , ACEITE)

$$G_t = \frac{W_t}{a_t}$$

$G_t$                       98299,7158                      **kg / h m<sup>2</sup>**



### 31. Cálculo de Reynolds (Re) para los tubos

$$Re = \frac{d_i * G_t ACEITE}{\mu_t ACEITE}$$

Re                      29,5032                      **adimensional**

### 32. Cálculo del número de Prandtl (Pr) para los tubos

$$Pr = \frac{\mu * Cp_i}{k_{ACEITE}}$$

Pr                      155,9179                      **adimensional**

### 33. Cálculo del número de Nusselt (Nu) para los tubos

Se asume que el factor de corrección de la viscosidad  $(\mu/\mu_w)^{0,14}$  es igual a uno, debido a que aún no se conoce la temperatura de la pared

$$Nu = 1,86 * \left( \frac{Re * Pr * d_i}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Nu                      6,5362                      **adimensional**

### 34. Cálculo del Coeficiente Individual interno ( $h_i$ )

$$h_i = \frac{Nu * k_t ACEITE}{d_i}$$

$h_i$                       279,3446                      **kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C**

### 35. Cálculo del Coeficiente Individual interno corregido ( $h_{i0}$ )

$$h_{i0} = h_i \frac{d_i}{d_0}$$

$h_{i0}$                       249,0687                      **kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C**



Tabla 7. Resumen: Cálculos teóricos antes de la corrección de viscosidad.

<i>VARIABLES</i>	<i>VALOR</i>
Coeficiente Global de Transferencia estimada ( $U_{DS}$ )	125 kJ / m <sup>2</sup> Δ°C h
Área total de transferencia estimada a partir de $U_{DS}$	2,6689 m <sup>2</sup>
Número de Tubos ( $N_T$ )	36
Diámetro mínimo de la carcasa ( $D_S$ )	0,1617 m
Número de Deflectores ( $N_b$ )	0
<b><i>CARCASA (Fluido AIRE)</i></b>	
Reynolds (Re)	1404,4452
Nusselt (Nu)	18,5658
Coeficiente individual externo ( $h_o$ )	117,2075 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
<b><i>TUBERÍA (FLUJO DE ACEITE)</i></b>	
Reynolds (Re)	29,5032
Prandtl	155,9179
Nusselt (Nu)	6,5362
Coeficiente individual interno ( $h_i$ )	249,0687 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C

**Elaborado por:** Propio.

El flujo del aire originado por el blower es de tipo laminar, lo que permite tener un coeficiente individual de convección de 117,2075 kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C. De igual manera, el flujo de aceite generado por la bomba es de tipo laminar, obteniéndose un coeficiente individual de convección de 249,0687 kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C.

El cálculo de los números adimensionales es necesario para poder obtener el coeficiente individual de transferencia de calor. En cuanto al aire, el número de Prandtl es constante, siendo este de 0.74. Por otro lado, es necesario determinar



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

Reynolds ya que este permite identificar el tipo de flujo. En este caso, como se mencionó anteriormente, el fluido es laminar tanto en la carcasa como en los tubos.

Se denota un mayor coeficiente individual de convección ( $h$ ) del aceite debido a que su conductividad térmica es mayor que del aire. Además, el diámetro de un tubo de cobre es pequeño (1/2 pulgada) a comparación del diámetro de la carcasa y siendo éste inversamente proporcional al  $h$ , produce un incremento del coeficiente del aceite y una disminución en la del aire.



## CORRECIÓN TEMPERATURAS DE LA PARED DE LA TUBERÍA

### 36. Cálculo de la temperatura de la pared interna ( $T_{wi}$ )

$$\frac{|T_{prom} - T_{wi}|}{\frac{1}{h_i * \pi * d_i * L}} = \frac{|T_{wi} - t_{prom}|}{\frac{\ln(d_o/d_i)}{2 * \pi * k_{ACEITE} * L} + \frac{1}{h_o * \pi * d_o * L}}$$

$T_{wi}$	69,5	°C
$T_{wi}$	124,6	°C
$T_{wi}$ REAL LÓGICO	69,5	°C

### 37. Cálculo de la temperatura de la pared externa de la tubería ( $T_{wo}$ )

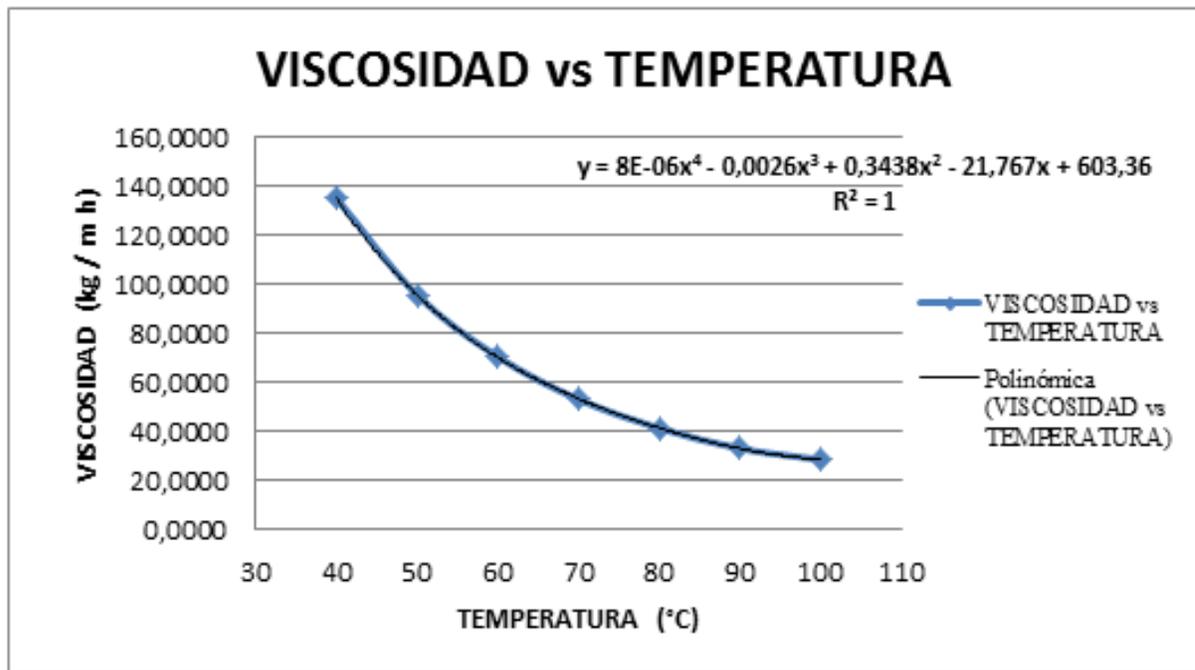
$$\frac{|T_{prom} - T_{wi}|}{\frac{1}{h_i * \pi * d_i * L}} = \frac{|T_{wi} - T_{wo}|}{\frac{\ln(d_o/d_i)}{2 * \pi * k_{AGUA} * L}}$$

$T_{wo}$	69,2	°C
$T_{wo}$	69,7	°C
$T_{wo}$ REAL LÓGICO	69,2	°C

### 38. Evaluar viscosidades a temperaturas de la pared interna y externa

#### Interpolación viscosidad a Temperatura de la Pared Interna (Aceite)

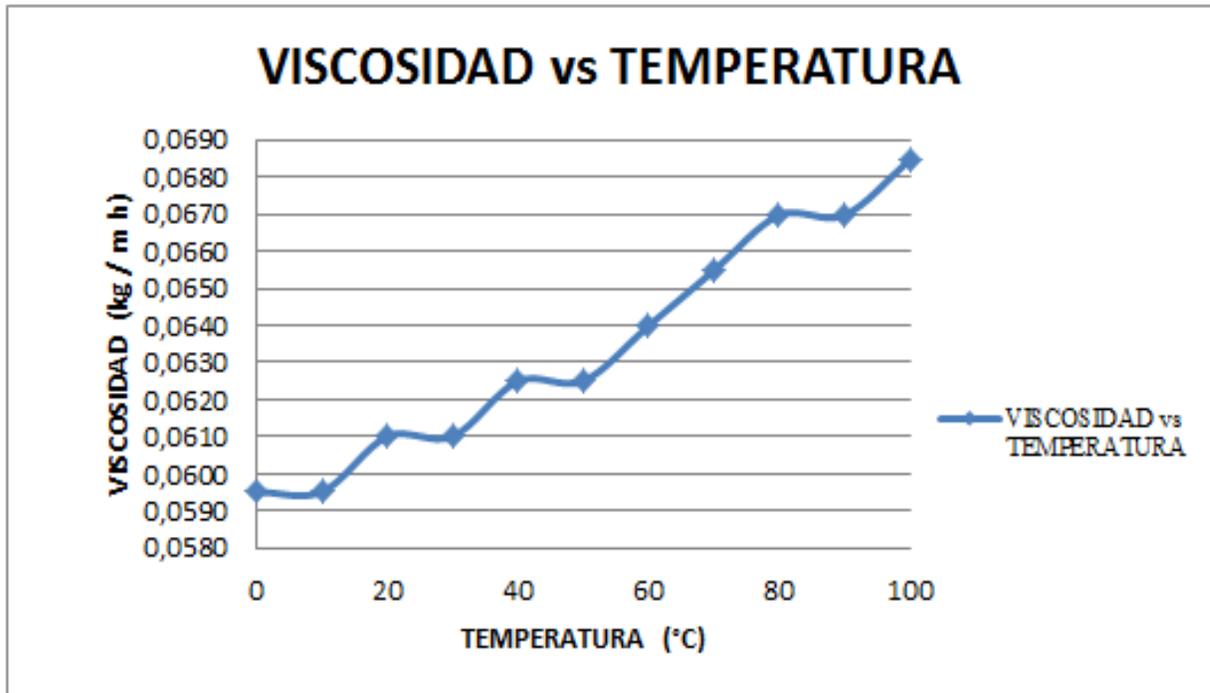
Temperatura (°C)	Viscosidad (cSTK)	Densidad (kg/m3)	Temperatura (°F)	Viscosidad (Lb/pie h)
40	41,6000	901	104	134,9338
50	29,7000	893	122	95,4796
60	22,0000	888	140	70,3296
70	16,7000	882	158	53,0258
80	13,1000	875	176	41,2650
90	10,5000	872	194	32,9616
100	9,1000	869	212	28,4684



$\mu$  W CORREGIDO A Twi      65,0563      kg / m h

**Interpolación viscosidad a Temperatura de la Pared Externa (Aire)**

Temperatura (°C)	Viscosidad (cSTK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°F)	Viscosidad (kg / m h)
0	0,000165	999,840	32	0,0595
10	0,000165	999,700	50	0,0595
20	0,000170	998,200	68	0,0610
30	0,000170	995,650	86	0,0610
40	0,000175	992,210	104	0,0625
50	0,000176	988,050	122	0,0625
60	0,000181	983,210	140	0,0640
70	0,000186	977,780	158	0,0655
80	0,000191	971,800	176	0,0670
90	0,000193	965,320	194	0,0670
100	0,000198	958,350	212	0,0685



$\mu_v$  CORREGIDO A Two      0,0655      kg / m h

### 39. Factores de Corrección de las Viscosidades

Factor de Corrección de la Viscosidad para la Carcasa (Aire)

$$\phi_s = \left( \frac{\mu}{\mu_{wo}} \right)^{0,14}$$

$F_s$       0,9901      adimensional

Factor de Corrección de la Viscosidad para la Tubería (Aceite)

$$\phi_t = \left( \frac{\mu}{\mu_{wi}} \right)^{0,14}$$

$F_t$       0,9559      adimensional



#### 40. Corrección de los Coeficientes Individuales de Transferencia de Calor

**Coefficiente Individual de transferencia de Calor interno corregido tubería aceite ( $h_{ioc}$ )**

$$h_{ioc} = h_{io} * \phi_t$$

$h_{ioc}$	238,0895	$\text{kJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$
-----------	----------	---

**Coefficiente Individual de transferencia de Calor externo corregido carcasa aire ( $h_{oc}$ )**

$$h_{oc} = h_o * \phi_s$$

$h_{oc}$	116,0454	$\text{kJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$
----------	----------	---

#### 41. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de calor limpio ( $U_c$ )

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{ioc}} + \frac{r_o * \ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{h_o}$$

$1/U_c$	0,0129	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
---------	--------	---

#### 42. Factor de ensuciamiento interno ( $R_{di}$ ) y factor de ensuciamiento externo ( $R_{do}$ )

Según el Prof. Jesus Ontiverus (pdf Equipo de Transferencia de Calor) Operaciones Unitarias II Transferencia de Calor

$R_{di}$	0,000147	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
$R_{do}$	0,000147	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$

#### 43. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor de Diseño ( $U_d$ )

$1/U_d$	0,0132	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
$U_d$	75,8881	$\text{KJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$

#### 44. Cálculo del Área de transferencia de Calor (A)

$$A = \frac{Q}{U_d * \Delta T_{ln}}$$

A	4,2350	$\text{m}^2$	Requerida
$A_{sc}$	2,6689	$\text{m}^2$	Disponibile
Exceso %	-58,68		



#### 45. Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) para carcasa

$$f_D = \frac{64}{Re}$$

$f_{D \text{ CARCASA}}$	0,0456	adimensional
-------------------------	--------	--------------

#### 46. Caída de presión en la carcasa ( $\Delta p_s$ )

$$\Delta p_s = \left[ f_{D \text{ CARCASA}} * \left( \frac{D_S * (N + 1)}{D_E} \right) \right] * \left( \frac{G_S^2}{2\delta_{AIRE}} \right)$$

$\Delta p_s$	8176716,0665	lb/h <sup>2</sup> *pie
$\Delta p_s$	0,9389	Pascal (kg/s <sup>2</sup> m)
$\Delta p_s$	0,0001	PSI
$\Delta p_s$	0,0000	Atm

#### 47. Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) para tubería

$$f_D = \frac{64}{Re}$$

$f_{D \text{ TUBERIA}}$	2,1693	adimensional
-------------------------	--------	--------------

#### 48. Caída de presión en la tubería ( $\Delta p_t$ )

$$\Delta p_t = \left[ 4 * n + f_{D \text{ TUBERIA}} * \left( \frac{L * N_T}{d_o} \right) \right] * \left( \frac{G_t^2}{2\delta_{ACEITE}} \right)$$

$\Delta p_t$	41037713281,4169	lb/h <sup>2</sup> *pie
$\Delta p_t$	4712,2559	Pascal (kg/s <sup>2</sup> m)
$\Delta p_t$	0,6833	PSI
$\Delta p_t$	0,0465	Atm



Tabla 8. . Resumen de los cálculos teóricos con la corrección de viscosidad.

VARIABLES	VALOR
Temperatura Corregida para Pared Interna de la Tubería ( $T_{wi}$ )	69,5°C
Temperatura Corregida para Pared Externa de la Tubería ( $T_{wo}$ )	69,2°C
Viscosidad Aceite a ( $T_{wi}$ )	65,0563 kg / m h
Viscosidad Aire a ( $T_{wo}$ )	0,0655 kg / m h
Factor de Corrección de Viscosidad para la Carcasa (aire) ( $F_s$ )	0,9901
Factor de Corrección de Viscosidad para la Tubería (aceite) ( $F_t$ )	0,9559
Coefficiente Individual de Transferencia de calor corregido para la tubería (aceite) ( $h_{ioc}$ )	238,0895 kJ / h m <sup>2</sup> °C
Coefficiente Individual de Transferencia de calor corregido para carcasa (aire) ( $h_{oc}$ )	116,0454 kJ / h m <sup>2</sup> °C
Coefficiente Global de Transferencia de Calor de Diseño ( $U_d$ )	75,8881 kJ / h m <sup>2</sup> °C
Área de Transferencia de Calor Requerida (A)	4,2350 m <sup>2</sup>
Área de transferencia de Calor Disponible ( $A_{sc}$ )	2,6689 m <sup>2</sup>
Eficiencia (Comparación entre Área requerida vs disponible)	58,68%
Caída de Presión en la Carcasa ( $D_{Ps}$ )	0,0001 PSI (0,000 atm)
Caída de Presión en la Tubería ( $D_{Pt}$ )	0,6833 PSI (0,047 atm)

Elaborado por: Propio.

Según los resultados finales obtenidos, se observa que existe una deficiencia en el equipo desde los cálculos teóricos. Esto se debe a que se rediseñó el equipo sin deflectores, pero al basarse en el método de Kern, este toma como parámetro de diseño a estos. Al no tomar en cuenta los deflectores, el área mínima necesaria para



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

el diseño de este intercambiador de calor es de 4,2350 m<sup>2</sup>. Mientras que los resultados finales del equipo presentan un área de apenas 2,6689 m<sup>2</sup>. Esto genera una disminución en la transferencia de calor en un 60%.

En comparación con los datos obtenidos antes de corregir la viscosidad y el área de transferencia se muestra que los coeficientes individuales de transferencia de calor presentan una disminución.



## 4.2 CÁLCULOS REALES

### DATOS:

Calor específico del aire ( $C_{p, \text{AIRE}}$ )	1,0111	$\text{kJ} / \text{kg} \Delta^{\circ}\text{C}$
Calor específico del aceite ( $C_{p, \text{ACEITE}}$ )	2,0000	$\text{kJ} / \text{kg} \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica cobre ( $k_{\text{COBRE}}$ )	13,6800	$\text{kJ} / \text{h m} \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica aire ( $k_{\text{AIRE}}$ )	0,0864	$\text{kJ} / \text{h m} \Delta^{\circ}\text{C}$
Conductividad Térmica aceite ( $k_{\text{ACEITE}}$ )	0,6047	$\text{kJ} / \text{h m} \Delta^{\circ}\text{C}$
Temperatura de entrada aceite ( $T_1$ )	90,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de salida aceite ( $T_2$ )	77,0	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de entrada aire ( $t_1$ )	22,5	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de salida aire ( $t_2$ )	73,9	$^{\circ}\text{C}$
Flujo másico aceite ( $W_{\text{ACEITE}}$ )	700,0000	$\text{kg} / \text{h}$
Flujo másico aire ( $w_{\text{AIRE}}$ )	350,0000	$\text{kg} / \text{h}$
Densidad aceite ( $\delta_{\text{ACEITE}}$ )	869,0001	$\text{kg} / \text{m}^3$
Densidad aire ( $\delta_{\text{AIRE}}$ )	1,2900	$\text{kg} / \text{m}^3$
Viscosidad dinámica aceite $75^{\circ}\text{C}$ ( $\mu_{\text{ACEITE}}$ )	47,1454	$\text{kg} / \text{m h}$
Viscosidad dinámica aire $22,5^{\circ}\text{C}$ ( $\mu_{\text{AIRE}}$ )	0,0610	$\text{kg} / \text{m h}$
Caída de presión		
Diámetro externo tubería ( $d_o$ )	0,0159	$\text{m}$
Radio externo tubería ( $r_o$ )	0,0079	$\text{m}$
Diámetro interno tubería ( $d_i$ )	0,0141	$\text{m}$
radio interno tubería ( $r_i$ )	0,0071	$\text{m}$
Longitud de tubos	1,5000	$\text{m}$
Número de pasos de tubos (n)	1	adimensional
Espaciado entre centro tubos (pt)	0,0206	$\text{m}$

### I. CÁLCULO DEL CALOR (BALANCE DE ENERGÍA)

$$Q = Q_{\text{perdido}} (\text{ACEITE}) = Q_{\text{ganado}} (\text{AIRE})$$

$$Q = W * C_{p\text{ACEITE}} * (T_1 - T_2) = w * C_{p\text{AIRE}} * (t_2 - t_1)$$

$Q_{\text{perdido}} (\text{ACEITE})$	18199,9945	$\text{kJ} / \text{h}$
$Q_{\text{ganado}} (\text{AIRE})$	18199,9945	$\text{kJ} / \text{h}$



**2. LTDM Temperatura Media Logarítmica ( $\Delta T_{ln}$ ) tomando en cuenta que el flujo es contra corriente**

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

$\Delta T_{ln}$	31,5	$\Delta^\circ\text{C}$
-----------------	------	------------------------

**3. Temperaturas Promedio ( $T_{prom\ ACEITE}$ ) y ( $t_{prom\ AIRE}$ )**

$$T_{prom\ ACEITE} = T_C = \frac{T_1 - T_2}{2}$$

$$t_{prom\ AIRE} = t_C = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

$T_{prom\ ACEITE}$	83,5	$^\circ\text{C}$
$t_{prom\ AIRE}$	48,2	$^\circ\text{C}$

**4. Parámetros R y S**

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

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

R	0,253	<b>adimensional</b>
S	0,762	<b>adimensional</b>

**5. Factor de corrección de temperatura para intercambiadores de 1-2 (1 paso carcasa 2 de tubería)**

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} * \ln\left(\frac{1 - S}{1 - RS}\right)}{(R - 1) * \ln\left[\frac{2 - S * (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S * (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right]}$$

F	0,8629	<b>adimensional</b>
---	--------	---------------------

**6.  $\Delta T_{media\ efectiva}$**

$$\Delta T_{media\ efectiva} = \Delta T_{Ln} * F$$

$\Delta t_{media\ efectiva}$	27,2	$\Delta^\circ\text{C}$
------------------------------	------	------------------------



### 7. Coeficiente Global de Transferencia ( $U_{Ds}$ ), estimado en tablas

Para aceite ligero - aire (Libro introducción a la termodinámica de Jorge A. Rodríguez)

Intercambiador de calor tubo - carcasa 80 a 125  $\text{kJ} / \text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h}$

Enfriadores 400 a 600  $\text{kJ} / \text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h}$

$U_{Ds}$  escogida 125  $\text{kJ} / \text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h}$

### 8. Cálculo de Área total de transferencia estimada a partir de un $U_{Ds}$ escogida ( $A_s$ )

$$A_s = \frac{Q}{\Delta T_{media\ efectiva} * U_{Ds\ escogida}}$$

$A_s$  5,3620  $\text{m}^2$

### 9. Superficie externa del tubo por pie lineal ( $a''$ )

Tubería de cobre de 1/2 pulgada (0,0127 m) con diámetro externo de tubería de 0,0159 m

$$a'' = \pi * d_o$$

$a''$  0,0499  $\text{m}$

### 10. Número de tubos ( $N_T$ )

$N_T$  36,00 **tubos**  
 $N_T$  Real 36 **adimensional**

### 11. Cálculo del área de la configuración de los tubos ( $A_{ct}$ )

Para el cálculo de dicha configuración se necesita el espaciado entre los centros de los tubos (pt).

Según Perry (pag 1114), una configuración triangular a  $60^\circ$  y con un diámetro exterior de 1/2 pulgada (0,0127 m), el pt es de 0,812 pulgada (0,0206248 m).

$$A_{ct} = \frac{1}{2} * pt^2 * \sin 60^\circ$$

$A_{ct}$  0,0002  $\text{m}^2$



**12. Cálculo del área total de los tubos para una configuración triangular que es la más común ( $A_t$ )**

$$A_t = 2 * N_{Treal} * A_{ct}$$

$A_t$	0,0133	$m^2$
-------	--------	-------

**13. Cálculo del diámetro mínimo de la carcasa ( $D_s$ )**

$D_s$	0,2000	$m$
-------	--------	-----

**14. Estimado del espaciado de los deflectores ( $B$ )**

Se debe revisar siempre dependiendo la caída de presión

$$D_s \geq B \geq \frac{D_s}{5}$$

	<b>Min</b>	<b>Max</b>	
$B$	0,0400	0,2000	$m$
<b>B para cálculos</b>	0,1200	<b>m</b>	

**15. Espesor deflectores se estable en 0,5 pulgadas (0,0127 m)**

	0,0127	$m$
--	--------	-----

**16. Cálculo del número de deflectores ( $N_b$ ) y se aproxima al número entero superior**

Real $N_b$	0	<b>adimensional</b>
------------	---	---------------------

**17. Corrección del espacio entre los deflectores ( $B_C$ )**

$$B_C = \frac{L - N_b * \text{espesor}}{N_b + 1}$$

$B_C$	1,5000	$m$
-------	--------	-----

**18. Cálculo del número de cruces por el intercambiador ( $N+1$ )**

$$(N + 1) = \frac{L}{B_C}$$

$(N+1)$	1,0000	<b>adimensional</b>
---------	--------	---------------------



19. Corrección del Área de transferencia de calor supuesto ( $A_{SC}$ )

$$A_{SC} = a'' * N_T * L$$

$A_{SC}$	2,6924	$m^2$
----------	--------	-------

20. Recálculo del Coeficiente Global de transferencia de calor supuesto ( $U_{DSC}$ )

$$U_{DSC} = \frac{Q}{A_{SC} + \Delta T_{mef}}$$

$U_{DSC}$	248,9475	$kJ / h m \Delta^{\circ}C$
-----------	----------	----------------------------

PARA LOS CÁLCULOS DE LA CARCASA

21. Area de flujo para la carcasa ( $a_S$ )

$$a_S = D_S * \left( \frac{C'}{pt} \right) * B_C$$

$$C' = pt - d_0$$

$C'$	0,0048	$m$	espaciado entre los tubos (pies)
$a_S$	0,0692	$m^2$	

22. Velocidad Másica del aire en la carcasa ( $G_{S \text{ AIRE}}$ )

$$G_{S \text{ AIRE}} = \frac{W_S}{a_S}$$

$G_{S \text{ AIRE}}$	5060,4729	$kg / h m^2$
----------------------	-----------	--------------

23. Cálculo del Diámetro equivalente ( $D_e$ ), dependiendo el arreglo  
Arreglo triangular

$$D_e = \frac{4 \left[ A_{ct} - \frac{1}{2} * \pi * d_0^2 \right]}{\frac{1}{2} * \pi * d_0}$$

$D_e$	0,0137	$m$
-------	--------	-----



#### 24. Cálculo de Reynolds (Re) para la carcasa

$$Re = \frac{D_e * G_{SAIRE}}{\mu}$$

Re                    1135,3599                    **adimensional**

#### 25. Cálculo del número de Prandtl (Pr) para la carcasa

$$Pr = \frac{\mu * Cp_{SAIRE}}{k_{AIRE}}$$

Pr                    0,7139                    **adimensional**

#### 26. Cálculo del número de Nusselt para la carcasa (Nu)

Se asume que el factor de corrección de la viscosidad  $(\mu/\mu_w)^{0,14}$  es igual a uno, debido a que aún no se conoce la temperatura de la pared.

$$Nu = 0,24 * Re^{0,6} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

Nu                    16,3415                    **adimensional**

#### 27. Cálculo del coeficiente individual externo ( $h_o$ )

$$h_o = \frac{Nu * k_{SAIRE}}{D_e}$$

$h_o$                     103,1651                    **kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C**

#### PARA LOS CÁLCULOS DE LA TUBERÍA

#### 28. Área de flujo por tubo ( $a'_t$ )

$$a'_t = \frac{\pi * d_o^2}{4}$$

$a'_t$                     0,0002                    **m<sup>2</sup>**

#### 29. Área de flujo total en los tubos ( $a_t$ )

$$a_t = \frac{N_T * a'_t}{n}$$

$a_t$                     0,0071                    **m<sup>2</sup>**



### 30. Velocidad Másica del aceite por tubería ( $G_t$ )

$$G_t = \frac{W_t}{a_t}$$

$G_t$	98299,7158	kg / h m <sup>2</sup>
-------	------------	-----------------------

### 31. Cálculo de Reynolds (Re) para los tubos

$$Re = \frac{d_i * G_t ACEITE}{\mu_t ACEITE}$$

Re	29,5032	adimensional
----	---------	--------------

### 32. Cálculo del número de Prandtl (Pr) para los tubos

$$Pr = \frac{\mu * Cp_i}{k_{ACEITE}}$$

Pr	155,9179	adimensional
----	----------	--------------

### 33. Cálculo del número de Nusselt (Nu) para los tubos

Se asume que el factor de corrección de la viscosidad  $(\mu/\mu_w)^{0,14}$  es igual a uno, debido a que aún no se conoce la temperatura de la pared

$$Nu = 1,86 * \left( \frac{Re * Pr * d_i}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Nu	6,5361	adimensional
----	--------	--------------

### 34. Cálculo del Coeficiente Individual interno ( $h_i$ )

$$h_i = \frac{Nu * k_t ACEITE}{d_i}$$

$h_i$	279,3419	kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
-------	----------	---------------------------

### 35. Cálculo del Coeficiente Individual interno corregido ( $h_{i0}$ )

$$h_{i0} = h_i \frac{d_i}{d_0}$$

$h_{i0}$	249,0664	kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
----------	----------	---------------------------



**Tabla 9. Resumen: Cálculos reales antes de la corrección de viscosidad.**

<i>VARIABLES</i>	<i>VALOR</i>
Coeficiente Global de Transferencia estimada ( $U_{DS}$ )	125 kJ / m <sup>2</sup> Δ°C h
Área total de transferencia estimada a partir de $U_{DS}$	5,3620 m <sup>2</sup>
Número de Tubos ( $N_T$ )	36
Diámetro mínimo de la carcasa ( $D_s$ )	0,20 m
Número de Deflectores ( $N_b$ )	0
<b><i>CARCASA (Fluido AIRE)</i></b>	
Reynolds (Re)	1135,3599
Nusselt (Nu)	16,3415
Coeficiente individual externo ( $h_o$ )	103,1651 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
<b><i>TUBERÍA (FLUJO DE ACEITE)</i></b>	
Reynolds (Re)	29,5032
Prandtl	155,9179
Nusselt (Nu)	6,5361
Coeficiente individual interno ( $h_i$ )	249,0664 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

El flujo del aire originado por el blower es de tipo laminar, lo que permite tener un coeficiente individual de convección de 103,1651 kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C. De igual manera, el flujo de aceite generado por la bomba es de tipo laminar, obteniéndose un coeficiente individual de convección de 249,0687 kJ / h m<sup>2</sup> Δ°C.

En comparación con los datos obtenidos del cálculo teórico, el aire posee un coeficiente individual de transferencia de calor menor ya que el Reynolds



recalculado es menor es decir el fluido presenta una característica más laminar que el calculado inicialmente.

### CORRECIÓN TEMPERATURAS DE LA PARED DE LA TUBERÍA

#### 36. Cálculo de la temperatura de la pared interna ( $T_{wi}$ )

$$\frac{|T_{prom} - T_{wi}|}{\frac{1}{h_i * \pi * d_i * L}} = \frac{|T_{wi} - t_{prom}|}{\frac{\ln(d_o/d_i)}{2 * \pi * k_{ACEITE} * L} + \frac{1}{h_o * \pi * d_o * L}}$$

$T_{wi}$	72,4	°C
$T_{wi}$	108,2	°C
$T_{wi}$ REAL LÓGICO	72,4	°C

#### 37. Cálculo de la temperatura de la pared externa de la tubería ( $T_{wo}$ )

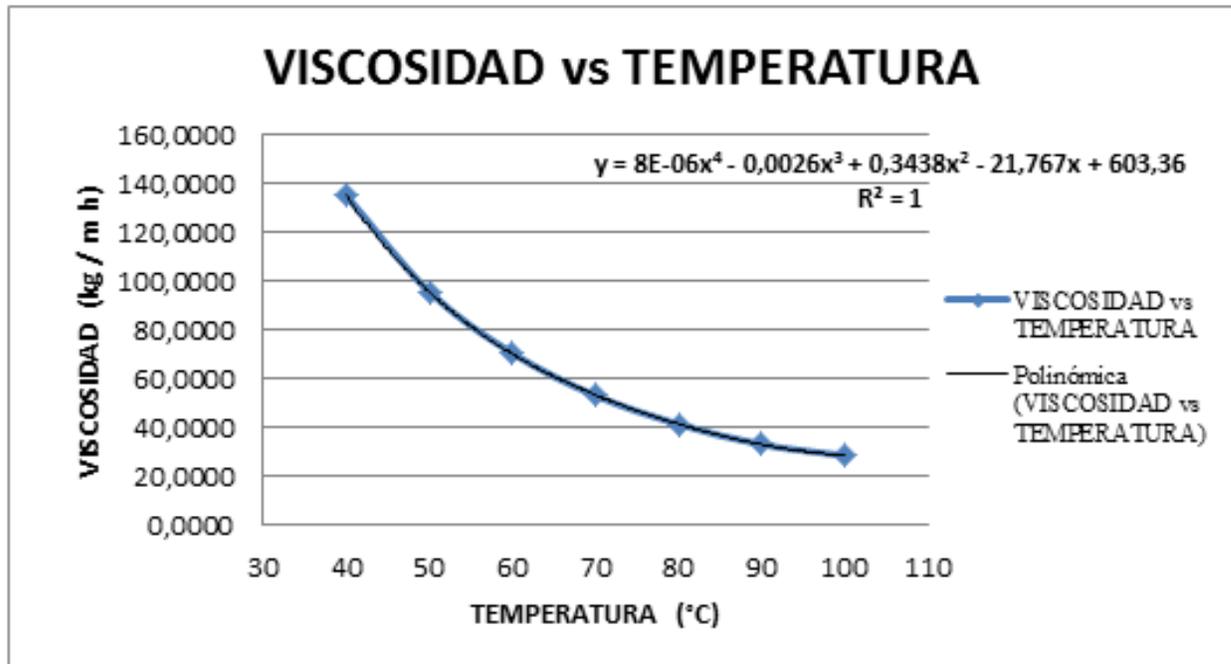
$$\frac{|T_{prom} - T_{wi}|}{\frac{1}{h_i * \pi * d_i * L}} = \frac{|T_{wi} - T_{wo}|}{\frac{\ln(d_o/d_i)}{2 * \pi * k_{AGUA} * L}}$$

$T_{wo}$	72,2	°C
$T_{wo}$	72,5	°C
$T_{wo}$ REAL LÓGICO	72,2	°C

#### 38. Evaluar viscosidades a temperaturas de la pared interna y externa

##### Interpolación viscosidad a Temperatura de la Pared Interna (Aceite)

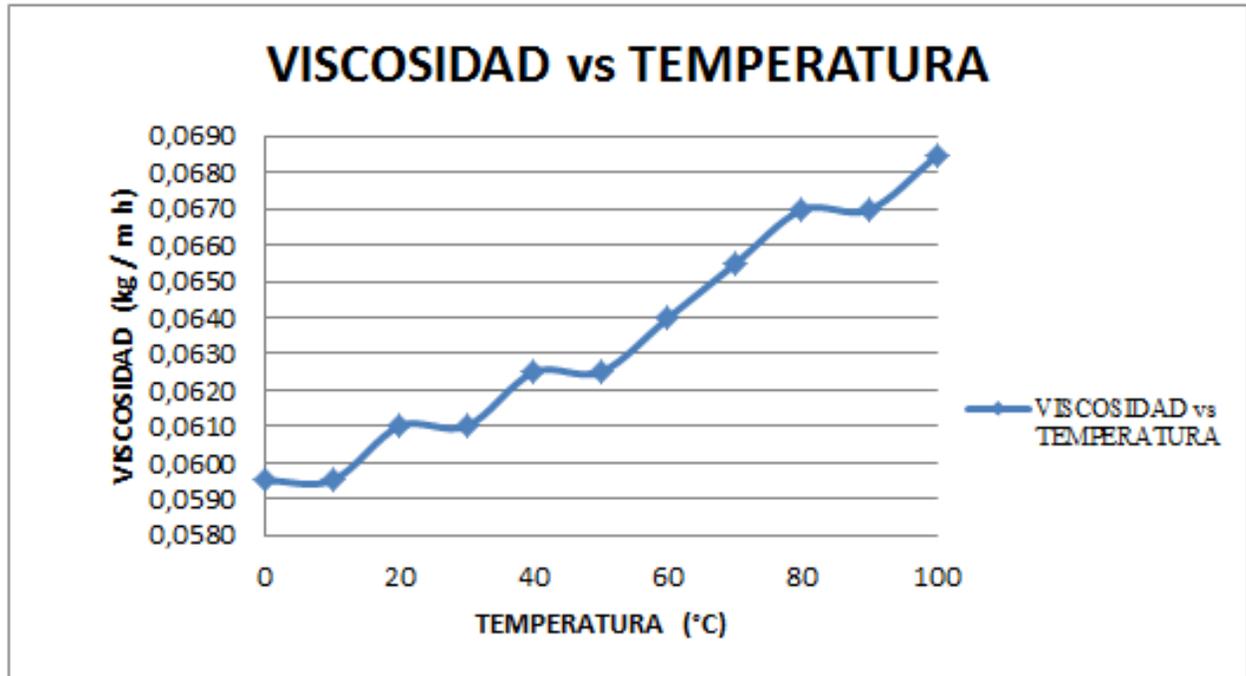
Temperatura (°C)	Viscosidad (cSTK)	Densidad (kg/m3)	Temperatura (°F)	Viscosidad (Lb/pie h)
40	41,6000	901	104	134,9338
50	29,7000	893	122	95,4796
60	22,0000	888	140	70,3296
70	16,7000	882	158	53,0258
80	13,1000	875	176	41,2650
90	10,5000	872	194	32,9616
100	9,1000	869	212	28,4684



W CORREGIDO A  $T_{wi}$       62,6752      kg / m h

#### Interpolación viscosidad a Temperatura de la Pared Externa (Aire)

Temperatura (°C)	Viscosidad (cSTK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°F)	Viscosidad (kg / m h)
0	0,000165	999,840	32	0,0595
10	0,000165	999,700	50	0,0595
20	0,000170	998,200	68	0,0610
30	0,000170	995,650	86	0,0610
40	0,000175	992,210	104	0,0625
50	0,000176	988,050	122	0,0625
60	0,000181	983,210	140	0,0640
70	0,000186	977,780	158	0,0655
80	0,000191	971,800	176	0,0670
90	0,000193	965,320	194	0,0670
100	0,000198	958,350	212	0,0685



$\mu_w$  CORREGIDO A Two      0,0655      kg / m h

### 39. Factores de Corrección de las Viscosidades

Factor de Corrección de la Viscosidad para la Carcasa (Aire)

$$\phi_s = \left( \frac{\mu}{\mu_{wo}} \right)^{0,14}$$

$F_s$       0,9901      adimensional

Factor de Corrección de la Viscosidad para la Tubería (Aceite)

$$\phi_t = \left( \frac{\mu}{\mu_{wi}} \right)^{0,14}$$

$F_t$       0,9609      adimensional



#### 40. Corrección de los Coeficientes Individuales de Transferencia de Calor

**Coefficiente Individual de transferencia de Calor interno corregido tubería aceite ( $h_{ioc}$ )**

$$h_{ioc} = h_{io} * \phi_t$$

$h_{ioc}$	239,3334	$\text{kJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$
-----------	----------	---

**Coefficiente Individual de transferencia de Calor externo corregido carcasa aire ( $h_{oc}$ )**

$$h_{oc} = h_o * \phi_s$$

$h_{oc}$	102,1422	$\text{kJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$
----------	----------	---

#### 41. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de calor limpio ( $U_c$ )

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{ioc}} + \frac{r_o * \ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{h_o}$$

$1/U_c$	0,0140	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
---------	--------	---

#### 42. Factor de ensuciamiento interno ( $R_{di}$ ) y factor de ensuciamiento externo ( $R_{do}$ )

Según el Prof. Jesus Ontiverus (pdf Equipo de Transferencia de Calor) Operaciones Unitarias II Transferencia de Calor

$R_{di}$	0,000147	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
$R_{do}$	0,000147	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$

#### 43. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor de Diseño ( $U_d$ )

$1/U_d$	0,0143	$\text{m}^2 \Delta^\circ\text{C h} / \text{KJ}$
$U_d$	69,7914	$\text{KJ} / \text{h m}^2 \Delta^\circ\text{C}$

#### 44. Cálculo del Área de transferencia de Calor (A)

$$A = \frac{Q}{U_d * \Delta T_{lm}}$$

A	8,2868	$\text{m}^2$	Requerida
$A_{sc}$	5,3620	$\text{m}^2$	Disponible
Exceso %	-54,55		



#### 45. Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) para carcasa

$$f_D = \frac{64}{Re}$$

$f_{D \text{ CARCASA}}$	0,0564	adimensional
-------------------------	--------	--------------

#### 46. Caída de presión en la carcasa ( $\Delta_{P_s}$ )

$$\Delta_{P_s} = \left[ f_{D \text{ CARCASA}} * \left( \frac{D_s * (N + 1)}{D_e} \right) \right] * \left( \frac{G_s^2}{2\delta_{AIRE}} \right)$$

$\Delta_{P_s}$	8176483,2002	lb/h <sup>2</sup> *pie
$\Delta_{P_s}$	0,9389	Pascal (kg/s <sup>2</sup> m)
$\Delta_{P_s}$	0,0001	PSI
$\Delta_{P_s}$	0,0000	Atm

#### 47. Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) para tubería

$$f_D = \frac{64}{Re}$$

$f_{D \text{ TUBERIA}}$	2,1693	adimensional
-------------------------	--------	--------------

#### 48. Caída de presión en la tubería ( $\Delta_{P_t}$ )

$$\Delta_{P_t} = \left[ 4 * n + f_{D \text{ TUBERIA}} * \left( \frac{L * N_T}{d_o} \right) \right] * \left( \frac{G_t^2}{2\delta_{ACEITE}} \right)$$

$\Delta_{P_t}$	41038882035,4910	lb/h <sup>2</sup> *pie
$\Delta_{P_t}$	4712,3901	Pascal (kg/s <sup>2</sup> m)
$\Delta_{P_t}$	0,6833	PSI
$\Delta_{P_t}$	0,0465	Atm



Tabla 10. Resumen de los cálculos reales con la corrección de viscosidad.

VARIABLES	VALOR
Temperatura Corregida para Pared Interna de la Tubería ( $T_{wi}$ )	72,4°C
Temperatura Corregida para Pared Externa de la Tubería ( $T_{wo}$ )	72,2°C
Viscosidad Aceite a ( $T_{wi}$ )	62,6752 kg / m h
Viscosidad Aire a ( $T_{wo}$ )	0,0655 kg / m h
Factor de Corrección de Viscosidad para la Carcasa (aire) ( $F_s$ )	0,9901
Factor de Corrección de Viscosidad para la Tubería (aceite) ( $F_t$ )	0,9609
Coefficiente Individual de Transferencia de calor corregido para la tubería (aceite) ( $h_{ioc}$ )	239,3334 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
Coefficiente Individual de Transferencia de calor corregido para carcasa (aire) ( $h_{oc}$ )	102,1422 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
Coefficiente Global de Transferencia de Calor de Diseño ( $U_d$ )	69,7914 kJ / h m <sup>2</sup> Δ°C
Área de Transferencia de Calor Requerida ( $A$ )	8,2868 m <sup>2</sup>
Área de transferencia de Calor Disponible ( $A_{sc}$ )	5,3620 m <sup>2</sup>
Eficiencia (Comparación entre Área requerida vs disponible)	54,55%
Caída de Presión en la Carcasa ( $D_{Ps}$ )	0,0001 PSI (0,000 atm)
Caída de Presión en la Tubería ( $D_{Pt}$ )	0,6833 PSI (0,047 atm)

Elaborado por: Propio.

Según los resultados finales obtenidos, se observa que existe una deficiencia en el equipo de aproximadamente 55%. Esto se debe a que el equipo se construyó sin deflectores, y se aumentó el diámetro de la carcasa a 0,20 m, cuando teóricamente debería ser de 0,16 m. Mecánicamente no se podía construir en base a



los cálculos teóricos. Tomando en cuenta todos los ajustes y cambios, el área mínima necesaria para el diseño de este intercambiador de calor es de 8,2868 m<sup>2</sup>. Mientras que los resultados finales del equipo presentan un área de apenas 5,3620 m<sup>2</sup>. Esto genera una disminución en la transferencia de calor en un 60%.

## CAPÍTULO IV

### 5 CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO

#### CARCAZA

Para la construcción del intercambiador de calor tipo tubo carcasa fue necesario adquirir materiales previamente estudiados, analizados en el capítulo III, en la sección de selección de materiales del intercambiador de calor. Estos materiales son:

Tabla 11. Materiales del Intercambiador de Calor

MATERIAL	CANTIDAD
Plancha de Acero al carbón de 2 mm. de espesor y dimensiones 1,22 m x 2,44 m	1
Tubo de Acero cuadrado 40 x 40 x 1,5 mm	1
Tubo negro ASTM Tipo T de 2 pulgadas x 6 m	1
Tubos de cobre tipo M de 1/2 pulgada x 6 m	12



Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

MATERIAL	CANTIDAD
Bomba de aceite de 1/2 HP	1
Abrazaderas de acero inoxidable	108
Aislante térmico (esponja aluminio)	3 m
Manguera de Lona y caucho	50 m
Tubo de acero de 3/8	5,85 m
Macilla Expóxica	5 frascos
Blower de 1/10 HP	1
Codos de cobre	72
Motor Bomba	1
Conectores de energía	1
Cinta de aluminio - rollos de 36 m	3
Teflon	5
Resistencia Eléctrica	1
Termómetros	5

**Elaborado por:** Propio

Posterior a la compra de materiales se empieza la construcción del intercambiador de calor basado en el diseño previamente establecido.

La primera etapa de construcción fue el ensamble de la base sobre la cual se encuentra ubicado el sistema de intercambio de calor. Para ello se empleó el tubo



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

de acero cuadrado. Sus medidas son  $2 \times 0,80$  m. Posteriormente se elaboró el tanque de almacenamiento de aceite cuyas dimensiones son  $0,40$  m de diámetro y  $0,70$  m de alto. La carcasa del intercambiador que posee un diámetro de  $0,20$  m y de largo  $2$  m. Estos dos elementos fueron realizados utilizando la plancha de acero al carbón. Los dos elementos poseen forma cilíndrica por lo que fue necesario doblar la plancha de acero y soldar sus extremos.

El tanque de almacenamiento, tiene incorporado un tapón de desfogue que permite sacar el aceite que se encuentra almacenado en el caso que se requiera realizar mantenimiento y limpieza del tanque que se encuentra ubicado en su parte lateral. Asimismo posee una ventana en la cual se introducen las mangueras que recircularán el fluido y una resistencia eléctrica que se encuentra empotrada en el fondo del tanque.

La carcasa es un cilindro hueco que contiene entradas y salidas para la tubería de cobre, cinco puntos de control de temperatura donde se colocan los termómetros digitales y uno para tomar la medida de velocidad del aire a través de un anemómetro.

La tercera etapa de construcción consiste en colocar la tubería de cobre en el interior de la carcasa manteniendo la disposición triangular y el espaciado de la tubería según el diseño realizado. Existen 36 tubos de cobre de  $1,5$  metros de largo.



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

Posteriormente, se elabora la flauta de distribución de acero negro ASTM Tipo T, la cual posee una entrada y 36 salidas compuestas por tubería de acero al carbón de 3/8 pulgada que se encuentran soldados al tubo negro.

Luego se coloca la bomba de aceite de 1/2 HP; tubería de acero de 3/8 pulgada (9,53 mm) que conecta el tanque de almacenamiento con la bomba y de esta hacia la flauta; y un cajetín de conexiones eléctricas de 110 V en el que va conectado la bomba, blower y resistencia eléctrica, sobre la base que sostiene el sistema de intercambio.

A continuación se conectó las mangueras de caucho y lona a los terminales de la tubería de acero de la flauta y a la entrada de la tubería de cobre. Asimismo, se instaló estas mangueras en las salidas de la tubería de cobre para depositarlas en la ventana del tanque de almacenamiento. Dichas mangueras poseen distintas longitudes y el número de estas empleadas fue de 72. Para evitar el derrame del fluido, se sujetaron las mangueras con abrazaderas utilizando una por cada conexión manguera-tubería, por lo que fueron necesarias 108 abrazaderas de acero inoxidable.

Se coloca el blower en el extremo final de la carcasa, contrario a la entrada de aceite a la tubería de cobre. Finalmente se recubre la carcasa, tanque de



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

almacenamiento y la flauta de distribución con la cinta de aluminio y el aislante térmico de esponja aluminio para evitar las perdidas mayores de temperatura.

**Figura 15. Intercambiador de Calor Tubo – Carcasa, fase de construcción.**

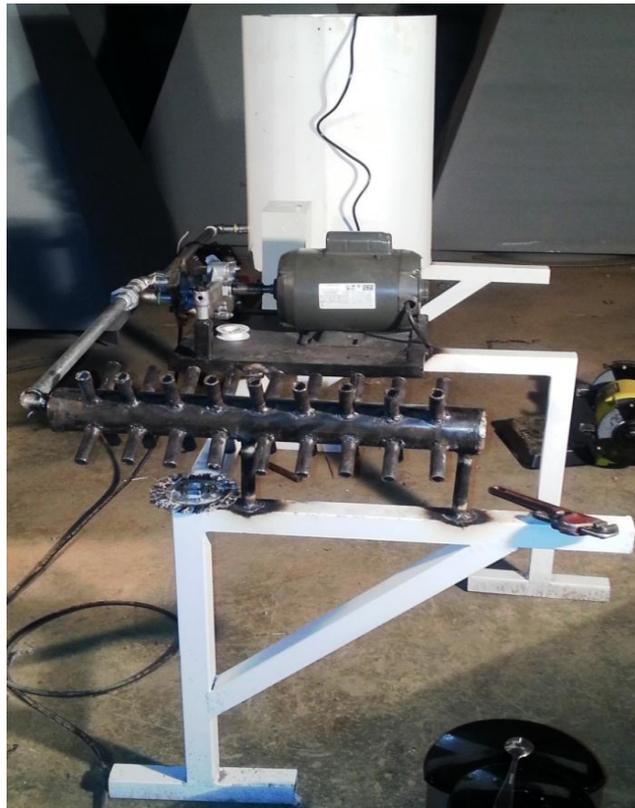


**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida



Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

**Figura 16. Tanque de almacenamiento de aceite, bomba de aceite y flauta de distribución.**



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida



Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

**Figura 17. Intercambiador de Calor, tanque de almacenamiento de aceite y bomba.**



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida



Figura 18. Distribución de tubos dentro del intercambiador de calor.



Fuente: Daniela Armas y Antonio Almeida

## CAPÍTULO V

### 6 OPERACIONALIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para la manipulación del intercambiador se ha elaborado el manual de operación del equipo que se presenta en el anexo 1, y se sugiere que sea revisado previamente a la operación del mismo

El procedimiento para el correcto funcionamiento del intercambiador de calor consiste en los siguientes pasos:



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

1. Verificar el nivel de aceite que se encuentra en el tanque de almacenamiento. Este debe estar sobre el nivel mínimo, indicado por la varilla de control dentro del tanque de almacenamiento, para la puesta en marcha del equipo. Caso contrario no se recomienda operar el intercambiador debida a que la bomba podría sufrir daños.
2. Comprobar que las mangueras de lona y caucho estén conectadas y selladas correctamente para evitar cualquier fuga que pudiese existir dentro del sistema. De manera especial se debe confirmar que las mangueras de recirculación al tanque estén colocadas en el interior de la ventana del mismo.

**Figura 19. Flauta de distribución y mangueras de lona y caucho.**



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida



3. Conectar la caja de switch a la corriente eléctrica verificando previamente que los dos conectores se encuentren apagados para evitar un repentino funcionamiento del equipo.

**Figura 20. Caja de Switch. Botón derecho encendedor Blower. Botón izquierdo encendedor bomba.**



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida

4. Encender la resistencia eléctrica para calentar el aceite vegetal contenido en el tanque de almacenamiento hasta que su temperatura alcance los 90 °C. Para ello se debe emplear un termómetro digital. El tiempo aproximado de



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

calentamiento de 15 - 20 minutos cuando el volumen del aceite se encuentra en el nivel mínimo.

5. Colocar los termómetros digitales y el anemómetro en sus puntos de control y encenderlos, es decir aquellos que se encuentran ubicados en la carcasa del intercambiador de calor.
6. Accionar el botón de encendido de la bomba y esperar a que el aceite recircule al tanque.

**Figura 21. Bomba de aceite.**



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida

7. Prender el blower y comenzar a tomar las medidas de temperatura y velocidad de viento a diferentes tiempos.



Figura 22. Blower.



**Fuente:** Daniela Armas y Antonio Almeida

8. Apagar una vez terminada la práctica la resistencia, bomba y blower del sistema de intercambio de calor.

Existen varias prácticas diseñadas, que pueden ser empleadas para la comprensión por parte de los estudiantes del funcionamiento del intercambiador de calor. Ver anexo 2.

## CAPÍTULO VI

### 7 RESULTADOS

Se realizaron pruebas del equipo a diferentes temperaturas de entrada del aceite, así como variando el flujo de entrada de aire. Se escogió tres velocidades de flujo del aire determinadas a partir de la abertura de la compuerta del blower. Para ello se tomó las velocidades cuando el blower tenía la compuerta totalmente



abierta, semi-abierta y completamente cerrada siendo estas 2,4 m/s, 1,94 m/s y 1,25 m/s respectivamente. Estas variaciones de velocidad se las hicieron debido a que se quería comprobar la variación de la temperatura de salida del aire y del aceite cuando se variaba el flujo del aire. Además se escogió dichas velocidades debido a la facilidad de manipulación de la compuerta del blower.

Se tomó los datos a cada minuto en un intervalo de 5 minutos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 12. Prueba número 1 del intercambiador con velocidad de aire de 2,4 m/s.**

Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Temperatura inicial Aceite (°C)	54,0	52,0	56,0	53,0	52,6
Temperatura final Aceite (°C)	34,0	44,0	51,0	52,0	52,0
Temperatura inicial Aire (°C)	28,6	31,8	33,1	34,1	35,6
Temperatura final Aire (°C)	41,9	44,2	45,3	46,0	46,4
Temperatura inicial Carcasa (°C)	26,3	29,3	31,1	32,2	32,9
Temperatura medio Carcasa (°C)	29,2	32,7	34,0	35,0	35,7
Temperatura final Carcasa (°C)	41,8	41,5	41,5	47,1	44,7

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida



Tabla 13. Variaciones de temperatura de la Prueba número 1

Tiempo (min)	Variación Temperatura del aceite (°C)	Variación de Temperatura del aire (°C)
1	20,0	13,3
2	7,0	12,4
3	5,0	12,2
4	1,0	11,9
5	0,6	10,8

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

En la primera prueba realizada se parte de una velocidad de aire de 2,4 m/s que proporciona un flujo másico de 350,15 kg/h, siendo este el flujo escogido durante los cálculos teóricos realizados. Además, se utilizó recirculación de aceite lo que impide tener una temperatura de entrada constante. Es por esta razón que los resultados obtenidos en la tabla 12 muestran que la temperatura inicial del aceite varía en 4 °C por cada muestra tomada.

Adicionalmente, esta primera prueba permitió demostrar que, como se muestra en la tabla 13, existe un gradiente de temperatura casi uniforme ( $\Delta 10$  °C) con respecto al aire en cada intervalo de tiempo tomado, mientras que en el aceite no sucede lo mismo. Este varía de una prueba a otra hasta estabilizarse.



**Tabla 14. Prueba número 2 del intercambiador con velocidad de aire de 2,14 m/s.**

Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Temperatura inicial Aceite (°C)	68,0	66,4	66,4	66,3	66,3
Temperatura final Aceite (°C)	67,0	66,3	66,2	66,2	66,2
Temperatura inicial Aire (°C)	28,5	29,3	30,8	30,9	31,1
Temperatura final Aire (°C)	52,4	54,8	56,2	56,8	57
Temperatura inicial Carcasa (°C)	34,5	35,0	36,1	36,3	36,5
Temperatura medio Carcasa (°C)	40,0	40,4	41,1	41,4	41,9
Temperatura final Carcasa (°C)	47,0	44,0	48,5	48,9	49

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

**Tabla 15. Variaciones de temperatura de la Prueba número 2.**

Tiempo (min)	Variación de Temperatura del aceite (°C)	Variación de Temperatura del aire (°C)
1	1,0	23,9
2	0,1	25,5
3	0,2	25,4
4	0,1	25,9
5	0,1	25,9

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

En el segundo ensayo se realizó con la misma velocidad de aire que la anterior prueba, sin embargo la variación de esta es la temperatura de entrada del



aceite. Este era alrededor de diez veces más que en la primera prueba. Lo que permitió tener una variación mayor de temperatura del aire, como se muestran en las tablas 14 y 15, que es de 20 °C. Por otro lado el aceite mantiene una variación de 0,1 °C causado por la recirculación de este.

**Tabla 16. Prueba número 3 del intercambiador con velocidad de aire de 1,94 m/s.**

Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Temperatura inicial Aceite (°C)	66,4	66,8	67,0	67,1	67,4
Temperatura final Aceite (°C)	66,2	66,5	66,9	67,0	67,3
Temperatura inicial Aire (°C)	31,8	33,5	34,3	34,1	34,1
Temperatura final Aire (°C)	57,9	58,8	59,2	59,7	60
Temperatura inicial Carcasa (°C)	38,0	38,6	39,0	39,2	39,2
Temperatura medio Carcasa (°C)	42,8	43,2	43,7	44,1	44,2
Temperatura final Carcasa (°C)	51,0	51,4	52,0	52,5	52,8

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

**Tabla 17. Variaciones de temperatura de la Prueba número 3.**

Tiempo (min)	Variación de Temperatura del aceite (°C)	Variación de Temperatura del aire (°C)
1	0,2	26,1
2	0,3	25,3
3	0,1	24,9



Tiempo (min)	Variación de Temperatura del aceite (°C)	Variación de Temperatura del aire (°C)
4	0,1	25,6
5	0,1	25,9

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

En la tercera prueba se varió la velocidad de circulación del aire. Para esto, se cerró la compuerta del blower hasta la mitad y se tomó la velocidad de 1,94 m/s, lo que representa un flujo másico de 283,04 kg/h. En este ensayo se muestra que existe una variación de alrededor de 25 °C en el aire mientras que en el aceite es de 0.1 °C.

Se denota según la tabla 16 y 17 que la temperatura de salida del aire en comparación con las pruebas anteriores es ligeramente mayor. Esto se debe a que el flujo de aire es menor y por lo tanto gana más calor.

**Tabla 18. Prueba número 4 del intercambiador con velocidad de aire de 1,25 m/s.**

Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Temperatura inicial Aceite (°C)	68,2	68,4	68,6	68,8	69,2
Temperatura final Aceite (°C)	68,0	68,2	68,4	68,7	69,0
Temperatura inicial Aire (°C)	24,6	25,2	25,3	25,2	25,4
Temperatura final Aire (°C)	61,5	61,8	62,1	62,2	62,5
Temperatura inicial Carcasa (°C)	36,7	37,4	37,7	37,9	38,6



Tiempo (min)	1	2	3	4	5
Temperatura medio Carcasa (°C)	46,9	47,7	48,2	48,3	48,2
Temperatura final Carcasa (°C)	54,7	55,1	55,5	55,7	56,0

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

Tabla 19. Variaciones de temperatura de la Prueba número 4.

Tiempo (min)	Variación de Temperatura del aceite (°C)	Variación de Temperatura del aire (°C)
1	0,2	36,9
2	0,2	36,6
3	0,2	36,8
4	0,1	37,0
5	0,2	37,1

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

La prueba número cuatro se la realizó a una velocidad de circulación del aire de 1,25 m que representa un flujo másico de 182,37 kg/s. En esta prueba se obtuvo, como se muestra en las tablas 18 y 19, una mayor variación de temperatura en el aire en comparación a las pruebas anteriores, siendo esta de alrededor de 30 °C. Esto se debe a que el flujo es menor y por lo tanto se concentra el calor que emite el aceite, transfiriéndose en mayor proporción al aire.



## CAPITULO VII

### 8 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES

**VARIABLES DE DISEÑO:** Consiste en determinar e identificar teóricamente la capacidad de transferencia de calor, gradiente de temperatura, pérdidas por fricción, tiempo de estadio, caudal y tipo de fluidos.

**VARIABLES DE CONSTRUCCIÓN:** Radica en dimensionar el intercambiador, seleccionar métodos de construcción, tipo de material a ser empleado y establecer costos.

**VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO:** Reside en comprobar con el equipo en operación, las variables de diseño que fueron obtenidas mediante cálculos y establecer las desviaciones existentes.

### 9 MÉTODO

#### 9.1 NIVEL DE ESTUDIO

**Descriptivo:** Se diseñará, construirá, y operará un intercambiador de calor tipo tubo carcasa, sin realizar comparaciones con otros equipos similares preexistentes, para emplearse en el laboratorio de procesos de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.



**Explicativo:** Se identificará las condiciones óptimas de operación del equipo construido, esto es, la capacidad del intercambio térmico entre los fluidos seleccionados para el diseño.

**Correlacionales:** Se investigará y relacionará conceptos, fundamentos, teorías y variables de funcionamiento para diseñar, construir y operar un intercambiador de calor tipo tubo carcasa.

## 9.2 MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN

**Documental:** Se recopilará información acerca de diseño, construcción, y condiciones de operación, previo a la elaboración del intercambiador. Esta se obtendrá especialmente a través de libros, artículos científicos, ensayos, revistas, normas nacionales e internacionales y medios electrónicos.

**Proyecto Especial:** Se instalará el intercambiador de calor tipo tubo carcasa, posterior a su construcción, en el laboratorio de Procesos de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK. Este servirá para que los estudiantes puedan llevar su conocimiento teórico a la práctica.

**De campo:** Una vez construido e instalado el intercambiador de calor en el laboratorio de Procesos, se realizará pruebas y ensayos para verificar que las condiciones de operación teóricas sean similares a las reales.



### 9.3 MÉTODO

**Método Inductivo-Deductivo:** Se basará en conocimientos teóricos generales para el esbozo del intercambiador de calor tipo de tubo carcasa, con el fin de lograr su edificación y funcionamiento.

### 9.4 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

**Experimentación:** Se realizarán ensayos y pruebas del equipo construido con la finalidad de observar su correctiva actividad, a través de la utilización de medidores de temperatura y de variaciones de caudal.

### 9.5 VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS

Se verificará la confiabilidad del Intercambiador de calor construido en base a la contrastación con un modelo de intercambiador de calor simulado en un programa computacional. Además se realizará pruebas de ensayo hasta obtener datos estadísticamente confiables y así realizar un manual de operación para los estudiantes de la Facultad de Ciencias Ambientales.

### 9.6 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los Datos fueron procesados mediante el paquete Microsoft Office (Word y Excel).

## 10 ASPECTOS ADMINISTRATIVOS



## 10.1 RECURSOS HUMANOS

Se trabajó con dos investigadores principales que se encargarán de diseñar, supervisar la construcción del equipo, y realizar las pruebas y mediciones del correcto funcionamiento del intercambiador. Además, se contó con la guía de un profesor director y dos docentes auxiliares.

Para la construcción del equipo, se contó con una persona especializada en el ensamblaje de equipos industriales.

## 10.2 RECURSOS TÉCNICOS Y MATERIALES

### 10.2.1 EQUIPOS

Instrumentos de medición calibrados:

- Termómetros
- Anemómetros
- Cronómetros

### 10.2.2 MATERIALES

Materiales de construcción para el intercambiador:

- Tanque de almacenamiento
- Tubería de cobre



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

- Carcasa de acero al carbón
- Accesorios de cobre y acero al carbón
- Empaques
- Teflón
- Cola
- Turcas y tornillos de acero al carbón
- Bomba
- Resistencia eléctrica
- Abrazaderas
- Mangueras de caucho y lona
- Fluidos de prueba

### 10.2.3 LOGÍSTICA

Vehículo Propio

### 10.2.4 OTROS

Se utilizó otros recursos como:

- Dos computadores portátiles personales
- Paquete programación de Microsoft Office, Autocad
- Mano de obra técnica para la construcción del equipo.



### 10.3 RECURSOS FINANCIEROS

UNIDAD	MATERIAL	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	IVA	TOTAL	FINANCIAMIENTO		
						PROPIO	OTROS	
1	Plancha de Acero al carbón de 2mm. Espesor: 1,22 x 2,44 m	60,79	60,79	7,29	68,08	X		
1	Tubo de Acero cuadrado 40 x 40 x 1,5 mm	17,94	17,94	2,15	20,09	X		
1	Tubo negro ASTM Tipo T de 2 pulgadas x 6 m	54,66	54,66	6,56	61,22	X		
12	Tubos de cobre tipo M de 1/2 pulgada x 6 m	24,99	299,88	35,99	335,87	X		
1	Bomba de aceite de 1/2 HP y Motor Bomba	446,43	446,43	53,57	500,00		X	
108	Abrazaderas de acero inoxidable	0,39	42,43	5,09	47,52	X		
3	Aislante térmico metros	3,60	10,79	1,30	12,09	X		
50	Manguera de Lona y caucho	4,56	227,85	27,34	255,19	X		
5,85	Tubo de acero de 3/8	2,65	15,50	1,86	17,36	X		
5	Macilla Expóxica	6,83	34,13	4,10	38,23	X		
1	Blower de 1/10 HP	37,38	37,38	4,49	41,87	X		
72	Codos de cobre	0,45	32,40	3,89	36,29	X		
60	Aceite de palma (litro)	1,81	108,6	13,04	121,64	X		
3	Cinta de aluminio	8,74	26,23	3,15	29,38	X		
1	Mano de obra y Movilización	1233,93	1233,93	148,00	1382,00	X		
1	Resistencia Eléctrica, conectores de energía, teflon	200,00	200,00	24,00	224,00	X		
5	Termómetros	34,00	170,00	20,40	190,40	X		
					<b>TOTAL</b>	<b>3381,24</b>		



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

El financiamiento del equipo se realizo de la siguiente manera:

**Tabla 20. Financiamiento del Intercambiador de calor**

<b>PERSONA / INSTITUCIÓN</b>	<b>VALOR</b>	<b>PORCENTAJE</b>
UNIVERSIDAD SEK	\$ 500	14.8%
DANIELA ARMAS	\$ 1440.62	42.6 %
ANTONIO ALMEIDA	\$ 1440.62	42.6%

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

La Universidad Internacional SEK aportó con el 14.8 % del costo total del equipo, mientras que el resto del financiamiento se lo dividió en partes iguales para los dos integrantes que realizaron la construcción del equipo.



### 10.4 CRONOGRAMA DE TRABAJO

	2012			2013										
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	
PRESENTACIÓN PROYECTOS														
REVISIÓN														
ACEPTACIÓN														
EJECUCIÓN: DISEÑO														
EJECUCIÓN: CONSTRUCCIÓN														
EJECUCIÓN: PRUEBAS														
INFORMES POR DIRECTOR DE PROYECTO														
PREDEFENSA														
ENTREGA A DIRECTOR PRIMER BORRADOR														
REVISIÓN TRIBUNAL														
APROBACIÓN DE DOCUMENTO FINAL														
DEFENSA														
LEGALIZACIÓN DE TÍTULOS														
INVESTIDURA														



## CAPÍTULO VIII

### 11 CONCLUSIONES

1. Las condiciones que impone el diseño termodinámico del intercambiador de calor, no siempre son factibles de plasmar en el diseño mecánico. Para esto, es necesario tomar en cuenta la facilidad en manipular el material y su disponibilidad en el mercado. En este caso específico, mecánicamente no era posible doblar la plancha de acero al carbón a un diámetro inferior de 20 cm debido a que las dobladoras poseen como límite inferior de dobléz dicha dimensión. Por lo tanto, existe un incremento en el porcentaje de error con respecto a los datos calculados y los datos obtenidos al probar el equipo.

Además, los intercambiadores de calor por lo general suelen poseer deflectores que ayudan al fluido que circula por el interior de la carcasa a tener mayor superficie de contacto con los tubos. Este equipo al no ser normado y poseer un diámetro de carcasa mínima, no es fue posible colocar deflectores que ayuden a cumplir con aquella función. Los cálculos muestran que era necesario colocar 13 deflectores sin embargo el recalcu lo sin deflectores muestra que existe un déficit de área de contacto requerida y por lo tanto genera otro error.



2. En las pruebas realizadas se observa que existe una transferencia de calor. El fluido que gana calor es el aire y éste presenta una variación de temperatura alta mientras que el fluido que sede calor (aceite) muestra una variación de temperatura muy baja. Esto se debe principalmente al diseño mecánico del intercambiador ya que al no poder doblar el acero al carbón a un diámetro de carcasa de 16 cm, produce una mayor dispersión del aire perdiendo contacto con los tubos, generando de esta manera una pérdida de calor mínima del fluido caliente.
  
3. El intercambio de calor también se vio afectado al cambiar el fluido de agua por aire. Esto se debe a que la conductividad térmica que presenta el primer fluido es mayor respecto al segundo.
  
4. Existe una pérdida de calor al ambiente debido a que el tanque de almacenamiento y calentamiento de aceite se encuentra descubierto en su parte superior ocasionando un aumento en la temperatura ambiental. De igual manera esto ocasiona que la temperatura de entrada del aire sea alta y el enfriamiento del aceite por los tubos sea mínimo.



5. El intercambiador de calor construido cuenta con reciclo de aceite al tanque donde se lo almacena y calienta. Este aspecto genera que cuando el fluido es recirculado la temperatura del mismo baja hasta llegar a un punto en el que la temperatura de entra y salida experimenta una variación mínima de 0.1 °C. mientras que la temperatura del aire presenta una variación notable, pudiéndose apreciar notablemente el proceso de transferencia de calor.

## 12 RECOMENDACIONES

1. Una vez puesto en marcha el intercambiador de calor se pudo apreciar que existen algunos aspectos que podrían mejorarse como:
  - La recirculación de aceite al tanque de almacenamiento podría realizarse con una flauta similar a la de distribución del aceite al inicio de los tubos, ya que se dificulta el trabajo cuando se tiene introducida 36 mangueras al tanque. De esta manera la flauta sería el elemento que recolectaría el aceite de salida y por una sola tubería saldría el aceite para recircularlo al tanque de almacenamiento.
  - El tanque de almacenamiento debería estar localizado a una mayor distancia del sistema de intercambio ya que este provoca un calentamiento en el



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

ambiente donde se trabaja y debería poseer una tapa que reduzca esta pérdida de calor. Esta ganancia de temperatura en el medio ocasiona que el aire de entrada posea una temperatura elevada y se aprecia poco el fenómeno producido en cuanto a la disminución de temperatura del aceite.

- Las mangueras de lona y caucho a pesar de poseer un bajo coeficiente de conductividad, experimentan una pérdida de calor por lo que se recomienda cubrirlas con un aislante térmico similar al utilizado en el tanque, y carcasa.
2. Para el calentamiento del aceite se recomienda que la resistencia eléctrica se encuentre totalmente cubierta de aceite para evitar que se quemé. Además conectarla a la corriente de 220 V ya que de esta manera calienta con mayor rapidez.



## BIBLIOGRAFÍA

Alarcon, J. (1998). Refrigeración automática. Marcombo: Barcelona

Esplugas, S. & Chamarro, M. (2005). Fundamentos de Transmisión de Calor. España: Publicaciones y Ediciones de la Universidad de Barcelona.

Incropera, F. & DeWitt, D. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. México: Pearson Prentice Hall.

Levenspiel, O. (1996). Flujo de Fluidos: Intercambio de Calor. España: Editorial Reverté S.A.

Moran, M. y Shapiro, H., (2005). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Editorial Reverté: Barcelona.

Costa, J., Cervera, S., Cunil, F., Esplugas, S., Mans, C. y Mata, J. (2004). Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. Reverte: Barcelona

Coulson, J & Richardson, S. (1993). Chemical Engineering Vol 1. Pearson: San Francisco.

Jiménez, A. (2003). Diseño de Procesos en Ingeniería Química. Reverte: Barcelona



ICALA: International Copper Association Latin America. (2010). Manual de Tubería de Cobre. Procobre. Paraguay.

Intescam (2007). Intercambiadores de calor. Recuperado de:

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r58326.PDF>

Martínez, H (2005). Intercambiadores usados en transferencia de calor. Universidad Autónoma de Nuevo León: México

Walas, S. (1990). Chemical Process Equipment, Selection and Design. Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts.

Mavaisan. (2008). Transferencia de calor. Universidad de Carabobo: Carabobo.

Recuperado de: [http://www.mavainsa.com/documentos/2\\_transferencia\\_calor.pdf](http://www.mavainsa.com/documentos/2_transferencia_calor.pdf)

STEMA (2007). Standar of the Tabular Exchanger Manufacturers Association. Novena Edición

SOLMAQ. (2011). Guía de mangueras y correas. SOLMAQ

Kuppan, T. (2000). Manual de diseño de intercambiadores de calor. Southern Railway Madras, Marcel Decaer INC: India.

Toro, F. (2005). Introducción a la Teoría de la Transferencia de Calor. Thermoequipos.



Loureiro, M (2005). Transferencia de Calor. Universidad de Almería: España

Perry, R. (2001). Manual del Ingeniero Químico. McGRAW-HILL: Nueva York.

Bertheau, F & Mercado, A. (1997). Diseño y construcción de un cambiador de calor de envolvente y tubo de un paso para el laboratorio de operaciones unitarias de la UPAEP.

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla: Puebla

Kreith, F. & Bohn, J. ( 2001). Heat Transfere. Mc GRAW-HILL: Nueva York.

Mickael, A. (2002). Diseño Computarizado de Intercambiadores de Calor Bajo Ambiente Windows. Universidad Central de Venezuela: Caracas.

Gelmi, C. (2006). Fundamentos de Operaciones Unitarias. Pontificia Universidad Católica de Chile

Valderrama, J. (1996). Información Tecnológica. CIT: Serena-Chile

Tyri. (2006). Material selection for process equipment. Tyri



## ANEXOS

### 13 ANEXO 1:

#### 13.1 MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

*ADVERTENCIA: No operar este equipo si desconoce su correcto funcionamiento, si no ha leído su procedimiento y manual. Asimismo todo estudiante debe estar bajo la tutela y supervisión de un profesor para manipularlo.*

#### TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. Indicaciones generales y de seguridad</b> .....	121
a. Uso de equipo de protección personal durante el manejo del equipo .....	121
b. Manejo del equipo .....	122
c. Precauciones de uso .....	122
d. Transporte.....	123
<b>2. Posibilidad de emplazamiento</b> .....	123
<b>3. Datos técnicos</b> .....	124
a. Equipamiento básico del sistema de intercambio de calor .....	124
b. Calidad del material .....	127
c. Corte de corriente.....	128
<b>4. Estructura y funcionamiento del equipo</b> .....	128
a. Funcionamiento de la resistencia .....	129
b. Funcionamiento Bomba.....	130
c. Funcionamiento Blower .....	130
d. Funcionamiento termómetros.....	131
e. Funcionamiento anemómetro .....	131
f. Funcionamiento de la resistencia eléctrica.....	132
<b>5. Limpieza</b> .....	132
<b>6. Mantenimiento</b> .....	133



## 1. Indicaciones generales y de seguridad

### a. Uso de equipo de protección personal durante el manejo del equipo

Los intercambiadores de calor son equipos que se emplean para transferir calor de un fluido a otro, para esto es necesario que exista un gradiente de temperatura.

Se debe mantener sumo cuidado en el manejo de estos equipos ya que las temperaturas a las que se encuentran los fluidos son elevadas. A pesar que el equipo esté cubierto por un aislante térmico es necesario que el operador use guantes de resistencia térmica.



Además se debe utilizar mandil, gafas, y zapatos cerrados para evitar el contacto de los fluidos directamente con la piel. Las personas que posean cabello largo deben recogerse.



b. Manejo del equipo

El sistema del intercambiador de calor consta de una bomba para aceite de 3/8 HP. Esta puede sufrir daños durante su funcionamiento si no existe un fluido a bombear y por consiguiente no debe absorber aire, es por ello que se debe controlar el nivel de fluido en el tanque de almacenamiento y evitar que este baje al nivel mínimo indicado.



c. Precauciones de uso

Durante el funcionamiento del equipo se prohíbe fumar ya que los fluidos pueden ser inflamables. Además se prohíbe el consumo de alimentos o bebidas debido al manejo delicado del equipo.



#### d. Transporte

Si el equipo debe trasladarse a otro lugar, se debe usar un montacargas. Si se va a transportar a mano será necesario como mínimo ocho personas ya que el peso del equipo supera la media tonelada. Además se debe coger el equipo solo de su base ya que el resto de partes al ser soldadas pueden soltarse.

## 2. Posibilidad de emplazamiento

El intercambiador debe ir montado sobre el suelo y colocado de forma horizontal. La separación entre cada uno de sus lados con respecto a la pared u otros objetos debe ser como mínimo de 25 cm. En general deberá garantizarse una circulación de aire suficiente en el entorno del intercambiador.



### 3. Datos técnicos

Largo de la carcasa del intercambiador	2,00 m
Diámetro de la carcasa	0,20 m
Ancho del sistema de intercambio	2,30 m
Altura del sistema de intercambio	1,50 m
Número de tubos dentro de la carcasa	36 tubos de ½ pulg.
Número de mangueras de lona y caucho	72 ( 36 en la entrada del flujo, 36 en la salida del flujo)
Capacidad del tanque de almacenamiento	100,00 l
Peso del sistema de intercambio	Mayor a 500 kg
Tipo de conexión eléctrica	110 V (blower y bomba) 220 V (resistencia eléctrica 27 A)
Condiciones ambientales	Temperatura ambiente entre 10 °C y 40 °C. Humedad relativa 80%
Rango de temperaturas de operación	20 °C hasta 120 °C
Potencia de la bomba	3/8 HP.

a. Equipamiento básico del sistema de intercambio de calor

- Tanque de almacenamiento de fluido calefactor: es un tanque de acero al carbón recubierto con una capa de cinta de aluminio, esponja y lámina de aluminio. Sus dimensiones son 0,80 m de alto con un diámetro de 40 cm. Este



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

posee una salida de desfogue que sirve para vaciar el tanque. Además posee una conexión a una tubería de acero por donde se distribuye el fluido calefactor al resto del sistema. Finalmente consta de una entrada de mangueras que permiten la recirculación del fluido calefactor al tanque de almacenamiento.

- Bomba: el sistema contiene una bomba de engranaje de 3/8 HP para aceite marca Caterpillar que permite el flujo de 700 kg/h.
- Flauta: éste es un distribuidor de flujo que desempeña la misma función que un cabezal, es decir, manda el fluido calefactor a través de la tubería interna de la carcasa. La flauta es acero al carbón con 36 salidas de tubos del mismo material y una entrada del flujo que sale de la bomba. Además, posee un recubrimiento de aluminio para disminuir las pérdidas de calor. La flauta mide 0,50 m de largo y una pulgada de diámetro.
- Manguera de lona y caucho: esta manguera desempeña la función de permitir el flujo del fluido calefactor hacia el interior de la tubería de cobre que se encuentra dentro de la carcasa del intercambiador, y así mismo permite la salida de dicho fluido para ser depositado en el tanque de almacenamiento.



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

Existen 72 mangueras de media pulgada de distinto largo dependiendo de la ubicación de los tubos de cobre. Para permitir un mejor cierre e impedir que el fluido se escape de las mangueras se han colocado abrazaderas de acero al carbón en cada una de las uniones.

- Tubería de cobre: el intercambiador de calor tipo tubo carcasa consta de 36 tubos de cobre de media pulgada distribuidos de forma triangular cuya longitud es 1,50 m. Por ellos circula el fluido caliente.
- Carcasa: la carcasa que recubre el intercambiador es de acero al carbón con una longitud de 2,00 m y de 20 cm de diámetro. Este se encuentra recubierto por una capa de esponja y una lámina de aluminio. Por el interior de esta circula aire a temperatura ambiente que cumple con el propósito de enfriar al fluido caliente que circula por la tubería de cobre.
- Resistencia eléctrica: la resistencia eléctrica permite el calentamiento de aceite a 100 °C. Esta tiene la conexión para un voltaje de 220 V.



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

- Blower: es un soplador de 1/10 HP ubicado al final de la carcasa, el cual permite el impulso de aire por el interior de éste. En este se puede regular el flujo de aire moviendo una compuerta. Permite un flujo de 320 kg/h.
- Termómetros: existen 5 termómetros digitales capaces de medir la temperatura desde 0 °C a 300 °C, los cuales se encuentran localizados 4 en la carcasa y uno en el tanque de almacenamiento del aceite.
- Anemómetro: es un instrumento capaz de medir la velocidad del aire. Este se encuentra localizado al final del blower y al inicio de la carcasa. De acuerdo al blower utilizado, tiene una velocidad entre 1,20 m/s hasta 2,50 m/s.

### b. Calidad del material

El sistema de intercambiador de calor utiliza como materiales principales tubería de cobre tipo M y acero al carbón dulce que se caracterizan por una gran estabilidad, resistencia a la corrosión respecto a los fluidos que en ellos van a circular, buena conductividad térmica y dureza.



c. Corte de corriente

Si se corta el paso de corriente eléctrica, el sistema de intercambio de calor dejará de funcionar debido a que no se puede impulsar los fluidos ni calentarlos. Sin embargo, podrá continuar con su funcionamiento una vez que exista nuevamente corriente eléctrica.

#### 4. Estructura y funcionamiento del equipo

Un fluido (aceite) que se encuentra almacenado en el tanque de acopio es calentado por medio de una resistencia eléctrica hasta llegar a la temperatura de 100 °C. Luego este comienza su circulación a través de una tubería de acero gracias al impulso de una bomba hasta llegar a una flauta la cual distribuye el fluido hacia 36 mangueras de lona y caucho que lo llevarán hacia el interior de 36 tubos de cobre de 1,50 m de largo hasta llegar a su final en la cual cada uno de los tubos de cobre se conectan a mangueras de lona y caucho que retornan el fluido al tanque de acopio.

Por otro lado existe un blower que se encuentra localizado al final de la carcasa contrario a la entrada de fluido calefactor que impulsa aire por el interior de esta para poder enfriar dicho fluido.



Con el fin de determinar el fenómeno de transferencia de calor existen 5 termómetros digitales localizados en la carcasa y uno en el tanque de almacenamiento, además de un anemómetro que facilita la medición del flujo de aire.

a. Funcionamiento de la resistencia

La resistencia eléctrica se encuentra conectada a la caja de switches que se encuentra ubicada entre el tanque de almacenamiento y la bomba. Esta a su vez se encuentra conectada a la corriente eléctrica. El encendedor de la resistencia es el botón de la derecha es decir el que se encuentra junto al tanque de almacenamiento.

Una vez accionado este botón la resistencia eléctrica comenzará a calentarse por lo que debe estar en contacto con el fluido a calentar. Se debe tener en cuenta que la resistencia no es sumergible totalmente, es por ello, que se debe colocar solo la parte metálica en el interior del fluido. Si el fluido llegase a tocar los cables de dicha resistencia esta sufrirá un cortocircuito y se debe reemplazar por una nueva.



b. Funcionamiento Bomba

La bomba se encuentra vinculada al tanque de almacenamiento y a la flauta de distribución. Su función es impulsar el fluido caliente a través de todo del sistema de intercambiador. Esta funciona a 110 V y está conectada a la caja de switch cuyo encendedor es el botón izquierdo que se encuentra junto a la bomba. Una vez accionado dicho botón comenzará el fluido a circular por todo el sistema.

Como se mencionó anteriormente se debe evitar que entre a la bomba aire para evitar cavitación.

c. Funcionamiento Blower

El blower se conecta a la caja de switchs el botón que enciende la bomba es el mismo que permite el paso de corriente eléctrica al blower. Sin embargo este posee su propio botón de encendido que se encuentra localizado en su parte posterior.

El blower impulsa un flujo de aire, para esto, posee una compuerta que se abre o cierra dependiendo a la cantidad de aire que se quiera hacer circular. Mientras la compuerta esté totalmente abierta el blower impulsará la mayor



cantidad de aire que pueda, mientras que cuando esté cerrada impulsará la mínima cantidad de aire.

d. Funcionamiento termómetros

Los termómetros digitales sirven para medir la temperatura desde un rango de 0 °C a 300 °C. Estos utilizan pilas que les permiten funcionar. Cuando se quiera realizar mediciones primero se debe presionar el botón “on / off”, sumergir el termómetro dentro del fluido que se quiere tomar la temperatura y esperar a que se estabilice. Cuando la medición se concluya, volver a presionar el botón “on / off” para apagarlo.

Para obtener buenas mediciones la sonda del termómetro debe estar introducida al menos hasta la mitad dentro del fluido a conocer la temperatura.

e. Funcionamiento anemómetro

El anemómetro mide la velocidad de circulación de aire. Para su funcionamiento es necesario encender el equipo y colocar las aspas en el lugar que se desea medir. Posteriormente se procede a realizar la lectura del



parámetro de velocidad que arroja el equipo. Este además de presentar la velocidad, indica la temperatura y área en la que se está midiendo.

f. Funcionamiento de la resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica que está colocada dentro del tanque de almacenamiento de aceite funciona a 220 V.

## 5. Limpieza

La limpieza periódica del sistema de intercambiador impide el daño de los materiales con el que se encuentra construido. Este equipo es fácil de limpiar que la mayoría de sus partes son móviles.

En cuanto al tanque de almacenamiento este puede vaciarse abriendo el tapón de esfogue y así se puede extraer todo el fluido almacenado. Este debe ser limpiado constantemente para evitar su corrosión.

Todas las superficies de acero pueden limpiarse con productos de limpieza para acero inoxidable corriente en el comercio. Hay que tener cuidado de no introducir



objetos oxidados o que puedan oxidarse en contacto con las superficies metálicas (ácidos, o bases fuertes).

Si a causa de los ensuciamientos, se producen puntos de óxido en la superficie de las partes metálicas, estos deben ser limpiados y pulidos inmediatamente.

## **6. Mantenimiento**

El mantenimiento del sistema de intercambio es esencial para su larga duración y buen funcionamiento.

Cada una de las piezas del sistema de intercambio puede ser reemplazado con facilidad. Sin embargo, debe tenerse sumo cuidado con la tubería de cobre debido a que esta se puede romper fácilmente o picar. Si esto sucede se debe reemplazar inmediatamente todo el tubo de cobre. El blower y la bomba deben ser revisados por un técnico especializado al menos cada año.

Se garantiza el funcionamiento correcto del equipo por 5 años si este es operado constantemente.



## 14 ANEXO 2:

### 14.1 PRACTICAS DE LABORATORIO

#### PRÁCTICA N° 1

#### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE- AIRE

##### OBJETIVO:

- Determinar la cantidad de calor que es transferido de un fluido a otro a través de su paso por el intercambiador de calor tipo tubo carcasa.
- Elaborar las curvas de temperatura de acuerdo a la transferencia de calor que se determinó.

##### MARCO TEÓRICO

##### Transferencia de calor:

La transferencia de calor es un proceso donde se transporta energía. Esta puede darse trabajo o calor. Para que exista dicha transferencia, es necesario un gradiente de temperatura y un medio transmisor (Esplugas & Chamarro, 2005).



Existen tres tipos de transferencia de calor que son: conducción, convección y radiación.

### **Intercambiador de calor:**

El intercambiador de calor es un instrumento diseñado con el fin de transferir calor de un fluido a otro que permanezca en contacto a través de una barrera. Para ello se necesita de un gradiente de temperatura entre los dos fluidos.

El intercambiador de calor que fue construido como proyecto de fin de carrera localizado en el laboratorio de química de la UISEK es de tipo tubo y carcasa. Este contiene de 36 tubos de cobre con un arreglo triangular por donde circula el fluido caliente (aceite) y una carcasa que contiene los tubos mencionados por donde pasa aire a temperatura ambiente.

Este es un proceso continuo que mantiene un cambio de temperatura radial.

El proceso se realizará intercambiando calor entre aceite caliente a 90 °C y aire a temperatura ambiente, para poder conocer la temperatura final del aceite y la del aire.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

### **EQUIPOS Y MATERIALES**

- Intercambiador de Calor tipo Tubo Carcasa
- Bomba de aceite de 3/8 Hp



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

- Tanque de almacenamiento de fluido caliente
- Resistencia eléctrica
- Blower de 1/10 Hp
- 5 Termómetros digitales
- Anemómetro

### SUSTANCIAS Y REACTIVOS

- Aceite Vegetal de Palma
- Aire

### PROCEDIMIENTO

- Colocar manualmente aceite vegetal en el tanque de almacenamiento hasta que la resistencia esté totalmente cubierta.
- Conectar la resistencia eléctrica a la corriente de 220V para que esta comience a calentar al aceite.
- Tomar la temperatura del aceite con ayuda de un termómetro y apagar la fuente de calentamiento cuando este llegue a 90°C.
- Encender la Bomba de aceite para comenzar con la circulación de dicho fluido a través del Intercambiador de Calor.



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

- Al mismo tiempo encender el Blower controlando que su compuerta esté totalmente abierta.
- A la par introducir los termómetros dentro de la carcasa y encenderlos.
- Colocar el anemómetro encendido en la salida del flujo de aire.
- Tomar mediciones cada 15 segundos hasta que se vacíe el tanque de almacenamiento de aceite.

## **CUESTIONARIO**

- 1.- Explique el fenómeno de transferencia de calor que se dio en el intercambiador de calor
- 2.- ¿Qué tipos de transferencia de calor existe y en qué consiste?
- 3.- ¿Qué es un anemómetro y cuál es su principio de funcionamiento?
- 4.- ¿Qué tipos de intercambiadores de calor existen?



## PRÁCTICA No. 1- REALIZADA

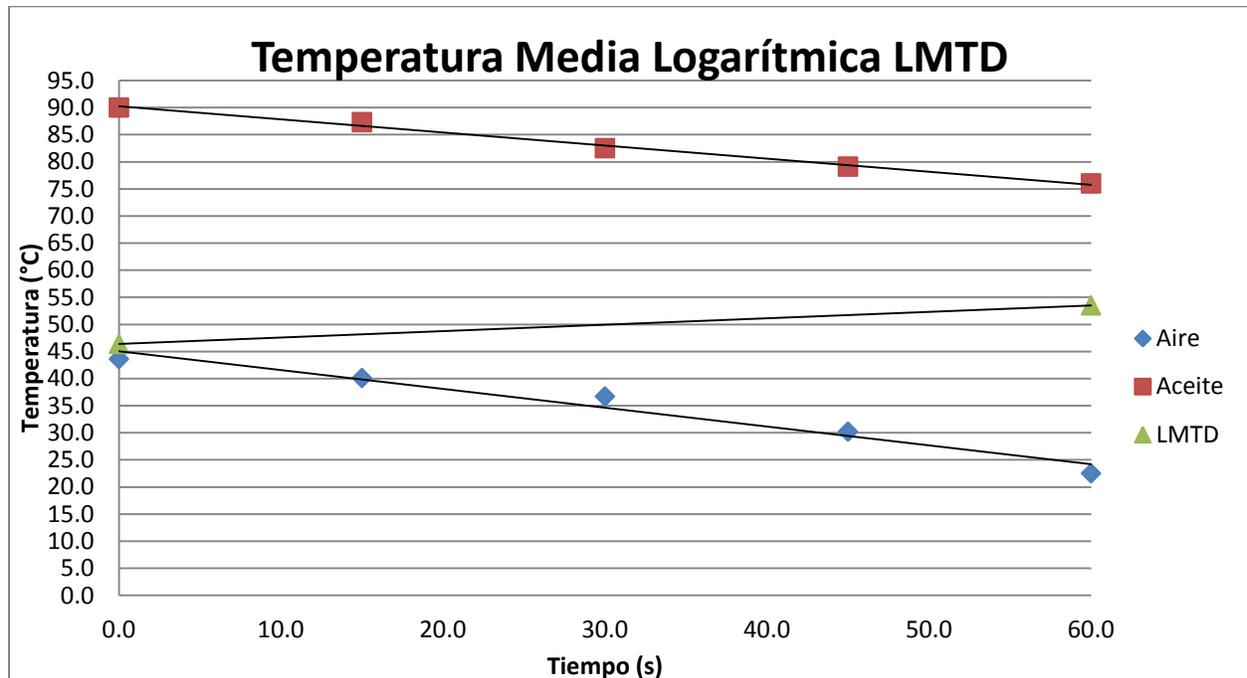
### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE - AIRE

#### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Tabla 1. Datos obtenidos en la práctica 1

Tiempo (s)	15	30	45	60
Temperatura inicial del aire (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5
Temperatura final del aire (°C)	30,2	36,7	40,1	43,6
Temperatura inicial aceite (°C)	90,0	90,0	90,0	90,0
Temperatura final aceite (°C)	87,3	82,5	79,1	76,0

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida



Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida



En la gráfica y tabla de resultados se aprecia que existe un gradiente de temperatura más uniforme con respecto al aceite que con respecto al aire.

**Cálculo de la cantidad de calor:**

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 350,0 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (21,1^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 7466.9735 kJ$$

## CUESTIONARIO

**1.- Explique el fenómeno de transferencia de calor que se dio en el intercambiador de calor**

El fenómeno de transferencia de calor que se aprecia en el intercambiador de calor es por conducción y convección. Se transfiere calor desde el aceite hacia los tubos de cobre y estos hacia el aire por conducción debido a los gradientes de temperatura que se presentan. Mientras que por convección se da la transferencia calor entre una superficie y un fluido en movimiento a diferentes temperaturas. Por lo tanto, se da al mismo tiempo en el aceite como en el aire.

**2.- ¿Qué tipos de transferencia de calor existe y en qué consiste?**

Existen tres tipos de transferencia de calor que son:



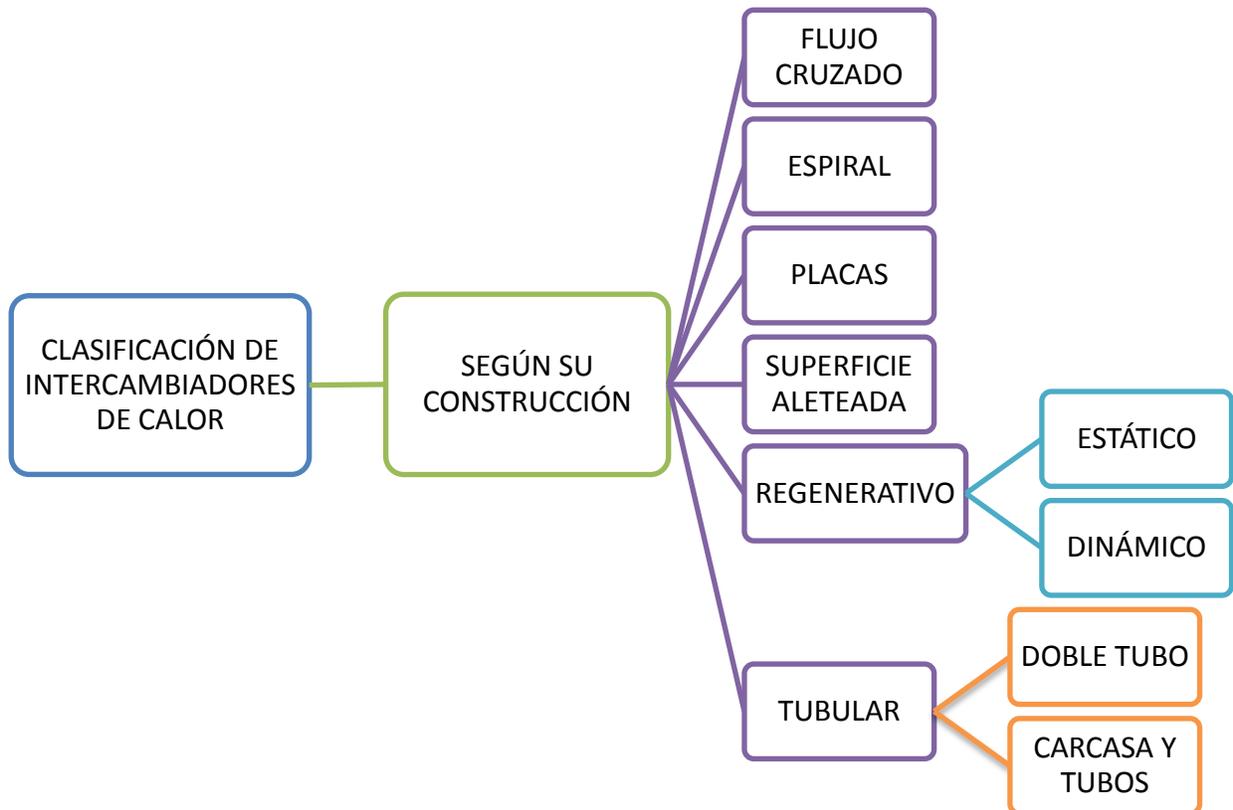
- **Conducción:** es un mecanismo de transferencia de calor que se da en escala atómica. La energía en forma de calor que pasa a través de la materia se da gracias a la actividad molecular. El choque de unas moléculas con otras permite esta transferencia. El principal requisito de la conducción de calor es que exista una diferencia de temperatura entre dos partes del medio conductor.
- **Convección:** es el mecanismo de transferencia de calor por gradientes de temperatura debido al movimiento de un fluido (gas o líquido) que está en contacto con una superficie sólida. La convección puede ser de dos tipos: natural o forzada. La Primera debido a la diferencia de densidades de la materia, y la segunda, cuando se obliga a la materia a moverse ya sean estos impulsados por ventiladores o bombas.
- **Radiación:** es una forma de transferencia de calor producido como resultado de alteraciones electrónicas de moléculas y átomos en el interior de los materiales. El transporte de la energía se da a través de fotones u ondas electromagnéticas.

### **3.- ¿Qué es un anemómetro y cuál es su principio de funcionamiento?**

El anemómetro es un instrumento empleado para medir la velocidad del aire o flujo de aire. Es un equipo que consta de una rueda con paletas que gira sobre un eje y que presenta poca fricción.



#### 4.- ¿Qué tipos de intercambiadores de calor existe?



Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida



Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

## PRÁCTICA N° 2

### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE - AIRE VARIANDO LA VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE.

#### OBJETIVO:

- Determinar la cantidad de calor que es transferido de un fluido a otro a través de su paso por el intercambiador de calor tipo tubo carcasa a diferentes velocidades de flujo de aire.
- Determinar la velocidad del aire cuando el blower está totalmente abierto, semi-abierto y cerrado.

#### MARCO TEÓRICO

##### Transferencia de calor:

La transferencia de calor es un proceso donde se transporta energía. Esta puede darse trabajo o calor. Para que exista dicha transferencia, es necesario un gradiente de temperatura y un medio transmisor (Esplugas & Chamarro, 2005).

Existen tres tipos de transferencia de calor que son: conducción, convección y radiación.

##### Intercambiador de calor:



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

El intercambiador de calor es un instrumento diseñado con el fin de transferir calor de un fluido a otro que permanezca en contacto a través de una barrera. Para ello se necesita de un gradiente de temperatura entre los dos fluidos.

El intercambiador de calor que fue construido como proyecto de fin de carrera localizado en el laboratorio de química de la UISEK es de tipo tubo y carcasa. Este contiene de 36 tubos de cobre con un arreglo triangular por donde circula el fluido caliente (aceite) y una carcasa que contiene los tubos mencionados por donde pasa aire a temperatura ambiente.

Este es un proceso continuo que mantiene un cambio de temperatura radial.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### EQUIPOS Y MATERIALES

- Intercambiador de Calor tipo Tubo Carcasa
- Bomba de aceite de 3/8 Hp
- Tanque de almacenamiento de fluido caliente
- Resistencia eléctrica
- Blower de 1/10 Hp
- 5 Termómetros digitales
- Anemómetro



## SUSTANCIAS Y REACTIVOS

- Aceite Vegetal de Palma
- Aire

## PROCEDIMIENTO

- Colocar aceite vegetal en el tanque de almacenamiento hasta que la resistencia este totalmente cubierta
- Encender la resistencia eléctrica para comenzar con el calentamiento del aceite.
- Calentar el aceite hasta 70°C.
- Encender la Bomba de aceite para comenzar con la circulación de dicho fluido a través del Intercambiador de Calor.
- Al mismo tiempo encender el Blower controlando que su compuerta esté totalmente abierta para realizar la primera prueba.
- Encender los termómetros y el anemómetro para poder empezar con la medición de dichos parámetros.
- Tomar el valor de las temperaturas y de la velocidad de aire.
- Calentar nuevamente el aceite hasta 70°C
- Cerrar la compuerta del blower hasta la mitad.
- Encender la bomba y el blower.



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

- Medir la velocidad de viento con el anemómetro y continuar tomando datos de las temperaturas
- Finalmente calentar el aceite a 70°C.
- Cerrar totalmente la compuerta del blower.
- Encender la bomba y el blower
- Medir la velocidad de aire y las temperaturas.
- Apagar el equipo, termómetros y anemómetro.

## **CUESTIONARIO**

- 1.- Explique cómo influye el flujo másico del aire en la transferencia de calor.
- 2.- Explique qué tipos de transferencia de calor se dan en un intercambiador.
- 3.- Determine en que afecta la superficie de contacto en el fenómeno estudiado.



## PRÁCTICA No. 2 REALIZADA

### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE - AIRE VARIANDO LA VELOCIDAD DE FLUJO DE AIRE.

#### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

**Tabla1. Resultados practica de laboratorio**

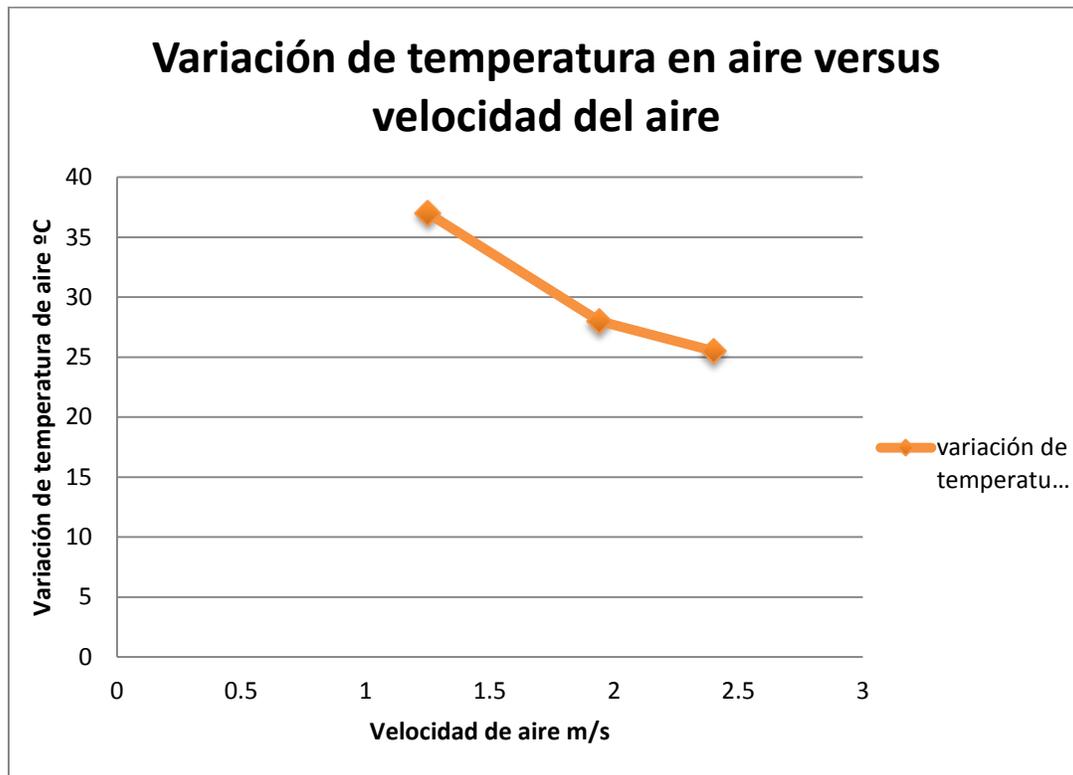
Velocidad del aire (m/s)	2,40	1,94	1,25
Temperatura inicial aire (°C)	29,30	29,90	25,,20
Temperatura final aire (°C)	54,80	57,90	62,20
Temperatura inicial aceite (°C)	66,40	66,40	68,80
Temperatura final aceite (°C)	66,30	66,20	68,70

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida

**Tabla 2. Variación de temperatura**

Velocidad del aire (m/s)	2,40	1,94	1,25
Variación de temperatura aire (°C)	25,50	28,00	37,00
Variación de temperatura aceite (°C)	0,10	0,200	0,10

**Elaborado por:** Daniela Armas y Antonio Almeida



Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

Como se muestra en las tablas 1 y 2, las variaciones de temperatura con respecto al aire a diferentes velocidades incrementan cuando la velocidad del aire es menor. Esto se debe a que el flujo másico del aire disminuye y por lo tanto el calor que cede el aceite se concentra más.

En cuanto al aceite la variación de temperatura no es muy marcada debido a que el fluido se encuentra recirculando.

**Calculo de la cantidad de calor:**

**Velocidad 2,4 m/s**

$$W = 2,4 \frac{m}{s} * 0,03141593m^2 * 3600 \frac{s}{h} * 1,29 \frac{kg}{m^3}$$

$$W = 350 \frac{kg}{h}$$



$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 350 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (54,8 - 29,3^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 9024,0675 kJ$$

Velocidad 1,94 m/s

$$W = 1,94 \frac{m}{s} * 0,03141593m^2 * 3600 \frac{s}{h} * 1,29 \frac{kg}{m^3}$$

$$W = 283 \frac{kg}{h}$$

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 283 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (57,9 - 29,9^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 8011,9564 kJ$$

Velocidad 1,25 m/s

$$W = 1,25 \frac{m}{s} * 0,03141593m^2 * 3600 \frac{s}{h} * 1,29 \frac{kg}{m^3}$$

$$W = 182,37 \frac{kg}{h}$$

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 182,37 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (62,2 - 25,2^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 6822,589kJ$$



De los cálculos obtenidos de la cantidad de calor transferida, se concluye que a pesar que exista una mayor variación de temperatura cuando la velocidad de aire es menor, existe una menor cantidad de calor transferido. Esto se debe a que  $Q$  está directamente afectado por el flujo másico.

## **CUESTIONARIO**

### **1.- Explique cómo influye el flujo másico del aire en la transferencia de calor.**

El flujo másico del aire influye inversamente proporcional respecto a la transferencia de calor debido a su velocidad. Si la velocidad del aire es mayor, entonces el tiempo de residencia y contacto disminuyen, provocando una transferencia de calor mínima. Por el contrario, si la velocidad del aire es menor, el tiempo de residencia y contacto aumentan y esto a su vez incrementará la transferencia de calor entre los fluidos.

### **2.- Explique qué tipos de transferencia de calor se dan en un intercambiador.**

El fenómeno de transferencia de calor que se aprecia en el intercambiador de calor es por conducción y convección. Se transfiere calor desde el aceite hacia los tubos de cobre y estos hacia el aire por conducción debido a los gradientes de temperatura que se presentan. Mientras que por convección se da por transferencia de calor entre



**Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK**

una superficie y un fluido en movimiento a diferentes temperaturas, por lo tanto se da tanto en el aceite como en el aire.

**3.- Determine en que afecta la superficie de contacto en el fenómeno estudiado.**

La superficie de contacto afecta directamente a la transferencia de calor debido a que es el área en la que fluidos y materiales se ponen en contacto directo. Por lo tanto, si el área es mayor, entonces la cantidad de energía transmitida será mayor, caso contrario, si el área es menor, entonces la energía transmitida será menor.



## PRÁCTICA N° 3

### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE - AIRE VARIANDO LA TEMPERATURA DE ENTRADA DEL ACEITE

#### OBJETIVO:

- Identificar la variación de temperatura tanto del aceite como del aire.
- Calcular la cantidad de calor ganado del aire a las diferentes temperaturas.

#### MARCO TEÓRICO

##### Transferencia de calor:

La transferencia de calor es un proceso donde se transporta energía. Esta puede darse trabajo o calor. Para que exista dicha transferencia, es necesario un gradiente de temperatura y un medio transmisor (Esplugas & Chamarro, 2005).

Existen tres tipos de transferencia de calor que son: conducción, convección y radiación.

##### Intercambiador de calor:



## Diseño, construcción, y operacionalización de un intercambiador de calor tipo tubo y carcasa, destinado para el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK

El intercambiador de calor es un instrumento diseñado con el fin de transferir calor de un fluido a otro que permanezca en contacto a través de una barrera. Para ello se necesita de un gradiente de temperatura entre los dos fluidos.

El intercambiador de calor que fue construido como proyecto de fin de carrera localizado en el laboratorio de química de la UISEK es de tipo tubo y carcasa. Este contiene de 36 tubos de cobre con un arreglo triangular por donde circula el fluido caliente (aceite) y una carcasa que contiene los tubos mencionados por donde pasa aire a temperatura ambiente.

Este es un proceso continuo que mantiene un cambio de temperatura radial.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### EQUIPOS Y MATERIALES

- Intercambiador de Calor tipo Tubo Carcasa
- Bomba de aceite de 3/8 Hp
- Tanque de almacenamiento de fluido caliente
- Resistencia eléctrica
- Blower de 1/10 Hp
- 5 Termómetros digitales
- Anemómetro



## SUSTANCIAS Y REACTIVOS

- Aceite Vegetal de Palma
- Aire

## PROCEDIMIENTO

- Colocar aceite vegetal en el tanque de almacenamiento hasta que la resistencia este totalmente cubierta
- Encender la resistencia eléctrica para comenzar con el calentamiento del aceite.
- Calentar el aceite hasta 90°C.
- Encender la Bomba de aceite para comenzar con la circulación de dicho fluido a través del Intercambiador de Calor.
- Al mismo tiempo encender el Blower controlando que su compuerta esté totalmente abierta.
- Encender los termómetros y el anemómetro para poder empezar con la medición de dichos parámetros.
- Tomar las temperaturas cada 15 s transcurridos.
- Dejare enfriar el aceite hasta 60 °C, hacer circular por el intercambiador de calor tomando las medidas de temperatura.



## CUESTIONARIO

- 1.- Realizar una tabla de comparación entre los cambios de temperatura (90 y 60 °C)
- 2.- Calcular la cantidad de calor ganado.
- 3.- Explicar que sucede en el proceso cuando existe recirculación.

### SOLUCIONARIO PRÁCTICA No. 3

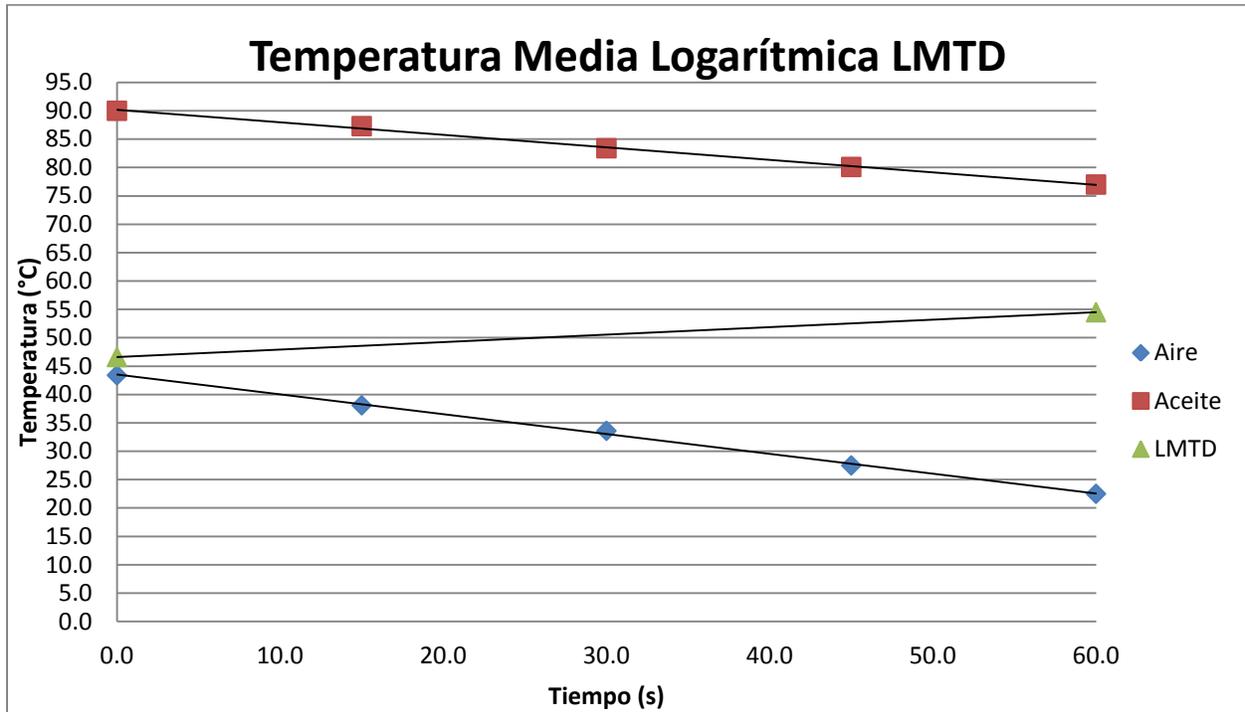
#### INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE ACEITE - AIRE VARIANDO LA TEMPERATURA DE ENTRADA DEL ACEITE

- 1.- Realizar una tabla de comparación entre los cambios de temperatura (90 y 60 °C)

Para 90 °C:

Tiempo (s)	0,0	15,0	30,0	45,0	60,0
Aire (°C)	22,5	27,5	33,6	38,1	43,4
Aceite (°C)	90,0	87,3	83,4	80,1	77,0
LMTD (°C)	67,5				33,6

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

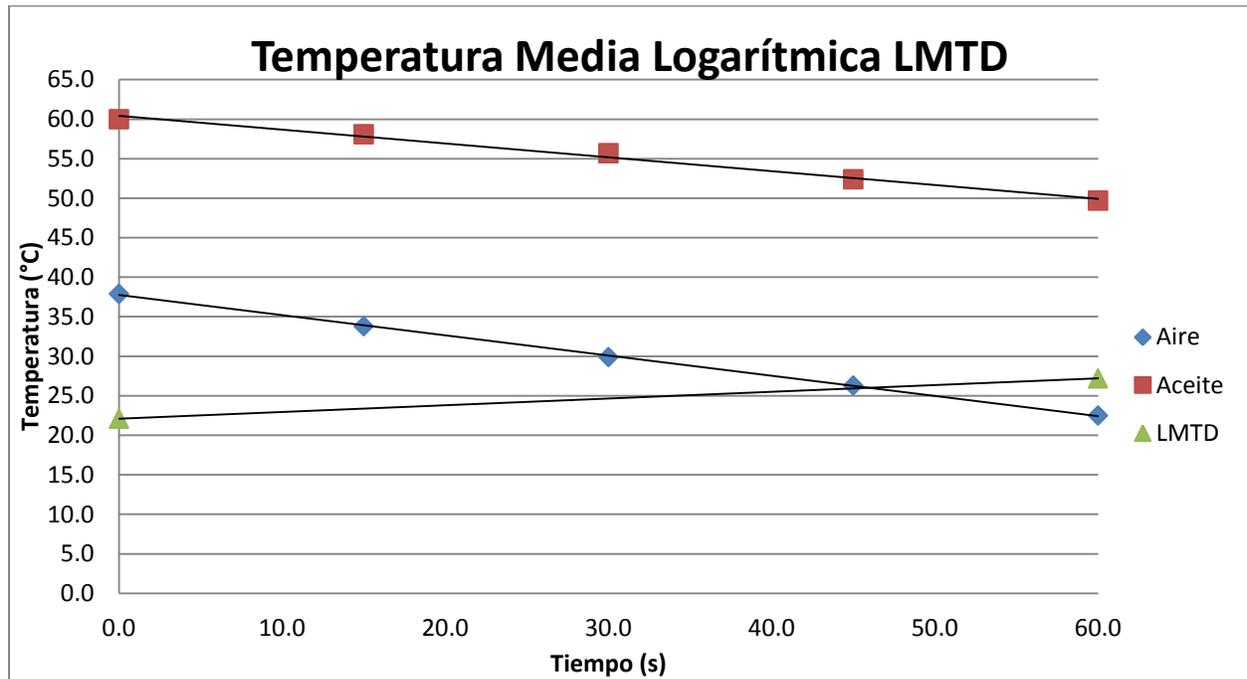


Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

Para 60 °C:

<b>Tiempo (s)</b>	0,0	15,0	30,0	45,0	60,0
<b>Aire (°C)</b>	22,5	26,3	29,9	33,8	37,9
<b>Aceite (°C)</b>	60,0	58,1	55,7	52,4	49,7
<b>LMTD (°C)</b>	37,5				11,8

Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida



Elaborado por: Daniela Armas y Antonio Almeida

## 2.- Calcular la cantidad de calor ganado

Prueba con temperatura inicial de aceite a 90 °C

$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 350 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (43.4 - 22.5 \text{ }^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 7396.2 \text{ kJ}$$

Prueba con temperatura inicial de aceite a 60 °C



$$Q = W * C_{aire} * (t_2 - t_1)$$

$$Q = 350 \frac{kg}{h} * 1,0111 \frac{kJ}{kg \Delta^{\circ}C} * (37,9 - 22,5^{\circ}C)$$

$$Q_{aire} = 5449,83 kJ$$

### 3.- Explicar que sucede en el proceso cuando existe recirculación.

La recirculación del fluido caliente al tanque de almacenamiento provoca que el fluido que se encuentre contenido en éste pierda temperatura, por lo tanto calor. Se debe a que el aceite que sale del intercambiador se encuentra a una menor temperatura que el contenido en el tanque. Posterior, transcurrido un tiempo, la temperatura con la que sale el aceite del intercambiador se iguala con la del tanque de almacenamiento.