

**DISEÑO DE UN MÓDULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y
TUBOS**

SONIA PAOLA BURBANO ROJAS

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2014**

**DISEÑO DE UN MÓDULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y
TUBOS**

SONIA PAOLA BURBANO ROJAS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniera
mecánica.**

**Directora
Adriana Fernanda Sierra
Ingeniera Mecánica, c-PH.D Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.
2014**

DEDICATORIA

A mis padres
A mis hermanos
A mi sobrina
A mi novio
A mi familia
A Dios

AGRADECIMIENTOS

Principalmente le agradezco a Dios por todas las bendiciones que me da día a día, a mis padres por el gran amor que me brindan, por apoyarme siempre y por haberme formado en un buen camino, a mis hermanos por su comprensión, a mi sobrina por llegar a ser una parte muy importante de nuestra familia, a mi novio por ser un gran apoyo siempre y por brindarme sus mejores consejos, a mis demás familiares y amigos por el apoyo y esas palabras de aliento y finalmente a mis profesores por formarme académicamente, en especial a mi directora de tesis, que siempre me brindó su apoyo y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Transferencia de calor por conducción	18
2.2 Transferencia de calor por radiación.....	18
2.3 Transferencia de calor por convección.....	19
2.4 Intercambiador de calor de coraza y tubos	20
3 DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR	37
3.2 Diseño Térmico.....	38
3.2 Diseño Hidráulico.....	48
3.3 Diseño Mecánico	50
3.4 Dimensiones Finales Intercambiador	54
4 RUTINA PARA EL CÁLCULO DEL INTERCAMBIADOR	55
4.1 Alcance del programa	55
4.2 Diagrama de flujo	56
4.3 Interfaz del usuario.....	57

5	GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	60
5.1	Guía 1. Identificación de los tipos de transferencia de calor	61
5.2	Guía 2. Determinación de la conducción y la convección	64
5.3	Guía 3. Estudio del funcionamiento del intercambiador de calor de coraza y tubos ...	68
6	CONCLUSIONES	70
	BIBLIOGRAFIA	72
	ANEXOS	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dimensiones del material seleccionado.....	39
Tabla 2. Características de materiales.....	40
Tabla 3. Dimensiones del material seleccionado.....	40
Tabla 4. Parámetros iniciales de los fluidos a trabajar.....	41
Tabla 5. Cálculo del calor.	42
Tabla 6. Cálculo de LTDM.	43
Tabla 7. Calor latente de vaporización.....	43
Tabla 8. Cálculo del coeficiente de vapor hacia el agua	44
Tabla 9. Cálculo del número de Reynolds	45
Tabla 10. Cálculo del coeficiente de agua en los tubos	46
Tabla 11. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor	46
Tabla 12. Cálculo de la conexión de salida de vapor.....	48
Tabla 13. Cálculo de la caída de presión en la conexión de salida de vapor.....	49
Tabla 14. Características térmicas.....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. “Intercambiador de calor de doble tubo”	21
Figura 2. “Intercambiador de calor de placas y armazón”	22
Figura 3. “Intercambiador de calor compacto”	22
Figura 4. “Intercambiador de calor de flujo no mezclado”	23
Figura 5 “Intercambiador de calor de flujo mezclado”	23
Figura 6. “Intercambiador de calor de casco y tubos”	24
Figura 7. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”	25
Figura 8. “Disposición de los tubos”	26
Figura 9. “Tapas intercambiador de calor de coraza y tubos”	29
Figura 10. “Proceso para realizar el diseño de un intercambiador de calor”	38
Figura 11. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos con una de las tapas”	51
Figura 12. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos”	52
Figura 13. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”	53
Figura 14. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”	53
Figura 15. “Vista detallada del esfuerzo en los soportes del intercambiador de calor de coraza y tubos”	54
<i>Figura 16.</i> “Plano General Intercambiador de calor de coraza y tubos”	54
Figura 17. “Diagrama de flujo”	56
Figura 18. “Vista al usuario de la rutina”	57
Figura 19 “Vista al usuario al ingresar los datos”	58
Figura 20 “Vista al usuario con los resultados”	58
Figura 21 “Vista al usuario con el plano”	59
Figura 22 “Vista al usuario con ayuda”	59
Figura 23. “Intercambiador de coraza y tubos”	62
Figura 24. “Formas genéricas de intercambio de calor”	65
Figura 25. “Formas genéricas de intercambio de calor”	66
Figura 26. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos”	66

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A	Tablas del material empleado en la tubería interna76
ANEXO B	Tablas del material empleado en los accesorios.....77
ANEXO C	Tablas del material empleado en la coraza78
ANEXO D	Planos del intercambiador de calor de coraza y tubos79
ANEXO E	Lenguaje de la rutina en Excel84

NOMENCLATURA

A :	Área del tubo
A_a :	Área de la coraza
A_s :	Área superficial
C_p :	Calor específico del agua
C_{pl} :	Calor específico de película
D :	Diámetro de la tubería de cobre
d_{ae} :	Diámetro externo del accesorio
d_{ai} :	Diámetro interno del accesorio
d_e :	Diámetro exterior del tubo de cobre
d_i :	Diámetro interior del tubo de cobre
DP :	Caída de presión
d_{pe} :	Diámetro externo de la coraza
d_{pi} :	Diámetro interno de la coraza
DT :	Caída de presión total
g :	Gravedad
h :	Coeficiente corregido
h_{gf} :	Calor latente
h_{fg}^* :	Calor latente de vaporización
h_i :	Coeficiente del agua en los tubos
h_o :	Coeficiente del vapor hacia el agua
h_2 :	Entalpía de salida del vapor a la presión de diseño
h_1 :	Entalpía de entrada del vapor a la presión de diseño
K :	Conductividad térmica de los tubos
Kl :	Conductividad térmica del líquido, a la temperatura de película (agua 16°C)
L :	Longitud tubo
L_a :	Longitud del accesorio
L_c :	Longitud de la coraza
L_t :	Longitud de los tubos
$LTDM$:	Diferencia media logarítmica
\dot{m}_i :	Flujo másico del agua
\dot{m}_v :	Flujo másico del vapor
n :	Número de filas

$NU:$	Número de Nussett
$Pr:$	Número de Prandtl
$Q:$	Caudal
$q_i:$	Calor
$r_{boquilla}:$	Radio boquilla
$Re_D:$	Número de Reynolds
$T_2:$	Temperatura de entrada del fluido caliente
$T_3:$	Temperatura de salida del fluido caliente
$T_{isalida}:$	Temperatura del intercambiador de salida
$T_{ientrada}:$	Temperatura del intercambiador de entrada
$T_s:$	Temperatura superficie
$T_{s\ prom}:$	Temperatura promedio
$T_{sat}:$	Temperatura de saturación
$U:$	Coeficiente global de transferencia de calor
$U_n:$	Coeficiente nuevo global de transferencia de calor
$v:$	Viscosidad cinemática
$V = V_{max}:$	Velocidad de entrada del agua a los tubos, velocidad máxima
$V_v:$	Velocidad de vapor
$\rho_l:$	Densidad del líquido a la temperatura de película
$\rho_v:$	Densidad de vapor
$\mu_l:$	Viscosidad dinámica del líquido
$\Delta T_i:$	Delta de temperatura (Diferencia de temperatura)

RESUMEN

En el presente proyecto se realizará el diseño de un módulo didáctico de intercambiador de calor de coraza y tubos, en el cual los fluidos empleados son vapor en la carcasa y agua por dentro de los tubos, este diseño está dirigido para el laboratorio de ciencias térmicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás. El diseño del equipo se realizó en tres etapas: Diseño térmico que sirve para determinar las dimensiones de los tubos y el número de pasos, además se encontraran establecidos los materiales y los espesores que llevaran los componentes del equipo; por medio del Diseño Mecánico y en el Diseño Hidráulico se calcula la caída de presión en el equipo.

El intercambiador de calor de coraza y tubos tiene un calor necesario de $20593,59\text{ W}$ que aumenta la temperatura del agua del mismo, además se realizó una rutina en .EXCE que sirve para calcular las dimensiones del intercambiador de coraza y tubos permitiéndole al estudiante interactuar de manera didáctica con éste, y finalmente se plantearon 3 guías de laboratorio con las cuales el estudiante desarrollará diferentes habilidades de cálculo a partir de datos reales y experimentales, de tal manera que se fortalezcan los conocimientos de las materias de ciencias térmicas como: transferencia de calor, termodinámica y maquinas térmicas.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Santo Tomas cuenta con una infraestructura compuesta de equipos y maquinaria para la aplicación de los conocimientos de las diversas carreras que ofrece. En especial, la Facultad de Ingeniería Mecánica cuenta con diversos implementos de excelente calidad que facilitan el estudio para poder llevar todos los conocimientos a la práctica, de tal manera que en las diferentes líneas de la carrera, se pueda aplicar lo aprendido. En la ingeniería mecánica se resuelven diversos problemas de la vida cotidiana, soluciones que se dan desde las aulas universitarias, ya que los estudiantes pueden corroborar la teoría con la práctica. Esto se puede lograr si se cuenta con los laboratorios necesarios para las diversas prácticas que tienen que hacer los estudiantes de ingeniería.

Durante la re-acreditación del Programa se encontró que una de las falencias que presentaba el mismo era la ausencia de un laboratorio de Ciencias Térmicas. Debido a lo anterior se han venido desarrollando esfuerzos para diseñar y construir los equipos que conformarán el mencionado laboratorio. De esta forma se busca contar con elementos pedagógicos que contribuyan a mejorar la calidad de educación y de la formación del estudiante y para ello el uso de instrumentación y métodos tecnificados y más específicos contribuyen con este aprendizaje, puesto que tener equipos en buenas condiciones de operación y con unos estándares de calidad muy altos, mejoran los conocimientos de los estudiantes. Por ende será más fácil realizar prácticas que conlleven a una explicación más útil y lucrativa de la teoría. Es necesario tener controles cuantificables de los recursos a emplear, lo cual garantizará manejos adecuados de la máquina.

Por consiguiente, se sabe que en los sistemas mecánicos, sucede que el calor debe ser transferido de un lugar a otro y también de un fluido a otro, para ello es necesario entrar en contacto con la línea de Termo-fluidos, ya que es de vital importancia, así como las demás líneas de la carrera, y por ende es necesario intentar dotar los laboratorios con los implementos necesarios, para las diferentes materias de esta línea, como los son: termodinámica, transferencia de calor, ciclos termodinámicos y plantas térmicas.

Bajo este contexto, se hace necesario realizar el diseño de un módulo didáctico de intercambiador de calor de coraza y tubos para el laboratorio de ciencias térmicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás, ya que es muy importante para un ingeniero tener conocimientos tanto teóricos como prácticos, acerca de esta línea, puesto que la transferencia de calor se encuentra presente en todo lugar y en cualquier momento, además de los diferentes estados de la materia.

Para ello, es necesario tener en cuenta que los intercambiadores de calor son muy importantes, ya que son dispositivos que constan de una estructura de tubos de diámetro pequeño, que van internos dentro de una carcasa de un diámetro mayor, por lo cual es muy conveniente de tener equipos como este, que contribuyan a mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje de los docentes y estudiantes. Para ello, este trabajo presenta los siguientes aspectos generales: En la primera parte se plantean los objetivos del presente proyecto, justificando la pertinencia de la elaboración del diseño del módulo didáctico de intercambiador de calor de coraza y tubos. Posteriormente se esboza el marco teórico, en el cual se resalta la importancia del equipo a diseñar, así como una breve introducción de los diferentes tipos de intercambiadores de calor. Consecutivamente se encuentran los cálculos necesarios para obtener el diseño térmico, hidráulico y mecánico del equipo, actividad que se complementa con una rutina realizada en Excel y tres guías de laboratorio dirigido a los estudiantes, finalmente se dan las pertinentes conclusiones del proyecto.

Se espera que este proyecto permita dinamizar el proceso de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes de la universidad y por ende contribuya a mejorar la calidad educativa del programa de ingeniería mecánica. Para ello, la instalación de un módulo de intercambiador de calor de coraza y tubos para el laboratorio de ciencias térmicas de la Universidad Santo Tomás, debe tener un control que incluya un manejo seguro de la máquina, evitando cualquier daño ambiental y que contribuya al fortalecimiento de la dinámica académica de la facultad de ingeniería mecánica.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Diseñar un módulo didáctico de intercambiador de calor de coraza y tubos para el laboratorio de Ciencias Térmicas de la Universidad Santo Tomás.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar un módulo didáctico de intercambiador de calor de coraza y tubos.
- Diseñar una rutina para obtener los cálculos de un intercambiador de calor de coraza y tubos.
- Elaborar tres de guías para prácticas de laboratorio para el modulo diseñado.

2. MARCO TEÓRICO

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor; en la ingeniería existen tres tipos de transferencia como la convección, la radiación y la conducción, en los cuales existen equipos como: intercambiadores de calor, calderas, condensadores, calentadores, hornos, refrigeradores, radiadores y colectores solares, entre otros. Sabemos que la transferencia de energía generalmente se produce del medio con mayor temperatura hacia el de menor temperatura, por lo cual la transferencia se detiene cuando los objetos alcanzan la misma temperatura. La transferencia de calor se puede observar, pero más específicamente los efectos que ésta genera, ya que se pueden identificar y medir mediante análisis y mediciones.

El análisis de la transferencia de calor, lo podemos ver reflejado en los intercambiadores de calor de distintas maneras y diferentes aplicaciones, así como en el proyecto de investigación realizado para PETROECUADOR, donde se realiza el diseño de dos intercambiadores de calor. El primero se realizó con el fin de utilizar la energía de desperdicio almacenada en los gases de escape de una turbina de gas para precalentar el agua antes de que esta ingrese al segundo intercambiador, el cual utiliza la energía de una fuente convencional de calor, en este caso un quemador de fuel oil para la producción de vapor saturado y fue realizado en base a la norma ASME Sección I y Sección VIII.

Otro claro ejemplo se presenta en un estudio realizado por el centro de estudios de refrigeración de la Universidad de Oriente de Santiago de Cuba, donde se realiza una evaluación desde el punto de vista de la transferencia de calor, de un intercambiador que se ubica como recuperador de calor en un sistema de refrigeración industrial. En este equipo se recupera cierta parte del calor que es expulsado en el sistema de condensación. Por medio de ésta transferencia, se determina el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor, la efectividad, y la eficiencia para diferentes condiciones de trabajo en el intercambiador, obteniendo unos buenos resultados de efectividad.

Por otra parte, podemos observar las diferentes configuraciones de los arreglos de la tubería en la Revista de la Asociación Mexicana de Metodología y de la Investigación, donde realizan el diseño mecánico de un intercambiador de calor de tubo y coraza, en el cual tuvieron en cuenta algunas características del fluido de trabajo, en este caso fue agua fría y agua caliente, además de tener varios tubos con un arreglo triangular de 30° , debido a que, teniendo este arreglo, se obtiene una mayor área de transferencia de calor. Obteniendo unos resultados más eficientes y confiables, además de tener en cuenta que el empleo de una metodología adecuada sirve como herramienta que relaciona una propuesta de investigación o un problema a resolver con los resultados.

Otro ejemplo, lo encontramos en el artículo original escrito por Reyes Rodriguez, M. B. (“Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante el método de Taborek”), donde podemos ver el diseño de este equipo, mediante numerosos métodos de realización de este equipo, entre los más conocidos están: el Método de Kern, el Método de Bell Delaware, el Método de Tinker, el Método de Wills and Johnston. En este trabajo se describe y se automatiza el método de Taborek, además de realizar su optimización del costo del intercambiador de calor mediante el método de recocido simulado y el método de los algoritmos genéticos. Este método predice tanto los coeficientes de transferencia de calor como las caídas de presión en función de la geometría del haz de tubos y su descripción dimensional.

Podemos observar, un claro ejemplo de diseño de intercambiadores de calor de coraza y tubos, con la ayuda un programa que realice los cálculos mecánicos de éste, en el artículo “Dimensionamiento de intercambiadores de calor de coraza y tubos con ayuda de computador”, se realiza el desarrollo de un método que hace el dimensionamiento de los intercambiadores de calor de coraza y tubos, limitándose a la parte térmica-hidráulica del problema, pero siguiendo las normas mecánicas de fabricación de los principales constructores de esos equipos TEMA 3 (Tubular Exchanger Manufacturers Association), de modo que el programa queda en condiciones para que se realicen los cálculos mecánicos.

Por otra parte, encontramos en el trabajo “Evaluación de intercambiadores de calor compactos de tubos aletados”, otro tipo de diseño de intercambiadores de calor, con un análisis térmico teórico del equipo a trabajar con y sin condensación de agua en el lado del aire. Este análisis tiene en cuenta varias configuraciones geométricas con respecto a la superficie de las aletas y a la forma de los tubos, donde principalmente se considera la forma circular tradicional y además se tiene en cuenta un caso para tubos planos. Gracias a los resultados obtenidos, se ven reflejados en la eficiencia de la aleta en ambos casos: la primera es cuando una aleta se encuentra totalmente seca es decir, sin condensación y la segunda es cuando una aleta se encuentra totalmente húmeda es decir, cubierta por la película de condensado. Esta es una buena aplicación ya que los resultados obtenidos concuerdan con los de la literatura.

Otro ejemplo de la transferencia de calor de un tipo de intercambiador de calor, se encuentra en el trabajo “Estudio de los parámetros que afectan la transferencia de calor conjugada en intercambiador de calor de tubos y placas-aleta”, se utiliza un método numérico el cual analiza el efecto conjugado de la conducción de calor a través de las aletas y la convección de calor desde la superficie de las mismas en el equipo a estudiar. La superficie de la aleta se encuentra dividida en dos regiones, la primera es el agua que se encuentra por encima del tubo donde la transferencia de calor es elevada, además esta región se ve más afectada por la conducción a través de las aletas, con disminución de la transferencia de calor cuando la conducción es considerable, y la segunda donde también hay agua pero

se encuentra debajo del tubo donde la transferencia es limitada y donde es posible identificar una región de transferencia de calor inversa. Existe la posibilidad de mejorar la transferencia de calor del intercambiador haciendo el tubo excéntrico respecto a la longitud de la aleta. Al mover el tubo más cerca del borde de salida de las aletas el área de baja transferencia de calor detrás de los tubos se reduce en tamaño y, al mismo tiempo, la mayor longitud de la parte frontal de la aleta causa un incremento del área frontal, con una reducción del valor local del coeficiente convectivo. Esto sugiere la existencia de una posición óptima del tubo respecto a la longitud de la aleta.

A continuación se dará una breve explicación de los tres tipos de la transferencia de calor:

2.1 Transferencia de calor por conducción

“Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. Ésta tiene lugar en los sólidos, líquidos y gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio y en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas¹”. En conclusión, la transferencia de calor por conducción es la transmisión de energía calorífica en forma progresiva desde la masa de un cuerpo al entorno que lo rodea.

2.2 Transferencia de calor por radiación

“Es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío²”. Además, la transferencia de calor por radiación no requiere la intervención de un medio, y el calor puede ser transmitido por radiación a través del vacío absoluto. “Se cree que la energía radiante se origina dentro de las moléculas del cuerpo radiante, los átomos de cuyas moléculas vibran en un movimiento armónico simple como oscilaciones lineales, además, que la emisión de energía radiante representa una disminución en las amplitudes de vibraciones dentro de las moléculas, mientras que una absorción de energía representa un aumento³”. Un ejemplo muy claro de este tipo de transferencia es la llegada de la energía solar a la Tierra.

¹ CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor, segunda edición, México: Mcgraw Hill 1998. P. 17.

² Ibídem, P. 27.

³ KERN, Donald Q. Procesos de Transferencia de calor. Vigésima séptima reimpresión, México: Mcgraw Hill, 1995. P. 86.

2.3 Transferencia de calor por convección

“Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) adyacente que están en movimiento y comprenden los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido sea el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección⁴”. También sabemos que “la transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él⁵”.

La transferencia de calor por conducción puede ser de tipo natural o libre y es producida por las diferencias de densidades de la materia y ocurre cuando el movimiento del fluido se genera por agitación mecánica; y de tipo forzada, que es cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, en sí ésta ocurre cuando el fluido se agita mecánicamente, un ejemplo claro es movimiento del aire generado por un ventilador o del agua generado por una bomba. Éstos ocurren a diferentes velocidades, siendo la convección forzada la más rápida.

Dentro de la transferencia de calor podemos encontrar algunos ejemplos de equipos de ingeniería, como los siguientes:

- *Intercambiador de calor:* son dispositivos que permiten el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En un intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa.
- *Calderas:* es una máquina térmica que aprovecha una fuente de calor para transferir su energía a un fluido, este calor procede de los diferentes tipos de energía como: la energía eléctrica, la energía nuclear, la energía geotérmica y la energía de combustión. En estos equipos el calor se transfiere internamente hacia un fluido, por lo general agua o aceite térmico en otros casos, para posteriormente ser aprovechado en procesos de potencia y/o calentamiento”.

Las calderas de vapor son unas de las primeras aplicaciones de los intercambiadores de calor. Con frecuencia se emplea el término generador de vapor para referirse a las calderas en las que la fuente de calor es una corriente de un flujo caliente en vez de los productos de la combustión a temperatura elevada⁶. Los calentadores son un tipo de calderas ya sé que usan primariamente para calentar fluidos de proceso, y generalmente se usa vapor con este fin.

⁴ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 25.

⁵ KERN, Donald Q., Op. Cit. P. 43.

⁶ CUADRADO MAZON, Karina Cecilia. Tesis. Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas la facultad de mecánica, tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba (Ecuador), Facultad de Mecánica, 2010. P. 21.

- *Enfriadores:* se emplean para enfriar fluidos en un proceso, un ejemplo claro es el agua que generalmente se emplea como enfriador principal. Un ejemplo son los condensadores ya que, son enfriadores que principalmente eliminan el calor latente en lugar de calor sensible. Los condensadores se utilizan en muchas aplicaciones, algunos tipos principales son los condensadores de superficie, de chorro y los evaporativos. Uno de los más comunes, es el condensador de superficie que tiene la ventaja de que el condensado se recircula a la caldera por medio del sistema de alimentación.
- *Torres de enfriamiento:* se utilizan ampliamente para desechar en la atmósfera, ya que el calor proviene de procesos industriales en vez de hacerlo del agua de un río, un lago o en el océano.

2.4 Intercambiador de calor de coraza y tubos

Sabemos que los intercambiadores de calor son muy importantes, y para ello es necesario realizar un análisis de estos equipos ya que, es muy conveniente trabajar con ellos; existen varios tipos de intercambiador de calor, entre los cuales se pueden mencionar, en los cuales se pueden clasificar por la configuración de los mismos y por la dirección del flujo, a continuación se presentan algunos ejemplos:

- **Intercambiador de calor de doble tubo**

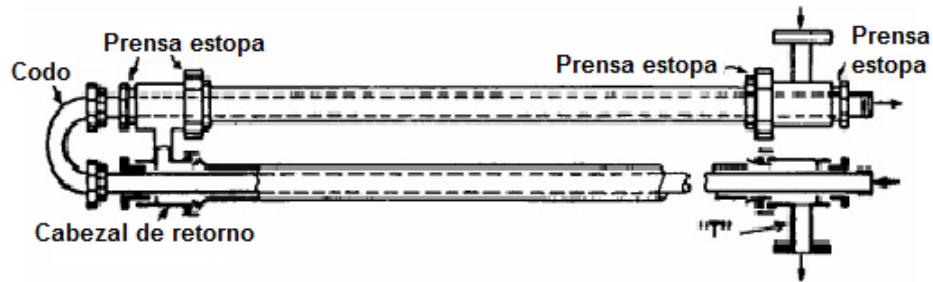
Este tipo de intercambiador de calor está conformado por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes, en este tipo uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, mientras que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos.

Este tipo de intercambiador que se observa en la

Figura 1, se sabe que es muy útil, ya que se puede ensamblar en cualquier taller de plomería a partir de partes estándar, proporcionando superficies de transferencia de calor a bajo costo⁷.

⁷ KERN, Donald Q., Op. Cit., P. 132.

Figura 1. “Intercambiador de calor de doble tubo”



Fuente: Kern, Donald Q. Intercambiadores de calor.

En este tipo de intercambiadores de calor encontramos dos configuraciones de los tubos, en la primera configuración tenemos el Intercambiador de doble tubo en serie, en el cual no se transfieren iguales cantidades de calor y en la segunda configuración tenemos el Intercambiador de doble tubo, arreglo serie – paralelo, en el cual la mitad del fluido entra al intercambiador superior II en donde el fluido del ánulo es caliente, y la otra mitad entra al intercambiador interior I en el cual el fluido del ánulo ha sido parcialmente enfriado, éste contribuye relativamente menos a la transferencia total de calor⁸.

- **Intercambiador de calor de placas**

En este tipo de intercambiadores de calor encontramos dos ejemplos claros, como los siguientes:

- *Intercambiador de calor de placas y armazón*

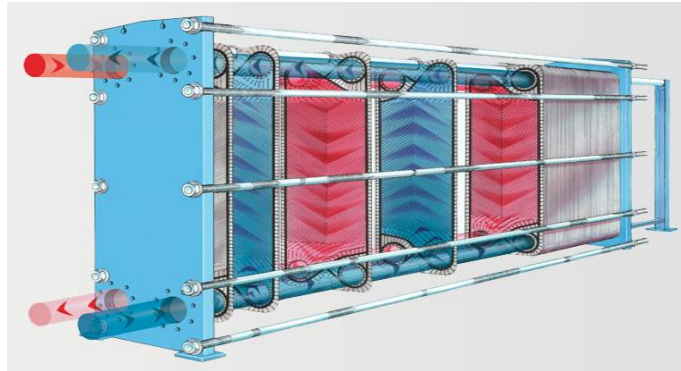
Es un sistema innovador, el cual consta de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados para el flujo. Los fluidos caliente y frío fluyen en pasos alternados, de este modo cada corriente de fluido frío queda rodeado por dos corrientes de fluido caliente, lo que da por resultado una muy buena transferencia de calor⁹.

Por otra parte, si se requiere de mayor demanda de transferencia de calor es necesario realizar el montaje de más placas. Este tipo de es adecuado para el intercambio de calor entre un líquido y otro, pero es necesario tener en cuenta el manejo de presiones parecidas entre los dos fluidos, tanto caliente como frío, lo podemos observar en la Figura 2:

⁸ KERN, Donald Q., Op. Cit., P. 148.

⁹ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 670.

Figura 2. “Intercambiador de calor de placas y armazón”



Fuente: Tranter.com. Intercambiadores de calor.

- *Intercambiador de calor compacto*

Este tipo de intercambiador está diseñado para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen. Estos permiten lograr velocidades elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño y son de uso común en aplicaciones con limitaciones estrictas con respecto al peso y el volumen de elementos. La gran área superficial se obtiene sujetando placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre sí a las paredes que separan los dos fluidos. Estos son de uso común en la transferencia de calor de gas hacia gas y de gas hacia líquido o viceversa¹⁰. A continuación, en la Figura 3 podemos observar un esquema de este tipo:

Figura 3. “Intercambiador de calor compacto”



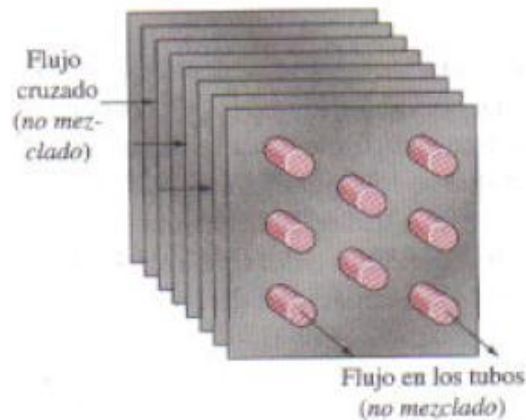
Fuente: kalfrisa.com/intercambiadoresdecalor.aspx

¹⁰ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 668 – 669.

Dentro de los intercambiadores compactos los dos fluidos se mueven de manera perpendicular entre sí, y se pueden clasificar como flujo no mezclado o mezclado, dependiendo de su configuración¹¹.

- El flujo cruzado es no mezclado: debido a que las aletas de placa fuerzan al fluido a moverse por un espaciamiento particular entre ellas, impidiendo su movimiento en la dirección transversal es decir, en paralelo a los tubos. Podemos observarlo en la Figura 4.

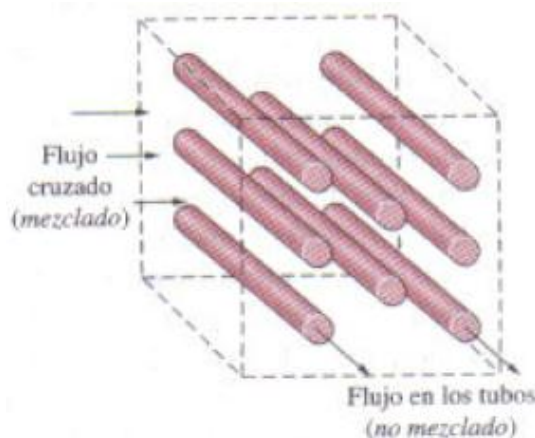
Figura 4. “Intercambiador de calor de flujo no mezclado”



Fuente: Cengel, Yunus A. Intercambiadores de calor.

- Flujo cruzado es mezclado (Figura 5): dado que el fluido ahora tiene libertad para moverse en la dirección transversal.

Figura 5 “Intercambiador de calor de flujo mezclado”



Fuente: Cengel, Yunus A. Intercambiadores de calor.

¹¹ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 669.

- **Intercambiadores de calor de acuerdo al tipo de corriente**

Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de acuerdo a la distribución de flujo. Dentro de estos tenemos cuatro tipos de configuraciones más comunes en la trayectoria del flujo.

En la *distribución de flujo en paralelo*, los fluidos caliente y frío, entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen a través de él en la misma dirección y salen por el otro extremo.

En la *distribución en contracorriente*, los fluidos caliente y frío entran por los extremos opuestos del intercambiador y fluyen en direcciones opuestas.

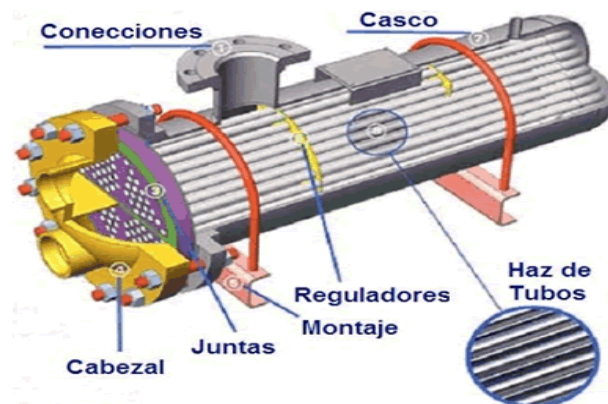
En la *distribución en flujo cruzado* de un solo paso, un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro fluido.

En la *distribución en flujo cruzado de paso múltiple*, un fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente de fluido¹².

- **Intercambiador de calor de coraza y tubos**

Este tipo de intercambiador se emplea en grandes aplicaciones industriales. Contienen un gran número de tubos empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, por lo cual el otro se mueve por fuera de estos, pasando por el casco. Por lo general se emplean desviadores en el casco, lo cual fuerza al fluido a moverse en dirección transversal a dicho casco con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espacio uniforme entre los tubos¹³. En la Figura 6 podemos observar este tipo de equipo:

Figura 6. “Intercambiador de calor de casco y tubos”



Fuente: refrigeracionindustrial.com. Intercambiadores de calor.

¹² CUADRADO MAZON, K. C. Op. Cit. P. 20 – 21.

¹³ CENGEL, Yunus . A., Op. Cit. P. 670.

Sabemos que estos equipos son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclado. El intercambiador de calor de tubos y coraza o intercambiador de calor de tubo doble, se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos, lo podemos observar en la Figura 7. Un fluido se desplaza por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Están diseñados para la transferencia de calor entre dos fluidos dentro del dispositivo, por lo que normalmente la coraza externa está bien aislada para evitar cualquier pérdida de calor hacia el medio circundante¹⁴.

Figura 7. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Inventor versión USTA.

Los Intercambiadores de calor de coraza y tubos son los más ampliamente utilizados en la Industria Química y con las consideraciones de diseño mejor definidas. Consisten en una estructura de tubos pequeños colocados en el interior de un casco de mayor diámetro.

2.4.1 Características y aplicaciones

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos, son uno de los diseños más utilizados en la industria, ya que cuentan con una buena relación costo-eficiencia, se pueden fabricar dentro de un rango amplio de tamaños donde se puede variar el diámetro y/o el largo y la capacidad, se pueden elaborar en diferentes materiales, flexibilidad, instalación (vertical u horizontal), fácil mantenimiento y reparación, facilidad instalación, es decir se pueden adaptar a las necesidades de la industria.

En los intercambiadores de calor de coraza y tubos se presentan algunas aplicaciones, las cuales se ven reflejadas en los diversos usos como lo son: condensación, el enfriar aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos, ayuda a calentar combustóleo en tanques de almacenamiento, en fosas de recepción y estaciones de bombeo, para enfriar aire

¹⁴ CENGEL, Yunus A. Termodinámica, sexta edición, México D.F: Mcgraw Hill, 2009. P. 244.

como Post-enfriadores de compresos de aire (alter - coolers), en la condensación de refrigerantes, en los intercambiadores de calor para procesos químicos y/o petroquímicos, en los Chillers que son Intercambiadores de calor que enfrían agua con gas refrigerante para unidades de agua helada, en los Inter – Enfriadores y Post – Enfriadores para compresores Atlas Copco, en los Inter – enfriadores y Post – Enfriadores para compresores Ingellson Rand. Además de tener muchas combinaciones con diferentes fluidos como: el vapor con el agua, el aceite con el agua, el vapor con combustóleo, el aire con agua, refrigerante y agua, entre otros.

2.4.2 Componentes de los intercambiadores de calor de coraza y tubos

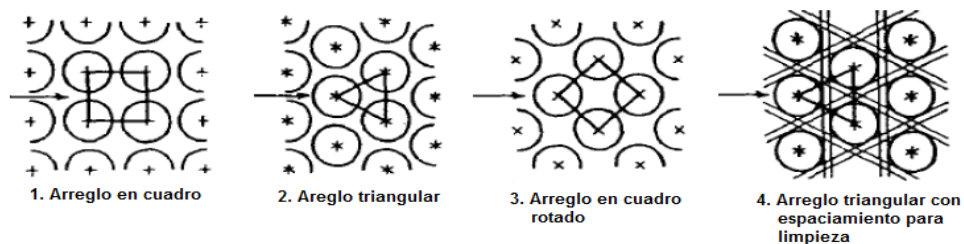
Dentro de los componentes de un intercambiador de calor podemos encontrar los siguientes: la tubería, la coraza y los tipos de esta, y las tapas.

• Tubería

Los tubos para los intercambiadores de calor, pueden fabricarse en diversos tipos de materiales como: acero, cobre, cobre-níquel, latón, aluminio, aluminio-bronce, aceros inoxidables, entre otros. Los diámetros de la tubería deben estar dentro de las tolerancias dimensionales existentes comercialmente, ya que estos tendrán espesores de pared ya predeterminados y dados por la industria.

Para el espaciado de los tubos, los orificios correspondientes no pueden situarse muy cerca entre sí, puesto que, esto debilitaría estructuralmente cada cabezal de tubos. Los tubos pueden tener una configuración de tipo triangular o cuadrada, así:

Figura 8. “Disposición de los tubos”



Fuente: Tesis. Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas la facultad de mecánica.

Una de las ventajas del arreglo cuadrado consiste en que los tubos resultan accesibles para la limpieza externa y que tienen una baja caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección mostrada en la Figura 8, numeral 1. En la disposición triangular se produce mayor turbulencia, debido a que el fluido que circula entre los tubos adyacentes a alta velocidad golpea directamente en la hilera siguiente. Esto supone que cuando la caída de presión y la limpieza son aspectos de menores consecuencias, la disposición triangular es mejor para alcanzar valores altos del coeficiente de transmisión de calor en el lado de la coraza (fuera del haz de tubo), consiguiéndose así coeficientes en torno al 25% mayores que con la disposición en cuadro bajo condiciones similares.

Generalmente un pequeño paso en arreglo triangular a 30° es preferible para flujo turbulento y laminar en procesos limpios, arreglos en 90° (cuadrado) o 45° (cuadrado rotado) con 6.4 mm de separación, para casos donde se requiere limpieza mecánica. Existen excepciones cuando se requiere regular la caída de presión o la velocidad de flujo¹⁵.

- **Coraza**

Las corazas de los intercambiadores se fabrican de tubo de acero, con un espesor normalizado comercialmente y determinado según el diámetro de la coraza y la presión de trabajo correspondiente. Uno de los materiales más usado para la construcción de las corazas es el acero al carbono. Para diámetros inferiores a 60,96cm (24”), se puede construir de tubería comercial. Para más de 60,96cm (24”) la coraza se realiza con planchas de aceros enrollados y soldados. Por cada extremo se sueldan las bridas que llevarán las tapas y las cajas de distribución. Las toberas de entrada y salida se sueldan, o no, con una placa de refuerzo según la presión de servicio. La redondez de la coraza es importante al fijar el diámetro máximo de los deflectores y el efecto de la fuga entre la coraza y el deflector¹⁶.

Existen diversos tipos de coraza de un intercambiador de calor de casco y tubo según nos dice la norma TEMA los cuales se identifican con tres letras, el diámetro en pulgadas del casco y la longitud nominal de los tubos en pulgadas. La primera letra es la que nos indica el tipo del cabezal estacionario. Los de tipo A representan el canal y la cubierta desmontable y los de tipo B representan el casquete y son los más comunes. La segunda letra nos indica el tipo de casco o coraza, en estas se encuentra la más común que es la de tipo E que representa una coraza de un paso, la de tipo F es la representativa de dos pasos y es más complicada de mantener, los de tipos G, H y J se emplean para reducir las pérdidas de presión en la coraza, el K es el tipo de rehervidor de una caldera utilizado en la torre de fraccionamiento y el de tipo U (haz de tubos en U) es el más económico. A continuación se define el modo de uso para cada tipo de coraza, así:

Se utiliza la coraza **tipo “E”** y la coraza de dos pasos de tipo **“F”**, cuando hay un cruce de temperaturas y además se quiere lograr una contracorriente pura entre los fluidos de tubos y coraza.

La coraza **tipo “G”** de flujo splits, presenta las cualidades de la coraza tipo **“F”**, su uso principal está en la condensación de vapores. El vapor entra por la parte superior de la coraza dividiéndose en dos debido a la placa de soporte que divide a la coraza en dos compartimentos idénticos. Después que el vapor pasa por la

¹⁵ CUADRADO MAZON, K. C. Op. Cit. P. 28 - 29.

¹⁶ CUADRADO MAZON, K. C. Op. Cit. P. 29.

parte superior de la placa longitudinal, cruza hacia el segundo paso de la coraza en dirección contraria para salir finalmente por la boquilla inferior. Las velocidades y la longitud de travesía en la coraza, son las mismas que para una coraza tipo **“E”**, la ventaja consiste en que el condensado se mantiene por un tiempo más largo en contacto con los tubos.

La coraza **tipo “H”**, doble splits se utiliza para reducir la caída de presión. En condensadores, la alimentación de vapor se divide en las dos boquillas de alimentación. La coraza se divide en dos compartimentos separados por un soporte transversal completo en el centro de la coraza; el vapor fluye por cada mitad de la coraza por encima de la mampara longitudinal y regresa por la parte inferior hacia la boquilla de salida y prácticamente se unen las dos salidas en una sola línea.

La coraza **tipo “K”** se utiliza para cuando se requiere generar vapor y por lo tanto, hay que mantener una parte líquida del fluido de alimentación y dejar un espacio encima del nivel del líquido para que el vapor producido pueda viajar a una velocidad suficientemente baja a fin de que las gotas de líquido que arrastra tenga la oportunidad de caer.

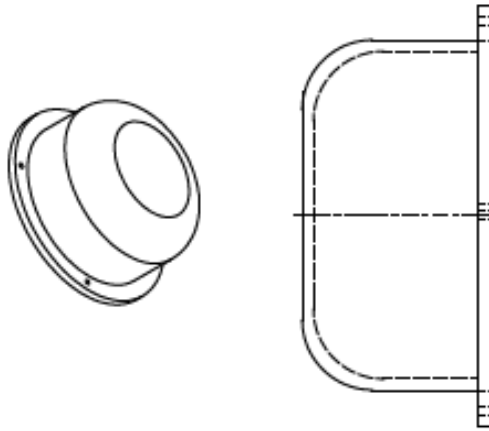
En los “chiller”, en los cuales el fluido dentro de los tubos es enfriado por la evaporación de un refrigerante en la coraza, la construcción es similar a los Kettles, con una construcción en los cabezales del **tipo “U”** ya que normalmente los gradientes de temperatura son pequeños¹⁷.

- Tapas

Los elementos empleados en los cabezales tanto de entrada como de salida, proporcionan el cierre de los extremos del intercambiador de calor, estos pueden ser de dos tipos: Tapas Abombadas y Tapas Planas, las cuales se deben seleccionar de acuerdo a las características que cada una de ellas tenga o también por el tipo de tapa que requiera el intercambiador de calor que se diseña, tomando en consideración las condiciones de servicio.

¹⁷ CUADRADO MAZON, K. C. Op. Cit. P. 30 - 31.

Figura 9. “Tapas intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Inventor versión USTA.

2.4.3 Relaciones de diseño y cálculo para intercambiador de coraza y tubos

Para realizar el diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos es necesario tener en cuenta el diseño térmico, en el cual se realiza el análisis termodinámico del equipo en donde se puede conocer la tasa de transferencia de calor, también se escoge el método con el cual se va a realizar el diseño, en este caso se realiza el diseño del equipo por medio del método de diseño de **LMTD** (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica), en donde es necesario conocer de las temperaturas de entrada y de salida, además del flujo másico de los fluidos, de tal manera que es posible determinar el área de transferencia de calor, luego se prosigue a encontrar el coeficiente global de transferencia de calor. Éste coeficiente se define en términos de la resistencia térmica total a la transferencia de calor entre dos fluidos. Es aquí donde influyen muchos factores que implican características del flujo, propiedades de los dos fluidos, dimensiones de los conductos, entre otros; en el diseño hidráulico se establece las variables como la caída de presión que sufren los fluidos, y asegura que se estos encuentre dentro de rangos permisibles para el correcto funcionamiento del equipo; y en el diseño mecánico el cual consta de un conjunto de elementos ensamblados como la coraza, las placas y los tubos, para ello cada componente se debe analizar por separado en función de las tensiones, de las fuerzas y de las deformaciones a los cuales están sometidos. Se deben calcular los espesores de la coraza sus otros componentes.

A continuación se encuentran las ecuaciones empleadas para el desarrollo del diseño del intercambiador de coraza y tubos:

- **Área de transferencia de calor**

Se define como el área total disponible para la transferencia de calor entre los dos fluidos. En el intercambiador de calor de coraza y tubos el área superficial se calcula hallando el área superficial de un tubo y multiplicándolo por el número de tubos y el número de pasos por la carcasa¹⁸.

- **Flujo másico**

Se define como la cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un aparato de flujo, por unidad de tiempo. Sabemos que “el flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía. De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale saca algo consigo¹⁹”.

$$(1) \quad \dot{m}_i = \rho_l * V * A$$

- **Delta de temperatura**

Se define como la diferencia entre las temperaturas de salida y de entrada del intercambiador de calor de coraza y tubos. Esta diferencia, “es la fuerza motriz, mediante la cual el calor se transfiere desde la fuente al receptor. Su influencia sobre sistemas de transferencia de calor, que influyen tanto a la fuente como al receptor, es el sujeto inmediato para estudio²⁰”.

$$(2) \quad \Delta T_i = T_{i \text{ salida}} - T_{i \text{ entrada}}$$

- **Velocidad de transferencia neta de calor**

Se define como el productora entre el flujo másico del fluido, el calor específico del agua y la diferencia de temperaturas del intercambiador de calor de coraza y tubos. Por otro lado, sabemos que la transferencia de calor hacia un sistema es la ganancia de calor, lo que incrementa la energía de las moléculas y por ende la del sistema; asimismo, la transferencia de calor de un sistema que puede ser una pérdida de calor, la disminuye, puesto que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.

$$(3) \quad q_i = \dot{m}_i * C_p * \Delta T_i$$

¹⁸ PALOMINO MASCO, Joel Fernando. Tesis. Modelamiento experimental del intercambiador de calor de Tubos y Carcasa de Längerer. Tesis, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. 2010. p.06.

¹⁹ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. p. 73.

²⁰ KERN, Donald Q., Op. Cit. p. 111.

- **Diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (Log Mean Temperature Difference)**

El **LMTD** es un método de diseño, en el cual es necesario conocer de las temperaturas de entrada y de salida, además del flujo másico de los fluidos es posible determinar el área de transferencia de calor siguiendo un procedimiento lógico y adecuado.

$$LTD = \Delta T_{ln}$$

$$(4) \quad LTD = \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}}) - (T_3 - T_{i\text{ entrada}})}{\ln \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}})}{(T_3 - T_{i\text{ entrada}})}}$$

- **Temperatura promedio de los tubos**

La temperatura promedio de la suma entre las temperaturas de entrada y de salida del fluido a trabajar en el intercambiador de calor de coraza y tubos.

$$(5) \quad T_s \text{ prom} = \frac{T_{i\text{ entrada}} + T_{i\text{ salida}}}{2}$$

- **Calor latente de vaporización**

Se define como la suma del calor latente y el producto entre un coeficiente dado por la formula, el calor específico del agua y entre la resta de las temperaturas de saturación y de superficie. Sabemos que el calor latente de vaporización h_{fg} es el liberado cuando se condensa una unidad de masa de vapor y normalmente representa la transferencia de calor por unidad de masa de condensado. Sin embargo, en un proceso real el condensado se enfría todavía más hasta alguna temperatura promedio entre T_{sat} y T_s liberando más calor. Por lo tanto, la transferencia real de calor será mayor.

En 1956 Rohsenow demostró que se puede tomar en cuenta el enfriamiento del líquido al reemplazar h_{fg} por el *calor latente de vaporización modificado* h_{fg}^* definido así²¹:

$$(6) \quad h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68C_p(T_{sat} - T_s)$$

²¹ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. pp. 533 – 534.

- **Número de Nusselt**

El Número de Nusselt (Nu) es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido circula (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción. Cuanto mayor es el número de Nusselt más eficaz es la convección²².

Se sabe que el nombre lo recibe en honor a Wilhelm Nusselt, quien hizo muchas contribuciones importantes en la transferencia de calor por convección, a mediados del siglo XX. Este se calcula teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$NU = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} = \frac{hL_c}{k}$$

Podemos decir, que para un número de Nusselt de $NU = 1$ para una capa de fluido, se ve representada transferencia de calor a través de ésta por conducción pura. Éste número se puede emplear en la convección natural y en la convección forzada, generalmente se acude a la convección forzada, cuando se necesita incrementar la velocidad de la transferencia de calor.

- **Calculo del coeficiente de vapor hacia el agua**

Se puede expresar el análisis de Nusselt de la condensación en película sobre placas verticales hacia tubos horizontales y esferas. Se determina que el coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película sobre las superficies exteriores de un tubo horizontal es²³:

$$(7) \quad h_o = 0,729 \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg}^* * Kl^3}{\mu l * (T_{sat} - T_s) * de} \right]^{1/4}$$

- **Número de Prandtl**

Se llama así, por Ludwig Prandtl, quien realizo aportes importantes a la teoría de la capa límite, dando como resultado un número adimensional.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

²² CUADRADO MAZON, K. C. Op. Cit. P. 11.

²³ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 539 – 540.

Los números de Prandtl de los fluidos van desde menos de 0,01 para los metales líquidos, hasta más de 100000 para los aceites pesados y para el agua es del orden de 10. Para los gases son de 0,1, lo que indica que tanto la cantidad de movimiento como el calor se disipan a través del fluido a más o menos la misma velocidad. El calor se difunde con mucha rapidez en los metales líquidos y muy despacio en los aceites, en relación con la cantidad de movimiento²⁴.

En los metales líquidos, la capa límite térmica es mucho más gruesa y en los aceites es mucho más delgada, todo en relación con la capa límite de la velocidad. Cuando hay problemas de transferencia de calor el número de Prandtl es el que controla el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica, por lo que, cuando un número de Prandtl es pequeño significa que el calor se difunde muy rápido en comparación con la velocidad.

- **Numero de Reynolds**

Es un número adimensional que relaciona viscosidad, densidad, velocidad y dimensión de un flujo. Generalmente se utiliza para determinar si un flujo es laminar o turbulento.

$$(8) \quad R_e = \frac{\rho_l V_{max} D}{\mu l} = \frac{V_{max} D}{\nu}$$

En los números grandes de Reynolds las fuerzas de inercia que son proporcionales a la densidad y a la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas, haciendo que éstas no impidan las fluctuaciones aleatorias y rápidas de ese fluido; pero en los números pequeños de Reynolds las fuerzas viscosas son suficientemente grandes y capaces de vencer a las fuerzas de inercia, además de mantener al fluido en línea, de tal manera que, para el primer caso sería flujo turbulento y para el segundo caso sería flujo laminar.

El número de Reynolds para la condensación sobre las superficies exteriores de los tubos o de las placas verticales se incrementan en la dirección del flujo al aumento de espesor de la película del líquido. El flujo de la película muestra regímenes diferentes dependiendo del valor del número de Reynolds, $Re < 30$ para películas que permanecen lisas y sin ondas, para un Reynolds entre $450 < Re < 1800$ se dice que es un flujo laminar en donde aparecen rizos o algunas ondas y para un $Re > 1800$ se dice que es un flujo turbulento²⁵.

²⁴ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. p. 342.

²⁵ BASTILLA PINTO, O. J. Op. Cit. 2011.

Para $Re > 10000$

$$(9) \quad NU = 0,023(Pr^{0.4})(Re^{0.8}) \quad \text{Calentamiento fluido tubo}$$

$$(10) \quad NU = 0,023(Pr^{0.3})(Re^{0.8}) \quad \text{Enfriamiento fluido tubo}$$

- **Cálculo del coeficiente de agua en los tubos**

El flujo anular está asociado con dos números de Nusselt NU_i sobre la superficie interior del tubo y NU_v sobre la superficie exterior del tubo, ya que puede estar relacionado con la transferencia de calor en las dos superficies²⁶.

Al conocer los números de Nusselt, entonces se puede calcular el coeficiente de convección del interior mediante la ecuación 11, la cual relaciona el producto entre la conductividad térmica del material y el número de Nusselt, dividido entre el diámetro de la tubería.

$$(11) \quad h_i = \frac{K * NU}{D}$$

- **Coeficiente global de transferencia de calor U**

Se define como la cantidad de calor total transferido por unidad de superficie ante una variación de un grado Celsius. Este valor es obtenido experimentalmente y varía de acuerdo a las características del intercambiador²⁷. Además, este coeficiente es uno de los más importantes pasos a realizar en el análisis térmico de un intercambiador de calor de coraza y tubos ya que es evaluado entre las dos corrientes fluidas, como por ejemplo en el caso objeto de esta tesis donde los fluidos a trabajar son vapor en el coraza y agua en la tubería interna.

El coeficiente global de transferencia de calor entre un fluido caliente a temperatura T_c y otro frío a temperatura T_f , separados por medio de tubería se define mediante la siguiente ecuación:

$$(12) \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

En un proyecto es necesario calcular los coeficientes de transferencia de calor individuales, pero suele ser útil en las estimaciones preliminares el tener un valor aproximado de U, típico de las condiciones que han de encontrarse en la práctica; hay que tener en cuenta que, en muchos casos, el valor de U viene determinado casi completamente por la resistencia térmica en una de las películas fluido/sólido, como sucede, cuando uno de los fluidos es un gas y el otro un líquido o si uno de

²⁶ CENGEL, Yunus A., Op. Cit. p. 444.

²⁷ PALOMINO MASCO, J. F. Op. Cit. 2011.

los fluidos es un líquido en ebullición con un coeficiente de transferencia térmica muy grande²⁸.

- **Longitud para un solo tubo**

La longitud del tubo se encuentra definida por la velocidad de transferencia de calor, sobre el producto entre pi (π), el diámetro de la tubería, el coeficiente global de transferencia de calor y la diferencia de temperatura media logarítmica.

$$(13) \quad L = \frac{q_i}{\pi * D * U * LTDM}$$

- **Coeficientes corregidos**

$$(14) \quad h = \frac{1}{n^{1/4}} * h_o$$

- Coeficiente global de transferencia de calor corregido:

$$(15) \quad U_n = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h}}$$

- Área superficial

$$(16) \quad A_s = \frac{q_i}{U_n * LTDM}$$

- Longitud de los tubos

$$(17) \quad L_t = \frac{A_s}{\pi * D * n}$$

- **Diseño Hidráulico**

El diseño hidráulico establece las variables como la caída de presión que sufren los fluidos, para ello es necesario realizar los cálculos pertinentes que aseguren que variables como: la velocidad de entrada del fluido (vapor) se encuentre dentro del rango permitido que es igual 10,5m/s, al igual que la caída de presión máxima

²⁸ CUADRADO MAZON, K. C., Op. Cit., p. 38 – 39.

que debe estar dentro del 10%, de esta manera se garantiza que se cumplan los parámetros requeridos y así mismo el correcto funcionamiento del equipo.

En un intercambiador de calor la caída de presión puede ser producto de:

- La fricción debido al flujo.
- Los cambios en la dirección del flujo.
- La expansión y contracción en las entradas y salidas de las boquillas y tubos.

- **Diseño Mecánico**

En el diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos, es necesario saber que consta de un conjunto de elementos ensamblados como la coraza, las placas y los tubos, para ello cada componente se debe analizar por separado en función de las tensiones, de las fuerzas y de las deformaciones a los cuales están sometidos.

Se deben calcular los espesores de la coraza sus otros componentes. Es necesario verificar el espesor de la pared de los tubos seleccionado en el diseño térmico, posteriormente se calculan los elementos sujetos a presión y finalmente se dimensionan los elementos no sujetos a presión.

3 DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR

El equipo seleccionado y a diseñar es un intercambiador de calor de coraza y tubos, el cual ofrece características y ventajas que permitirán realizar un desarrollo didáctico a nivel de laboratorio por las siguientes razones: este equipo es ampliamente manejado a nivel industrial y es comercial lo que brinda un acercamiento al estudiante con la realidad de los procesos térmicos en la industria, brinda características de construcción que facilitan su implementación, como el costo, la consecución de materiales y la facilidad del proceso de fabricación, además permite realizar diversos tipos de prácticas con las cuales los estudiantes afianzarán los conocimientos teóricos vistos en las áreas de ciencias térmicas como lo son en: termodinámica, transferencia de calor, ciclos termodinámicos y plantas térmicas.

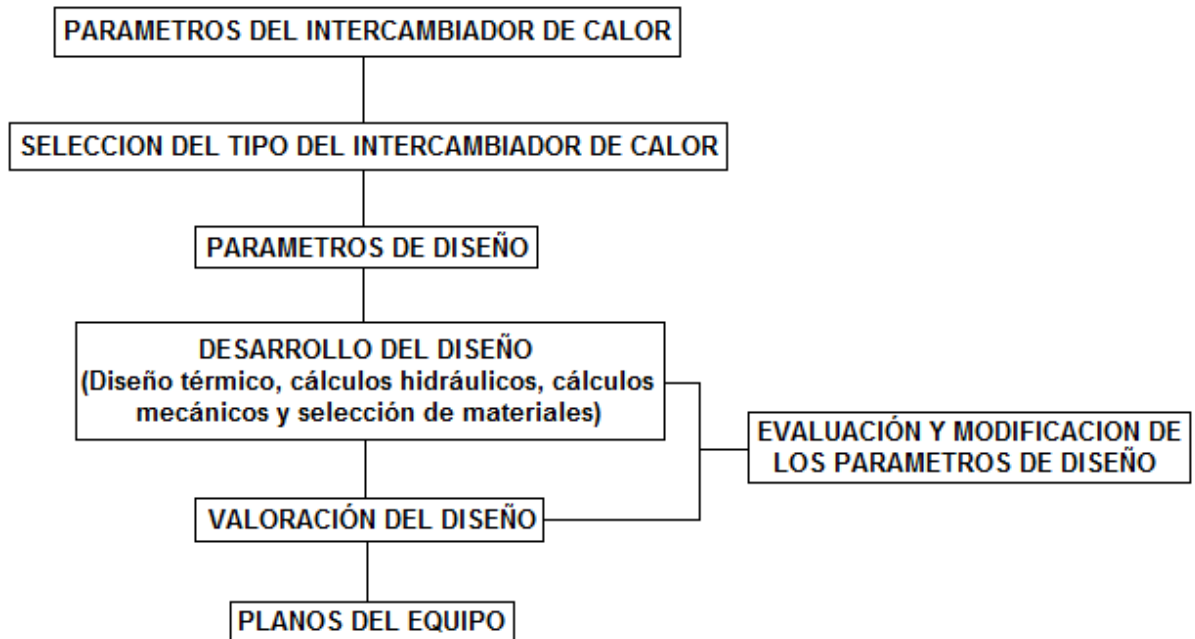
El Intercambiador de calor de coraza y tubos se encuentra compuesto por tubos en U, por donde se encuentra el vapor que circula en la coraza y el agua por dentro de los tubos. Gracias al diseño el haz de tubo se puede retirar de la coraza del intercambiador de calor, además consta de dos tapas a los lados de la coraza que ayudan a garantizar una mejor limpieza del equipo y un fácil mantenimiento, estas tapas se unen por medio de pernos.

El diseño de este equipo se realiza con el fin de afianzar los conocimientos de los estudiantes, motivándolos e incentivándolos, con implementos que complementen su formación académica, como el equipo a diseñar objeto de este proyecto, ya que es fundamental que la teoría se conjugue con la práctica en el campo de la ingeniería mecánica.

Para ayudar a visualizar el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos, es necesario realizar una presentación de un diagrama de flujo donde se observan las variables más importantes y que son necesarias tener en cuenta, a la hora de realizar el diseño de un intercambiador de calor, ya que entra en juego la selección del tipo de intercambiador de calor que se desee diseñar, los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta para el mismo diseño, además es necesario tener en cuenta el desarrollo del diseño, donde influyen los cálculos pertinentes para realizar los diseños térmicos, hidráulicos y mecánicos, así como también la selección de materiales a emplear en el equipo, posteriormente se realiza una evaluación del diseño en general, en donde se pueden realizar modificaciones de los parámetros necesarios y finalmente se realiza una evaluación de los costos en general del equipo diseñado.

A continuación, en la Figura 10 podemos observar el diagrama.

Figura 10. “Proceso para realizar el diseño de un intercambiador de calor”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

3.2 Diseño Térmico

Para el diseño térmico es necesario realizar el análisis termodinámico del intercambiador de calor de coraza y tubos, con esto se puede conocer la tasa de transferencia de calor y la diferencia de temperaturas media logarítmica. Ahora para poder determinar el área de transferencia de calor es necesario encontrar el coeficiente global de transferencia de calor. Éste coeficiente se define en términos de la resistencia térmica total a la transferencia de calor entre dos fluidos, por lo cual implica las resistencias de conducción y convección. Es aquí donde influyen muchos factores que implican características del flujo, propiedades de los dos fluidos, dimensiones de los conductos, entre otros que hacen de este diseño, un proceso que requiere de muchas iteraciones, además de un considerable tiempo.

El método que se escogió para realizar el diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos objeto de esta tesis es: el método de diseño de **LMTD** (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica), con el cual es necesario conocer de las temperaturas de entrada y de salida, además del flujo másico de los fluidos es posible determinar el área de transferencia de calor siguiendo un procedimiento lógico y adecuado. Ya que es necesario realizar un diseño como bien lo explica este método y no un análisis.

Selección de los materiales

Para la selección de materiales es necesario considerar la aplicación y los fluidos de trabajo, efectos como la corrosión y características de alta transferencia térmica, son condiciones importantes a tener en cuenta. Las consideraciones de la coraza en la cual circulará vapor y la tubería interna en la cual circulará agua, son indispensables en el diseño del intercambiador de calor. Además, por ser un equipo con fines didácticos, es importante contar con materiales disponibles en el comercio. Con una buena selección de materiales se verán reflejados los resultados de la correcta y segura operación del equipo, así como la viabilidad de su fabricación y mantenimiento.

Acero Inoxidable: el cromo (Cr) es el elemento que les da la calidad de inoxidables a estos aceros. El acero debe contener por lo menos 11% de cromo para adquirir resistencia a la corrosión atmosférica. Los porcentajes de cromo aún mayores hacen al acero todavía más resistente a la corrosión a altas temperaturas. El níquel se añade para mejor ductilidad, la resistencia a la corrosión y otras propiedades²⁹. La ductilidad de este material es una propiedad que le permite a un metal deformarse permanentemente cuando se le carga en tracción. Cualquier metal que pueda estirarse para formar alambre es dúctil.

Cobre: es el metal no ferroso más extendido en la técnica. El cobre puro se usa en electrotécnica como un buen conductor de corriente; la presencia de impurezas disminuye bruscamente la conductividad del cobre³⁰. Además, sabemos que este material tiene conductividades térmica y eléctrica altas cuando está puro, pero pierde estas propiedades en cierto grado cuando se alea. El cobre es muy dúctil y puede estirarse fácilmente para formar alambre o productos tubulares. Es tan blando que hay dificultad para maquinarlo y tiende a adherirse a las herramientas³¹. Una de las propiedades más importantes de este material es la corrosión,

CORAZA:

A continuación en la Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

se presentan las dimensiones del material seleccionado para la coraza:

Tabla 1. Dimensiones del material seleccionado.

Tubo de Acero inoxidable 304			
Diámetro Nominal	Diámetro Externo	Espesor	Diámetro interno
	Mm	mm	mm
8"	203,20	277	197,66

²⁹ NEELY, Jhon E. Metalurgia y materiales industriales, Primera Reimpresión, México: Limusa Noriega Editores, 2000. p.54.

³⁰ MALISHEV, A. NIKOLAIV, G. SHUVALOV, Y. Tecnología de los metales, Octava reimpresión, México: Editorial Limusa S.A de C.V. Grupo Noriega Editores. 1994. p. 153.

³¹ NEELY, Jhon E. Op. Cit. p. 70.

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

El material seleccionado a nivel comercial, brinda una gran facilidad de adquisición y además tiene un costo medio. Se lo puede conseguir comercialmente en medidas estándar y además presenta características muy óptimas de resistencia a la corrosión. Es ideal para el uso con vapor y es fácil realizar su mantenimiento.

TUBERIA:

A continuación en la Tabla 2 se evalúan diferentes opciones de materiales para la tubería del intercambiador, considerando las características más representativas que influyen directamente en la aplicación, con el fin de obtener una selección óptima y adecuada:

Tabla 2. Características de materiales.

Características	Cobre	Acero al Carbón	Acero Inox 304
Conductividad térmica	0,6366 W/m.°C	47 – 58 W/m.K	14 – 16 W/m.K
Resistencia a la corrosión	Excelente	Muy baja ya que tiende a oxidarse	Elevada resistencia
Ventajas de aplicación	Elevada conductividad de calor y electricidad. Buena maleabilidad y ductilidad. Buena conductividad.	Buena resistencia a la tracción, es decir al esfuerzo interno. Es muy tenaz. Es maleable y dúctil.	Resistente a la suciedad y a la oxidación. Resistencia a las temperaturas elevadas.

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

A continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resenta la selección del material:

Tabla 3. Dimensiones del material seleccionado

Tubería de Cobre				
Diámetro Nominal	Diámetro Externo Mm	Espesor mm	Diámetro interno Mm	K W/m.°C
1/2"	15,875	3,2	12,7	0,6366

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

La tubería de cobre ofrece una buena resistencia respecto a la corrosión, tiene un alto coeficiente de conductividad respecto a otros materiales, aunque el costo es un poco más elevado, pero se consigue fácilmente en el mercado, son normalmente utilizados en la industria, además que es ampliamente usado en la manipulación de agua fresca y también resisten el ataque del vapor puro.

TAPAS:

La selección del material que tendrán las tapas, será mediante un accesorio tapa o tapón capa y será correspondiente al material del tubo de la coraza seleccionado.

Parámetros Iniciales bajo los cuales se realiza el diseño del equipo:

Para el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos se requieren de algunos parámetros iniciales, bajo los cuales se realizarán los cálculos necesarios para este diseño. A continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las principales características del equipo:

Tabla 4. Parámetros iniciales de los fluidos a trabajar

Fluido a calentar	Agua	Disposición: dentro de los tubos
Temperatura de entrada	16°C	Entregada por el acueducto
Temperatura de salida	60°C	Obtenida por el proceso
Fluido empleado para el calentamiento	Vapor saturado	Dentro de la carcasa y por fuera de los tubos internos a 137.895 kPa (20 psi)

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Las condiciones del suministro de agua será la ya existente y disponible y proveniente de una llave de agua, ubicada en el laboratorio de ingenierías en el edificio Ángel Calatayud. Su diámetro es de $1/2" = 0,0127\text{m}$ y el caudal y velocidad de agua se determina por cálculo experimental en el laboratorio de la siguiente forma, se tomó como referencia los datos ya calculados anteriormente en la Tesis: "Diseño y construcción de un intercambiador de calor para prácticas de laboratorio"³², en la cual se realizó una prueba de laboratorio y fueron tomados los siguientes datos: el caudal $Q = 1,111 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, el área de la boquilla de un grifo $A = 1,3 \times 10^{-4} \text{m}^2$ y posteriormente se procede a encontrar la velocidad del fluido que va dentro de los tubos, así:

$$Q = V * A$$

$$V = 0,87712 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Cálculo de la longitud de los tubos:

Para la longitud (Ecuación 13) requerida para el diseño del intercambiador de coraza y tubos se emplea la siguiente ecuación:

$$L = \frac{q_i}{\pi * D * U * LTDM}$$

³² BASTILLA PINTO, Oscar Julián. Tesis. Diseño y construcción de un intercambiador de calor para prácticas de laboratorio. tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomas, Bogotá. 2011.

Los datos del vapor fueron tomados bajo una presión de entrada de 137.895 kPa (20 psi) de acuerdo a las tablas termodinámicas del libro Cengel.

Por lo tanto es necesario realizar el siguiente desarrollo de los cálculos del intercambiador de calor de coraza y tubos:

- Determinación del flujo másico (1) de agua que ira dentro de los tubos:

$$\rho_l = 997 \frac{kg}{m^3} \text{ Densidad del agua que va por los tubos obtenidos de las tablas}$$

termodinámicas del Libro Cengel

$$(1) \quad \dot{m}_i = \rho_l * V * A$$

$$\dot{m}_i = 997 \frac{kg}{m^3} * 0,87712 \frac{m}{s} * 1,3 \times 10^{-4} m^2$$

$$\dot{m}_i = 0,11078 \frac{kg}{s}$$

- Después de hallar el flujo másico, es necesario encontrar el calor (3) necesario para aumentar la temperatura del agua en el intercambiador:

$$(2) \quad \Delta T_i = T_{i \text{ salida}} - T_{i \text{ entrada}}$$

$$\Delta T_i = 60^\circ C - 16^\circ C$$

$$\Delta T_i = 44^\circ C$$

Tabla 5. Cálculo del calor.

Cálculo del calor $q_i = \dot{m}_i * Cp * \Delta T_i$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
Cp	Calor específico del agua	$4225 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$	Tomado de tablas termodinámicas. Libro Cengel

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(3) \quad q_i = \dot{m}_i * Cp * \Delta T_i = 20593,59 W$$

- Posteriormente es necesario determinar la diferencia media logarítmica de acuerdo a la ecuación 4:

Tabla 6. Cálculo de LTDM.

Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica			
$LTDM = \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}}) - (T_3 - T_{i\text{ entrada}})}{\ln \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}})}{(T_3 - T_{i\text{ entrada}})}}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
T_2	Temperatura de entrada del fluido caliente	108,8444°C	Temperatura a 20psi. Tablas vapor saturado
T_3	Temperatura de salida del fluido caliente	108,8444°C	Temperatura a 20psi. Tablas vapor saturado
$T_{i\text{ entrada}}$	Temperatura de entrada del fluido frío	16°C	Temperatura de diseño
$T_{i\text{ salida}}$	Temperatura de salida del fluido frío	60°C	Temperatura de diseño

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(4) \quad LTDM = \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}}) - (T_3 - T_{i\text{ entrada}})}{\ln \frac{(T_2 - T_{i\text{ salida}})}{(T_3 - T_{i\text{ entrada}})}} = 68,50543^\circ\text{C}$$

- Determinación del calor latente de vaporización (6):

Tabla 7. Calor latente de vaporización

Calor latente de vaporización			
$h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68C_p(T_{sat} - T_s)$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
h_{fg}	Calor latente a la temperatura de saturación	$2232,797 \frac{J}{kg}$	Tomado de tablas termodinámicas. Libro Cengel
C_p	Calor específico de película (fluido dentro de los tubos)	$4225 \frac{J}{kg \cdot ^\circ\text{C}}$	Tomado de tablas termodinámicas. Libro Cengel
T_{sat}	Temperatura de saturación	108,8444°C	Temperatura a 20psi. Tablas vapor saturado
T_s	Temperatura de superficie	38°C	Temperatura promedio de los tubos
$T_{i\text{ entrada}}$	Temperatura de entrada del intercambiador	16°C	Temperatura de diseño

$T_{i\ salida}$	Temperatura de salida del intercambiador	60°C	Temperatura de diseño
-----------------	--	------	-----------------------

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(5) \quad T_s\ prom = \frac{T_{i\ entrada} + T_{i\ salida}}{2}$$

$$T_s\ prom = \frac{16^\circ\text{C} + 60^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_s\ prom = 38^\circ\text{C}$$

$$(6) \quad h_{fg}^* = h_{fg} + 0,68C_p(T_{sat} - T_s) = 205768,8859 \frac{J}{kg}$$

- Determinación del coeficiente de vapor hacia el agua (7):

Tabla 8. Cálculo del coeficiente de vapor hacia el agua

Cálculo del coeficiente de vapor hacia el agua			
$h_o = 0,729 \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg}^* * Kl^3}{\mu l * (T_{sat} - T_s) * de} \right]^{1/4}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
g	Gravedad	$9,81 \frac{m^2}{s}$	Tomado Libro Cengel
ρ_l	Densidad temperatura de película (superficie interna del tubo al contacto con el fluido)	$997 \frac{kg}{m^3}$	Tomado de tablas termodinámicas
ρ_v	Densidad de vapor a la temperatura de entrada del intercambiador	$0,796454 \frac{kg}{m^3}$	Tomado de tablas termodinámicas
Kl	Conductividad térmica temperatura de película (fluido)	$0,646 \frac{W}{m.^\circ\text{C}}$	
μl	Viscosidad dinámica a la temperatura de película (A la temperatura del vapor de salida)	$1,25713 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$	Tomado de tablas termodinámicas
de	Diámetro exterior del tubo	$0.015875 m$	Tomado según el material, Cobre

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(7) \quad h_o = 0,729 \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg}^* * Kl^3}{\mu l * (T_{sat} - T_s) * de} \right]^{1/4} = 10193,5387 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Determinación del número de Reynolds (8), así:

Tabla 9. Cálculo del número de Reynolds

Cálculo del número de Reynolds			
$Re_D = \frac{V_{max} D}{\nu}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
V_{max}	Velocidad máxima	$0,87712 \frac{m}{s}$	Referenciada
D	Diámetro del tubo	$0,0127 m$	Diámetro tubo de cobre
ν	Viscosidad cinemática	$1,004 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$	Tomada de tablas termodinámicas

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(8) \quad Re_D = \frac{\rho l V_{max} D}{\mu l} = \frac{V_{max} D}{\nu} = 11095,073$$

- Determinación del número de Nussett (9), este depende del valor del número de Reynolds con el fin de escoger la ecuación adecuada, así:

Datos obtenidos de las tablas de agua saturada a la temperatura promedio de los tubos:

$Pr = 4,34$ Número de Prandtl

$$(9) \quad NU = 0,023 * P_r^{0,4} * R_{ED}^{0,8} = 71,2571$$

- Determinación del coeficiente del agua en los tubos (11), así:

Tabla 10. Cálculo del coeficiente de agua en los tubos

Cálculo del coeficiente de agua en los tubos			
$h_i = \frac{K * NU}{D}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
K	Conductividad térmica de los tubos	$0,6366 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	Material: Cobre. Tomado Libro Holman
NU	Número de Nussett	71,2571	Adimensional
D	Diámetro del tubo	$0,0127 m$	Diámetro tubo de cobre

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(11) \quad h_i = \frac{K * NU}{D} = 3571,83 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor (12):

Tabla 11. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor			
$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
h_i	Coeficiente de agua en los tubos	$3571,83 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	Resultado
h_o	Coeficiente de vapor hacia el agua	$10193,5387 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	Resultado

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$(12) \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} = 2645,0136 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Determinación de la longitud para un solo tubo (13):

$$(13) \quad L = \frac{q_i}{\pi * D * U * LTDM} = 2,84856 m$$

Cálculo del área superficial (16) y de la longitud de los tubos (17) con los coeficientes corregidos:

- Determinación del h corregido (16), teniendo la cantidad de tubos y el número de filas deseado:

$n = 2$ Número de filas (Resultado de hacer pasos experimentales)

$$(14) \quad h = \frac{1}{n^{1/4}} * h_o$$

$$h = \frac{1}{2^{1/4}} * 10193,5387 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h = 8571,7101 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Determinación del nuevo coeficiente global de transferencia de calor (17), con el valor de h corregido encontrado anteriormente:

$$(15) \quad U_n = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h}} = 2521,23 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Determinación del área superficial:

$$(16) \quad A_s = \frac{q_i}{U_n * LTDM} = 0,11923 m^2$$

- Después de haber encontrado el área, se procede a encontrar el valor de la longitud de los tubos:

$$(17) \quad L_t = \frac{A_s}{\pi * D * n}$$

$$L_t = \frac{0,11923 m^2}{\pi * 0,0127 m * 2}$$

$$L_t = 1,49421 m = 149,42 cm$$

Es necesario realizar una aproximación de la longitud de los tubos, para tener mayor seguridad, pasando de 149,42cm a 150cm.

3.2 Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico establece las variables como la caída de presión que sufren los fluidos y asegura que se encuentre dentro de rangos permisibles para el correcto funcionamiento del equipo.

- Conexión de la salida del vapor

Principalmente es necesario encontrar el flujo másico del vapor, y para ello se debe tener en cuenta las entalpías (h_2 y h_1) que son obtenidas por tablas a la presión de diseño 20psia.

$$\dot{m}_v = \frac{q_i}{h_2 - h_1}$$

$$\dot{m}_v = \frac{20593,59 \text{ W}}{2689321,2 \text{ kPa} - 104832,82 \text{ kPa}} = 0,00797 \text{ kg/s} = 28,6853 \text{ kg/h}$$

Datos:

Diámetro externo: $d_{ae} = 1 \frac{1}{2}'' = 38,10 \text{ mm}$

Diámetro interno: $d_{ai} = 34,80 \text{ mm} = 0,0348 \text{ m}$

Espesor: $= 1,65 \text{ mm}$

$$A_a = \pi r^2$$

$$A_a = \pi * (0,0348 \text{ m} / 2)^2 = 0,00095 \text{ m}^2$$

Para determinar el diámetro adecuado de la conexión del vapor, se realiza el cálculo de la velocidad, así:

Tabla 12. Cálculo de la conexión de salida de vapor.

Cálculo de la conexión de salida de vapor			
$V_v = \frac{\dot{m}_v}{A_a \times \rho_v \times 3600}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
\dot{m}_v	Flujo másico vapor	$28,6853 \text{ kg/h}$	Calculado
A_a	Área interior del accesorio	$0,00095 \text{ m}^2$	Diámetro tubo de acero inóx. 304
ρ_v	Densidad de vapor a la temperatura de entrada del intercambiador	$0,796454 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Tomado de tablas termodinámicas

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

$$V_v = \frac{\dot{m}_v}{A_i \times \rho_v \times 3600} = 10,51837 \text{ m/s}$$

Podemos concluir que el diámetro escogido es el adecuado ya que la velocidad es menor a 30,5 m/s, por lo cual no es necesario recalcularlo.

- Cálculo de la caída de presión en la conexión de salida de vapor.

Tabla 13. Cálculo de la caída de presión en la conexión de salida de vapor.

Cálculo de la caída de presión en la conexión de salida de vapor			
$DP = \frac{(5.3954 \times 10^{-3}) \times \dot{m}_v}{\rho_v \times (d_{ai} \times 10^5)}$			
Denominación	Nombre	Valor	Observación
\dot{m}_v	Flujo másico vapor	28,6853 kg/h	Calculado
d_{ai}	Diámetro interno del accesorio	0,0348 m	Diámetro tubo de acero inóx. 304
ρ_v	Densidad de vapor a la temperatura de entrada del intercambiador	0,796454 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Tomado de tablas termodinámicas

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Formula de Gutermtuth

$$DP = \frac{(5.3954 \times 10^{-3}) \times \dot{m}_v}{\rho_v \times (d_{ai} \times 10^5)} = 1,87322$$

- Calculo de la caída de presión total.

$L_a = 0,05 \text{ m}$ Longitud del accesorio

$$DT = \frac{DP \times L_a}{30,48} = 0,00307$$

- Porcentaje de la caída de presión.

$$\% \text{Caída de presión} = \frac{DT}{P} = 0,015364\%$$

El porcentaje de la caída de presión máximo permitido es del 10%, por lo que podemos concluir que el accesorio si cumple.

3.3 Diseño Mecánico

En el diseño de un intercambiador de calor de coraza y tubos, es necesario saber que consta de un conjunto de elementos ensamblados como la coraza, las placas y los tubos, para ello cada componente se debe analizar por separado en función de las tensiones, de las fuerzas y de las deformaciones a los cuales están sometidos.

Se deben calcular los espesores de la coraza sus otros componentes. Es necesario verificar el espesor de la pared de los tubos seleccionado en el diseño térmico, posteriormente se calculan los elementos sujetos a presión y finalmente se dimensionan los elementos no sujetos a presión.

- Diseño de la coraza

La coraza es un cuerpo cilíndrico, el cual puedes ser construido de una pieza que puede ser un tubo sin costura o puede ser una placa rolada que tendrá en su interior la tubería.

$L_c = 0,9m$ Longitud de la coraza

$d_{pe} = 20,32cm$ Diámetro externo de la coraza

$d_{pi} = 197,66mm$ Diámetro interno de la coraza

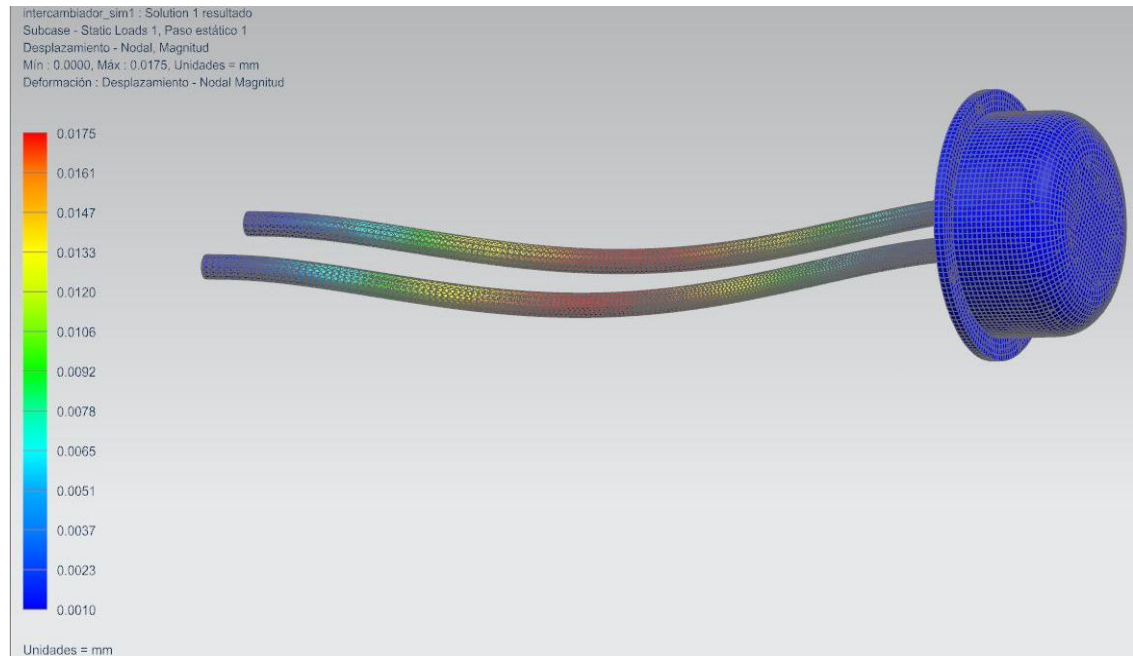
Espesor de la coraza: 2,77mm

Mediante el programa Siemens NX, se realizó la simulación del diseño del intercambiador de coraza y tubos, objeto de la tesis. Con el fin de visualizar los puntos con más críticos de los elementos del equipo y conocer su comportamiento.

A continuación, en la Figura 11 se presenta la imagen de la tubería interna del equipo, en la cual se observa la deformación máxima la cual es de 0,0175mm.

Además se puede observar mediante la barra de colores, la deformación de la tubería por puntos.

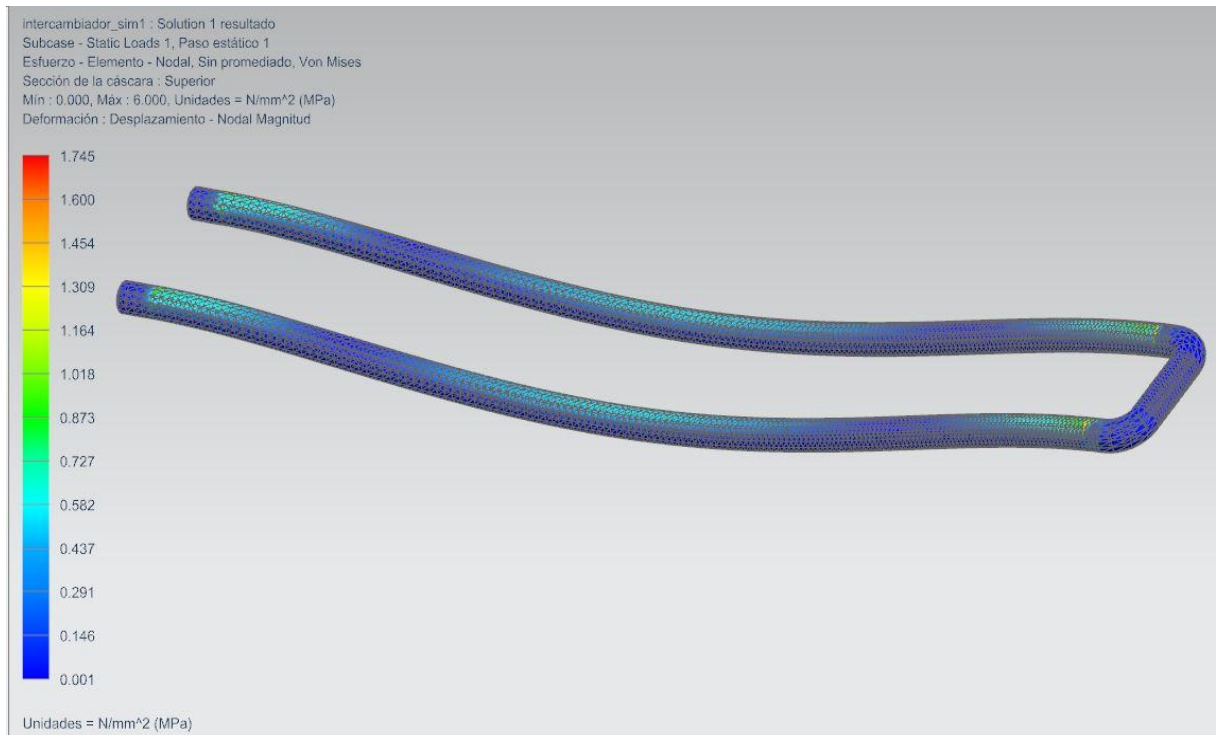
Figura 11. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos con una de las tapas”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Siemens NX versión USTA.

A continuación, en la Figura 12 se presenta la imagen de la tubería interna del equipo, en la cual se observa el esfuerzo máximo del elemento al cual puede ser sometido, el cual es de 6.000 N/mm^2 (MPa), y por ende se observa mediante la barra de colores, los puntos donde existen esfuerzos en la tubería.

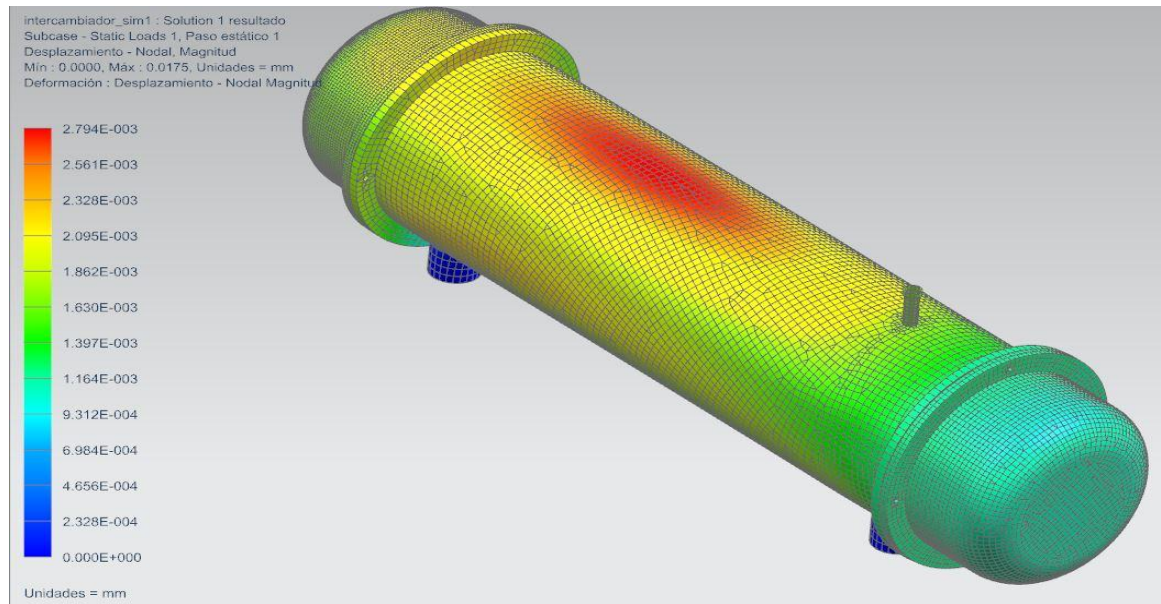
Figura 12. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Siemens NX versión USTA.

A continuación, en la Figura 13 se presenta la imagen de la carcasa del intercambiador de calor de coraza y tubos, en la cual se observa la deformación máxima, la cual es de 0,0175mm. Además se puede observar mediante la barra de colores, la deformación de la tubería en cada punto del cuerpo.

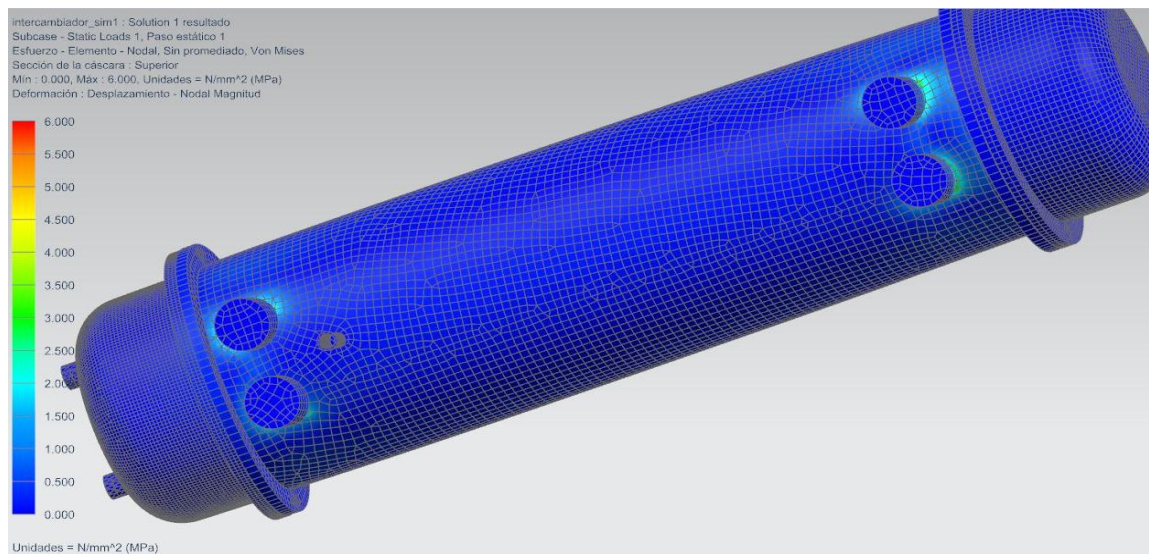
Figura 13. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Siemens NX versión USTA.

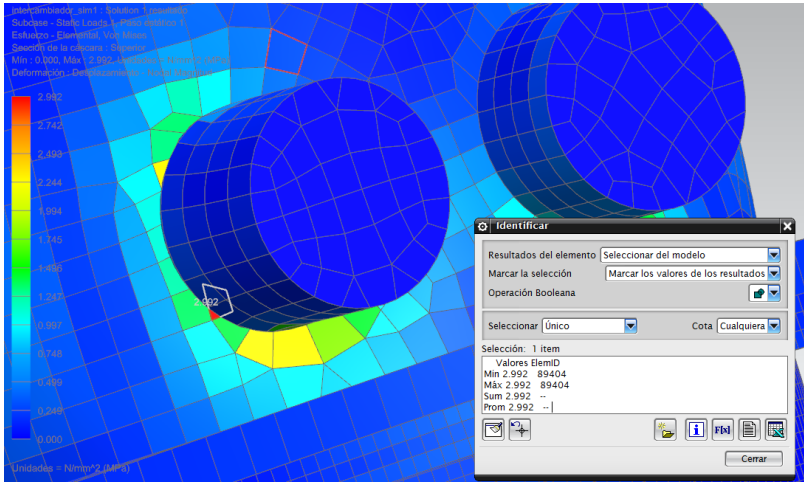
En las siguientes imágenes Figura 14 y Figura 15 se observa el esfuerzo máximo al que están sometidas las regiones aledañas a los soportes de la carcasa. El esfuerzo máximo es de 2992 N/mm^2 (MPa), y se puede apreciar mediante la barra de colores todas las diferentes magnitudes de esfuerzos que se presentan alrededor de los soportes del intercambiador

Figura 14. “Intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Siemens NX versión USTA.

Figura 15. “Vista detallada del esfuerzo en los soportes del intercambiador de calor de coraza y tubos”

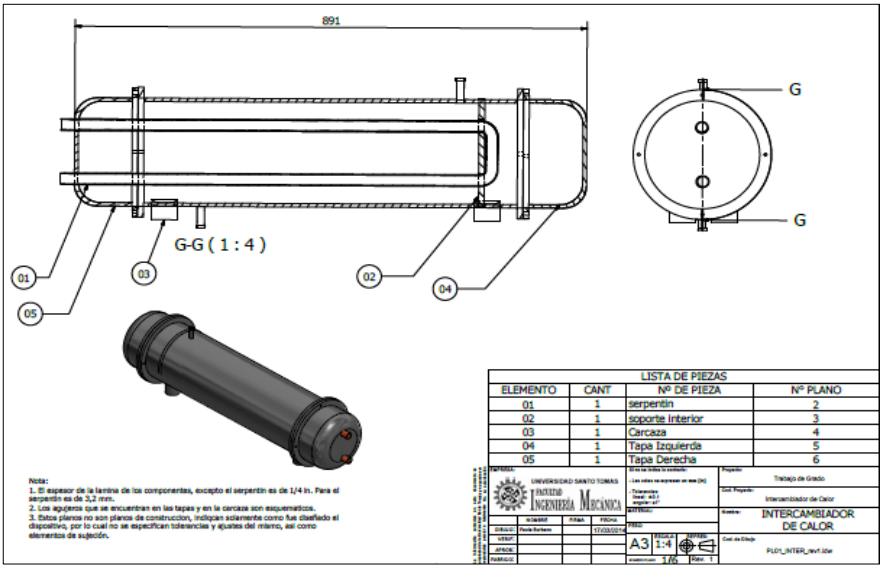


Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Siemens NX versión USTA.

3.4 Dimensiones Finales Intercambiador

En la *Figura 16* se muestra el plano de conjunto del diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos diseñado, de acuerdo a las dimensiones obtenidas de los cálculos térmicos, hidráulicos y mecánicos realizados anteriormente. En el ANEXO D se encuentran los planos de detalle de cada una de las piezas del intercambiador de calor.

Figura 16. “Plano General Intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014. Programa Inventor versión USTA.

4 RUTINA PARA EL CÁLCULO DEL INTERCAMBIADOR

En la actualidad existe un creciente interés de disponer de rutinas que permitan generar soluciones a los problemas típicos de ingeniería de forma confiable y en el menor tiempo posible. Por lo tanto es necesaria la elaboración de un programa que permita al estudiante de una manera muy didáctica y sencilla, realizar el diseño de intercambiadores de calor de coraza y tubos, corroborando el conocimiento adquirido en el aula de clase.

La elaboración de la rutina se efectuó en dos grandes etapas: Una primera en la que se montaron las hojas de cálculo elaboradas en Excel, donde se realizó toda la parte del diseño del intercambiador de calor de coraza y tubo y sus métodos empleados para realizarlo, en este caso se empleó el método de **LTDM** (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica); en la segunda etapa se construyeron las ventanas de la interfaz con el usuario y se elaboraron las rutinas de programación necesarias para la corrida del programa.

4.1 Alcance del programa

La rutina se limitará básicamente al diseño de un intercambiador de calor de tipo de coraza y tubos, los fluidos son vapor en la coraza y agua en la tubería interna, el arreglo de la tubería siempre será en U ya que para obtener algún otro tipo de arreglo es necesario estudiar las diferentes formas, ángulos y espaciamiento entre estos.

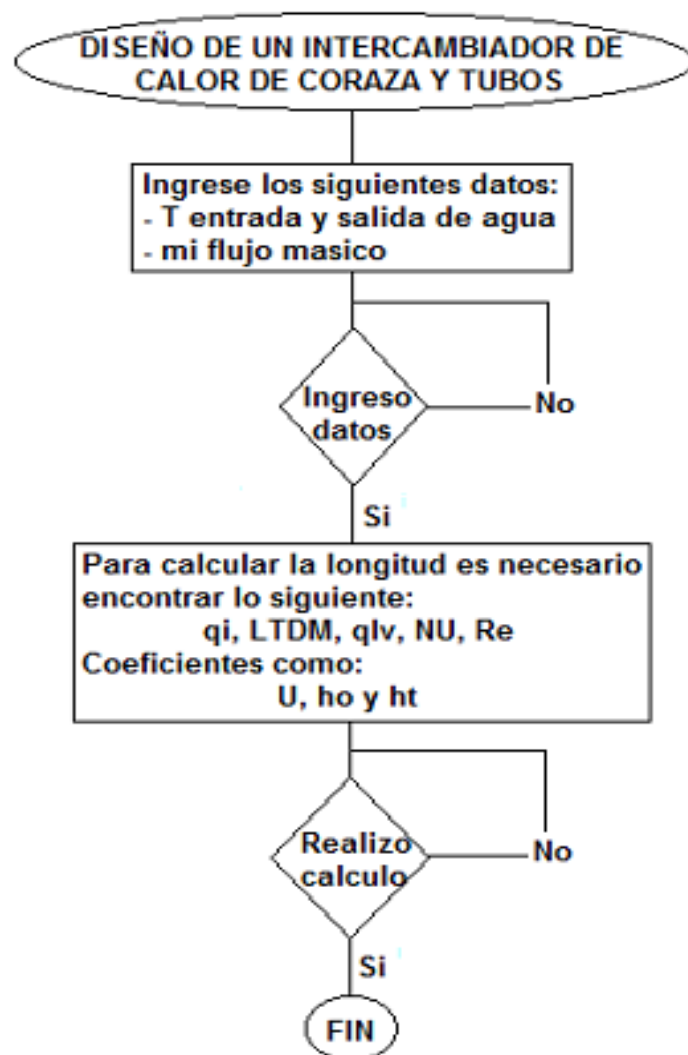
La rutina permite al estudiante ingresar los datos básicos de proceso que se requiere evaluar, con agua únicamente, que para el caso son: Temperatura de Entrada, Temperatura de Salida, y Flujo másico. Como efecto obtendrá el resultado de la longitud de la tubería en U de cobre y la longitud de la coraza en Acero Inoxidable 304 igual que las tapas del equipo.

Variables fijas dentro del programa son los fluidos y la disposición de los mismos en el intercambiador, además tenemos: temperaturas de entrada y de salida del vapor, puesto que vienen establecidas a una presión de diseño proveniente de un calderín, coeficientes de los materiales escogidos, ya que estos son los mismos siempre, la gravedad, los coeficientes de los fluidos.

4.2 Diagrama de flujo

A Continuación se presenta el diagrama de flujo que representa la estructura con la cual se desarrolló el programa didáctico para que el estudiante pueda realizar los diferentes cálculos del intercambiador de calor de coraza y tubos. Este diagrama recopila los pasos y procedimientos bajo los cuales se realizaron los cálculos desarrollados en el presente trabajo, en la parte donde se hace el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos.

Figura 17. “Diagrama de flujo”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

4.3 Interfaz del usuario

La interfaz como lo podemos observar en la Figura 18, permite al usuario ingresar y visualizar los datos básicos del proceso para obtener los resultados de las diferentes etapas de cálculo, los cuales estarán establecidos bajo las condiciones del diseño propio del intercambiador de coraza y tubos. Esta pantalla cuenta con tres opciones: Nuevo, el cual permite realizar el diseño de un nuevo intercambiador de calor de coraza y tubos, Ayuda, la cual le permite al usuario orientarse sobre como poder obtener información más específica del diseño del equipo y Salir, el cual sale completamente de la rutina.

Figura 18. “Vista al usuario de la rutina”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

A través de una pantalla amigable, llamada entrada de datos como se muestra en la Figura 19 el estudiante ingresará o modificará la información, esta pantalla cuenta con tres opciones, la primera es el botón Defecto, el cual ingresa los datos que fueron el resultado de éste trabajo de grado, el segundo es el botón de Calcular, el cual realiza los cálculos respectivos y por último el botón de Volver, el cual regresa al usuario a la pantalla de inicio “Intercambiador de calor de coraza y tubos”.

Figura 19 “Vista al usuario al ingresar los datos”

Entrada de Datos

Variables

Temperatura Entrada: 16 (C°)

Temperatura Salida: 60 (C°)

Flujo Masico: 0,11078 (Kg/s)

Calcular Defecto Volver

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Después de oprimir el botón Calcular, la rutina genera una nueva pantalla llamada Resultados como se puede observar en la Figura 20, la cual finalmente genera los datos de las longitudes de la coraza y de la tubería respectivamente.

Figura 20 “Vista al usuario con los resultados”

Resultados

Resultados

Longitud de Tubos (m): 0,747118 Aprox 0,75

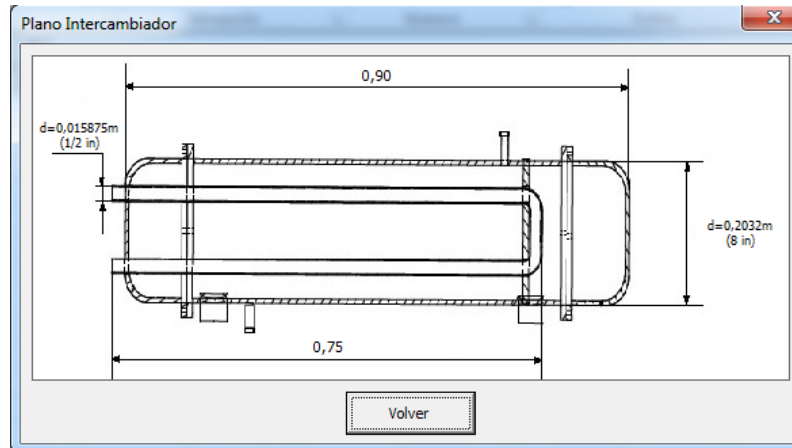
Longitud de Coraza (m): 0,897118 Aprox 0,90

Imagen Volver

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Finalmente la rutina genera una pantalla llamada Imagen, como lo muestra la Figura 21, la cual genera el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos, con sus respectivas cotas.

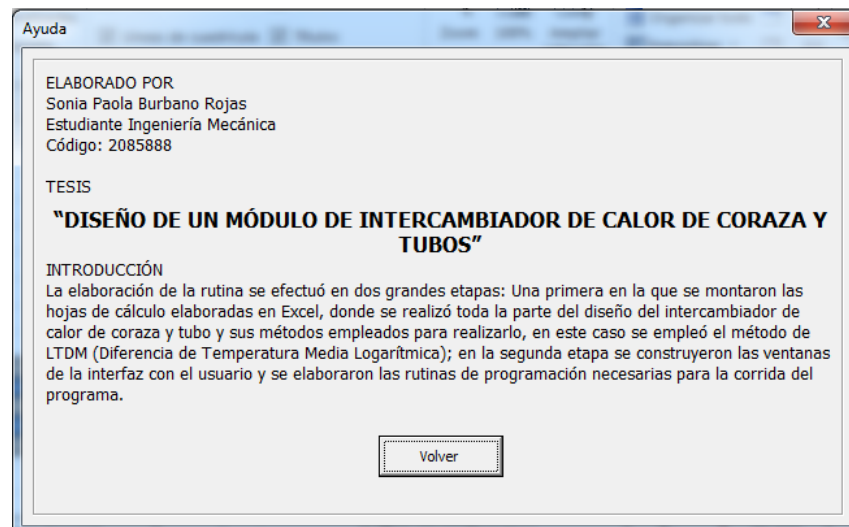
Figura 21 “Vista al usuario con el plano”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

El usuario, también encontrará un botón de ayuda, como se observa en la Figura 22, en el cual se presentan algunos datos del alcance de la rutina y muestra los datos de la tesis, por si quiere tener más información acerca del diseño del intercambiador de coraza y tubos.

Figura 22 “Vista al usuario con ayuda”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

5 GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

A continuación se plantean 3 guías de laboratorio, las cuales fueron desarrolladas para la aplicación del intercambiador de coraza y tubos diseñado, con la finalidad de que el estudiante pueda afianzar los conocimientos adquiridos en el aula de clase, para las áreas de ciencias térmicas como son: transferencia de calor, termodinámica y plantas térmicas.

Como base fundamental de la adquisición de conocimientos es indispensable que el alumno pueda visualizar y comprobar que la información y los ejercicios planteados en la temática de transferencia de calor como: convección y conducción, son totalmente prácticos y aplicables a la industria; además de las áreas de termodinámica y de plantas térmicas, ya que son muy importantes en la adquisición de conocimientos del estudiante.

Las guías prácticas de laboratorio pueden desarrollarse cuando se realice la fabricación del intercambiador de calor de coraza y tubos, ya que este puede ser objeto de otro trabajo de grado.



Identificación de los tipos de transferencia de calor

5.1 Guía 1. Identificación de los tipos de transferencia de calor

La práctica se desarrolla con el fin de que el estudiante afiance y fortalezca los conocimientos aprendidos en el aula de clase, en el tema: “Tipos de transferencia de calor”.

Objetivo General

- Identificar los diferentes tipos de transferencia de calor involucrados en el proceso del intercambiador de calor de coraza y tubos, desarrollado para el laboratorio de ciencias térmicas.

Objetivos Específicos

- Identificar los fluidos involucradas en el proceso de transferencia de calor del equipo.
- Identificar los diferentes tipos de transferencia de calor presentes en el equipo y realizar los cálculos necesarios.
- Analizar las características del equipo en cuanto a los tipos de transferencia de calor y sacar conclusiones de acuerdo a lo aplicado.

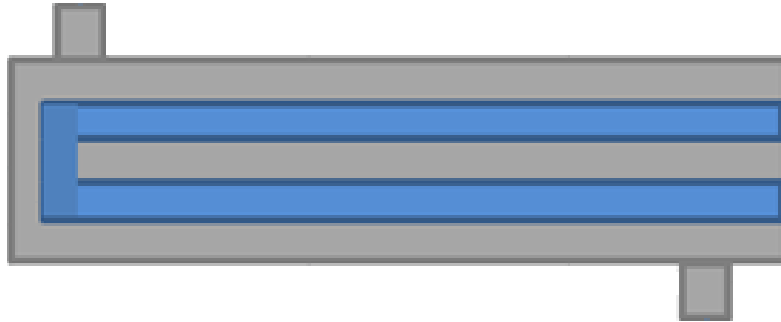
Materiales o recursos requeridos

- Intercambiador de calor de coraza y tubos
- Regla
- Documentos bibliográficos

Desarrollo de la guía

1. En el intercambiador de calor de coraza y tubos (Figura 23) se involucran dos fluidos. En el siguiente esquema identifique cuales son los fluidos y la dirección de ellos, investigue las principales cuatro características térmicas involucradas en el proceso con sus respectivas unidades y regístrelas en el siguiente cuadro.

Figura 23. “Intercambiador de coraza y tubos”



Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

Tabla 14. Características térmicas.

Fluido	Características Térmicas			
	1	2	3	4

Fuente: Esta investigación, elaboración propia 2014.

A continuación de una breve explicación del porque considera que las características térmicas seleccionadas están involucradas en el proceso de transferencia de calor.

2. Identifique los diferentes tipos de transferencia de calor presentes en el equipo y/o proceso y realice un esquema donde muestre sus hallazgos y explique el resultado.
3. Realice el cálculo de calor dependiendo los tipos de transferencia de calor encontrados en el equipo.
 - Calor por conducción
 - Calor por convección
 - Calor por radiación

4. Realice un análisis de las características del equipo en cuanto a los tipos de transferencia de calor:
 - Materiales
 - Disposición de los fluidos dentro del equipo
 - Formas geométricas
5. Concluya cuales son los tipos de transferencia de calor y de las definiciones.
6. Que pudo comprobar y observar de la práctica de laboratorio, de acuerdo a lo aprendido en clase.

Herramientas para la solución de la guía:

- Si considera que hay conducción realice los siguientes cálculos:

Ley de Fourier de la conducción de calor:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Dónde:

k : Conductividad térmica del material

A : Área normal a la dirección del flujo

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura

- Si considera que hay convección realice los siguientes cálculos:

Ley de Newton de enfriamiento:

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (W/m^2)$$

O bien,

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

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_s : Área superficial de transferencia de calor (m^2)

T_s : Temperatura de la superficie ($^\circ C$)

T_{∞} : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie ($^\circ C$)



Determinación de la conducción y la convección

5.2 Guía 2. Determinación de la conducción y la convección

La guía práctica ayudara al estudiante a fortalecer los conocimientos del área relacionados con los tipos de transferencia de calor, como lo son: la conducción y la convección a través de una tubería cilíndrica al contacto con vapor y agua.

Objetivo General

- Reconocer la aplicación de la conducción y la convección presentes en el proceso del intercambiador de calor de coraza y tubos como parte de una tubería cilíndrica al contacto con vapor y agua.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar los diferentes tipos de resistencia presentes en el proceso de transferencia de calor del intercambiador de coraza y tubos.
- Realizar los cálculos necesarios para encontrar las resistencias térmicas existentes en el equipo.
- Realizar un análisis descriptivo y sacar conclusiones de acuerdo a lo aplicado.

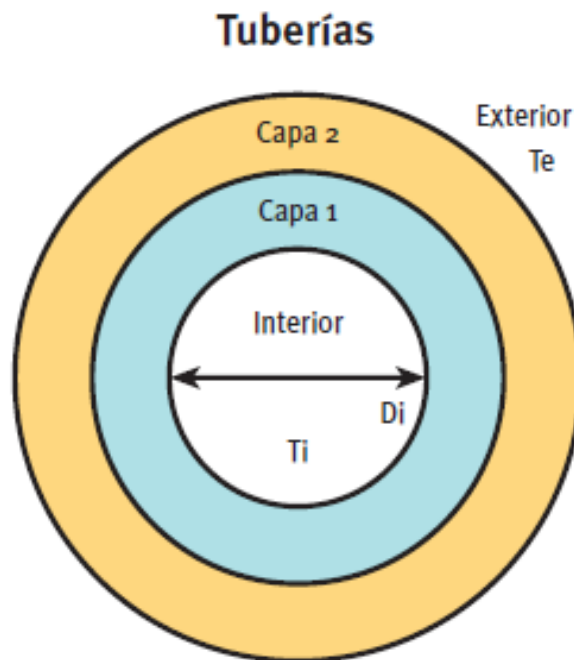
Materiales requeridos

- Intercambiador de calor de coraza y tubos.
- Termómetro

Desarrollo de la guía

1. Identifique y caracterice los tipos de resistencias presentes en el proceso de transferencia de calor (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en el intercambiador de calor de coraza y tubos, el cual involucra dos fluidos: vapor y agua; a través de un esquema represente los tipos de resistencia que considere importantes en el proceso de transferencia de calor.

Figura 24. “Formas genéricas de intercambio de calor”



Fuente: Guía Técnica. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

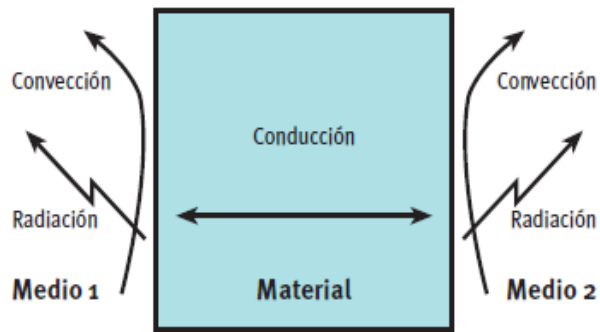
2. Realice los cálculos necesarios para determinar las resistencias presentes en el proceso de transferencia de calor del intercambiador de coraza y tubos.

Es importante tener en cuenta: la longitud de la tubería interna y de la coraza, el espesor de ambos elementos, la conductividad térmica de cada material y las temperaturas a las cuales se encuentran las superficies. Tenga presente que dependiendo del tipo de transferencia de calor es necesario aplicar ciertas formulas.

3. Realice un análisis descriptivo y saque conclusiones de acuerdo a lo aplicado y aprendido.

Herramientas para la solución de la guía:

Figura 25. “Formas genéricas de intercambio de calor”

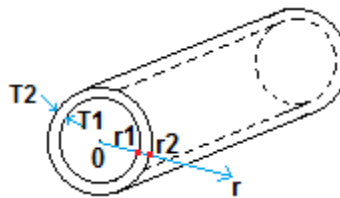


Fuente: Guía Técnica. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

- Si considera que hay conducción realice los siguientes cálculos:

*Para una resistencia térmica de una capa cilíndrica (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):*

Figura 26. “Tubería interna del intercambiador de calor de coraza y tubos”



Fuente: Esquema elaborado en Paint.

$$R_{cond-cilíndrica} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k}$$

Dónde:

r_1 : Radio interno

r_2 : Radio externo

k : Conductividad térmica del material

- Si considera que hay convección realice los siguientes cálculos:

Para una resistencia térmica de una capa cilíndrica:

$$R_{conv-cilíndrica} = \frac{1}{2\pi r h_{conv}}$$

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

- Las superficies interiores de la tubería se encuentran prácticamente a la misma temperatura y por lo que uno de los fluidos en un gas (vapor), la transferencia de calor por radiación es nula.

$$q/H = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\sum_{capas\ material} \frac{\ln(r_{i+1}/r_1)}{2\pi k_i} + \frac{1}{2\pi r_{int} h_{conv, int}}} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{total\ cilíndricas}}$$



Estudio del funcionamiento del intercambiador de calor de coraza y tubos

5.3 Guía 3. Estudio del funcionamiento del intercambiador de calor de coraza y tubos

Esta práctica se realiza con el fin de que el estudiante afiance y fortalezca los conocimientos aprendidos en clase. El desarrollo de esta práctica permitirá que el estudiante comprenda el funcionamiento de un intercambiador, cuales son las variables así como sus cálculos, vistos en el área de termodinámica.

Objetivo General

- Realizar un estudio del funcionamiento del intercambiador de calor de coraza y tubos.

Objetivos Específicos

- Determinar el caudal del fluido frío que será utilizado en el equipo.
- Verificar las temperaturas de los fluidos frío y caliente.
- Aprender a calcular el intercambio de calor del equipo.
- Realizar un análisis y sacar conclusiones de acuerdo a lo aplicado.

Materiales requeridos

- Intercambiador de calor de coraza y tubos
- Termómetro
- Cronometro

Desarrollo de la guía

1. Determine el caudal del fluido frío que será utilizado en el equipo, puede hacerlo ubicando un balde a la salida del agua y registrando el tiempo que tarda en llenar cierto volumen. Registre los datos obtenidos.
2. Realice un registro de las temperaturas de los fluidos frío y caliente en la siguiente tabla.

	T entrada (°C)	T salida (°C)
Fluido frío		
Fluido caliente		

3. Realice el cálculo de q_i Calor requerido en el proceso de intercambio de Calor
4. Realizar un análisis y sacar conclusiones de acuerdo a lo aplicado. (Si lo considera necesario realice esquemas)
5. Para realizar el cálculo del intercambio de calor presente en el equipo, es necesario tener en cuenta el cálculo del área, de la velocidad y del flujo másico, posteriormente se halla en calor.
6. Realizar un análisis y sacar conclusiones de acuerdo a lo aplicado.

Herramientas para la solución de la guía:

Para realizar el cálculo del intercambio de calor presente en el equipo, es necesario tener en cuenta el cálculo del área, de la velocidad y del flujo másico, posteriormente se halla en calor.

Caudal:

$$Q = V * A$$

Diferencia de temperaturas del fluido frío:

$$\Delta T_i = T_{i \text{ salida}} - T_{i \text{ entrada}}$$

Flujo másico:

$$\dot{m}_i = \rho * V * A$$

Calculo del calor:

$$q_i = \dot{m}_i * Cp * \Delta T_i$$

6 CONCLUSIONES

- El intercambiador de calor de coraza y tubos diseñado nos sirve como un elemento didáctico, ya que emplea dos fluidos altamente utilizados como lo son el agua y vapor, ayudando al estudiante a fortalecer y afianzar los conocimientos teóricos en las materias de ciencias térmicas.
- El aplicativo desarrollado en Excel apoya asertivamente la parte experimental planteada en el presente proyecto, ya que ayuda a visualizar al estudiante sobre las dimensiones que tendrá el intercambiador de calor de coraza y tubos.
- Las guías de prácticas de laboratorio cumplen con el fin de que el estudiante desarrolle diferentes habilidades de cálculo a partir de datos reales y experimentales, fortaleciendo los conocimientos de las materias de ciencias térmicas como: transferencia de calor, termodinámica y maquinas térmicas.

7 RECOMEDACIONES

- Se sugiere que el presente proyecto de grado se tome como punto de partida para que nuevos estudiantes puedan desarrollar proyectos didácticos como la fabricación de un intercambiador de coraza y tubos planteados, así como diferentes equipos complementarios del área de transferencia de calor fundamentales para el laboratorio de ciencias térmicas.
- El diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos se realizó con fines didácticos y no industriales, por lo cual su uso se debe dar estrictamente en las aulas de laboratorio, por consiguiente su utilización debe estar acompañado de un docente.
- Es necesario realizar diseños donde se empleen diferentes arreglos de la tubería, teniendo en cuenta la angularidad y en número de tubos internos que tendrá el equipo.
- De acuerdo a las guías presentadas en el presente proyecto, una vez el equipo se fabrique, se recomienda la elaboración de las mismas, ya que afianzaran los conocimientos aprendidos en clase.

BIBLIOGRAFIA

BASTILLA PINTO, O.J. Diseño y construcción de un intercambiador de calor para prácticas de laboratorio, tesis, Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Bogotá, 2011.

BISWAS, A, K. DAVENPORT, W, G. El cobre Metalurgia extractiva. Primera edición: 1993, México: Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores, 1993, p. 17.

CENGEL, Yunus A. Termodinámica, sexta edición, México D.F: Mcgraw Hill, 2009. p. 244.

CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor, segunda edición, México: Mcgraw Hill, 2004.

CAMERON HYDRAULIC DATA, STEAM DATA. 1996

CUADRADO MAZON, Karina Cecilia, Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas de la facultad de Mecánica, tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba (Ecuador), Facultad de Mecánica, 2010.

DONALD Q, Kern. Procesos de Transferencia de Calor, Vigésima séptima reimpresión, México: Mcgraw Hill, 1995. p. 86.

Guía Técnica. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

HENRIQUEZ TOLEDO, R. La corrosión en el cobre y sus aleaciones, tesis, Universidad de Antofagasta, Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica.

HOLMAN, J. P. Transferencia de Calor, México, Editorial Continental, 1995.

KERN, Donald Q. Procesos de Transferencia de calor. Vigésima séptima reimpresión, México: Mcgraw Hill, 1995.

MALISHEV, A. NIKOLAIV, G. SHUVALOV, Y. Tecnología de los metales, Octava reimpresión, México: Editorial Limusa S.A de C.V. Grupo Noriega Editores, 1994.

MARTINEZ, M.T., Torres, E., SOTO, J.A. Evaluación de Intercambiadores de Calor Compactos de Tubos Aletados, en Universidad de Guanajuato, Inst. de Investigaciones Científicas, México.

MARTINEZ TUDON, J. C., MORALES MENENDEZ, R., RAMIREZ MENDOZA, R. A., GARZA CASTAÑON, L. E., VARGAS MARTINEZ, A. Detección de fallas en un intercambiador de calor, análisis comparativo entre análisis de componentes principales dinámico y observadores de diagnóstico, en SCielo. México. 2011.

MEGYESY, E. F. Pressure Vessel Handbook. Oklahoma: Pressure vessel publishinc, doceava edición. 1977.

NORMA TEMA. STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION. 25 North Broadway Tarrytown, New York 10591. Richard C. Byrne, Secretary.

REYES RODRIGUEZ, M. B., MOYA RODRIGUEZ, J. L., CRUZ FONTICIELLA, O. M., FIRVIDA DONESTEVEZ, E. D., VELAZQUEZ PEREZ, J. A. Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante el método de Taborek, en Universidad Central de las Villas, Ingeniería Mecánica. Cuba. 2014. P. 78 – 89.

ROCHA CAMINO, G. E., RANGEL JARA, H. A. Dimensionamiento de intercambiadores de calor de coraza y tubos, con ayuda de computador. En Ingeniería e Investigación, Volumen 3 N° 4, Trimestre 4-1985. P. 43-52.

ROMERO MENDEZ, R., ADAME, R., SEN, M. Estudio de los parámetros que afectan la transferencia de calor conjugada en intercambiador de calor de tubos y placas-aleta, en SCielo, Interciencia. Caracas. 2001.

NEELY, Jhon E. Metalurgia y materiales industriales, Primera Reimpresión, México: Limusa Noriega Editores, 2000.

PALOMINO MASCO, Joel Fernando. Modelamiento experimental del intercambiador de calor de Tubos y Carcasa de Längerer, Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima, 2010.

PERE, Molera Solá. Metales resistentes a la corrosión. Impreso en España, Marcombo S.A. 1990.

SOTO CRUZ, Juan José. Fundamentos sobre ahorro de energía. Capítulo 1.

WELTY, James R. Transferencia de Calor aplicada a la ingeniería. México, Editorial Limusa, 1996.

Fuentes de referencias de páginas web

I.L.S.A. en http://www.industrial-lima.com.pe/web/index.php?option=com_content&view=article&id=85:que-es-caldera&catid=44 (Consultado en Febrero de 2014)

Guía Técnica. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Antolog%C3%A1Da_Termodin%C3%A1mica.pdf

<http://www.tododeinoxidable.com/Productos/Tuberia/tabid/118/Default.aspx>

<http://www.tododeinoxidable.com/Portals/0/Catalogos/TABLA-DE-DIMENSIONES-de-tuberia-sanitaria.pdf>

http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Antolog%C3%A1Da_Termodin%C3%A1mica.pdf

<http://www.inglesa.com.mx/books/DYCIC.pdf>

Fuentes de las figuras:

CUADRADO MAZON, Karina Cecilia. Tesis. Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para laboratorio de térmicas la facultad de mecánica.

Guía Técnica. Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

www.kalfrisa.com/intercambiadoresdecalor.aspx

<http://www.tranter.com/Pages/productos/calor-de-placas/descripcion-y-beneficios.aspx?langcode=es-es>

<http://www.refrigeracionindustrial.com/cgi-bin/RRI.pl?s=a&a=print&id=10>

<http://www.hgservitec.es/d1/catalegdetall.php?idp=2>

<http://www.cobreglobal.com/PRODUCTOS/TUBERIA/TUBERIA-L.aspx>

PROGRAMAS

Programa Excel.

Programa NX, Versión USTA.

Programa Inventor. Versión USTA.

ANEXOS

ANEXO A Tablas del material empleado en la tubería interna

Diámetro Nominal	Diámetro Exterior		Espesor de Pared	Espesor	Peso Teórico	Presión de Trabajo
pulg.	pulg.	mm	pulg.	mm	kg/m	Psi a 38°C
1/4	3/8	9,52	0,032	0,81	0,199	1350
3/8	1/2	12,70	0,035	0,89	0,295	1195
1/2	5/8	15,87	0,040	1,02	0,424	1105
5/8	3/4	19,05	0,042	1,07	0,539	965
3/4	7/8	22,22	0,045	1,14	0,677	875
1	1 1/8	28,57	0,050	1,27	0,975	770
1 1/4	1 3/8	34,92	0,055	1,40	1,316	680
1 1/2	1 5/8	41,27	0,060	1,52	1,687	630
2	2 1/8	53,97	0,070	1,78	2,604	555
2 1/2	2 5/8	66,67	0,080	2,03	3,691	520
3	3 1/8	79,37	0,090	2,29	4,956	490
3 1/2	3 5/8	92,07	0,100	2,54	6,384	470
4	4 1/8	104,77	0,110	2,79	8,006	450

ANEXO B Tablas del material empleado en los accesorios



TABLA DE DIMENSIONES DE TUBERÍA SANITARIA

DIMENSIONES DE TUBERÍA SANITARIA Y ORNAMENTAL							
Diámetro Nominal	Diámetro Externo		Diámetro Interno		Espesor de pared		
	pulg	mm	Pulg.	mm	Cal. BWG	Pulg	mm
1/2"	0.500"	12.70	0.370"	9.40	16	0.065"	1.65
3/4"	0.750"	19.05	0.620"	15.75	16	0.065"	1.65
1"	1.000"	25.40	0.870"	22.10	16	0.065"	1.65
1 1/2"	1.500"	38.10	1.370"	34.80	16	0.065"	1.65
2"	2.000"	50.80	1.870"	47.50	16	0.065"	1.65

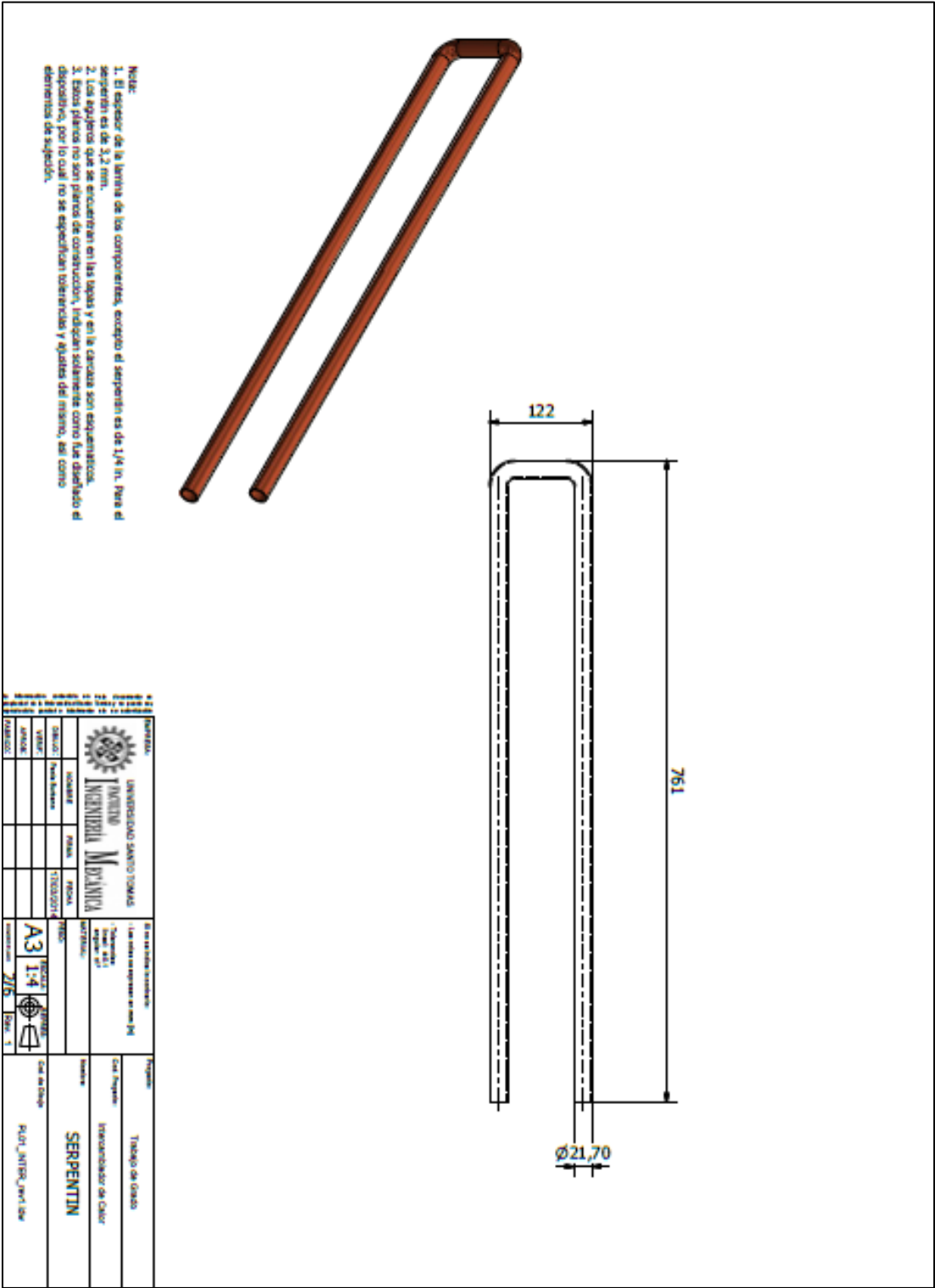
ANEXO C Tablas del material empleado en la coraza

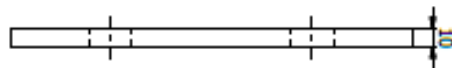
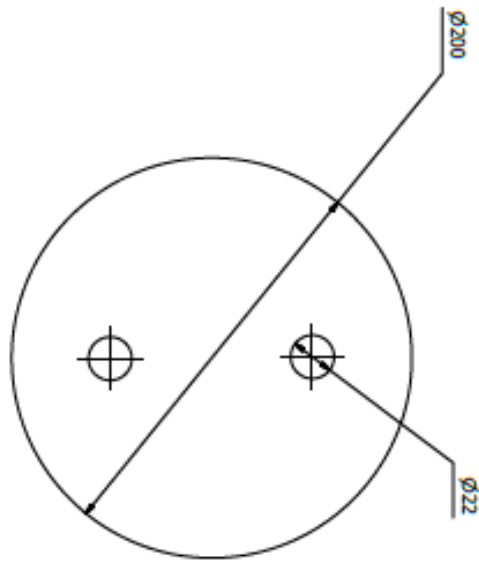


TABLA DE DIMENSIONES DE TUBERÍA SANITARIA


DIMENSIONES DE TUBERÍA SANITARIA Y ORNAMENTAL							
Diámetro Nominal	Diámetro Externo		Diámetro Interno		Espesor de pared		
	pulg	mm	Pulg.	mm	Cál. BWG	Pulg	mm
1/2"	0.500"	12.70	0.370"	9.40	16	0.065"	1.65
3/4"	0.750"	19.05	0.620"	15.75	16	0.065"	1.65
1"	1.000"	25.40	0.870"	22.10	16	0.065"	1.65
1 1/2"	1.500"	38.10	1.370"	34.80	16	0.065"	1.65
2"	2.000"	50.80	1.870"	47.50	16	0.065"	1.65
2 1/2"	2.500"	63.50	2.370"	60.20	16	0.065"	1.65
3"	3.000"	76.20	2.870"	72.90	16	0.065"	1.65
4"	4.000"	101.60	3.834"	97.38	14	0.083"	2.11
6"	6.000"	152.40	5.782"	148.86	12	0.109"	2.77
8"	8.000"	203.20	7.782"	197.66	12	0.109"	2.77

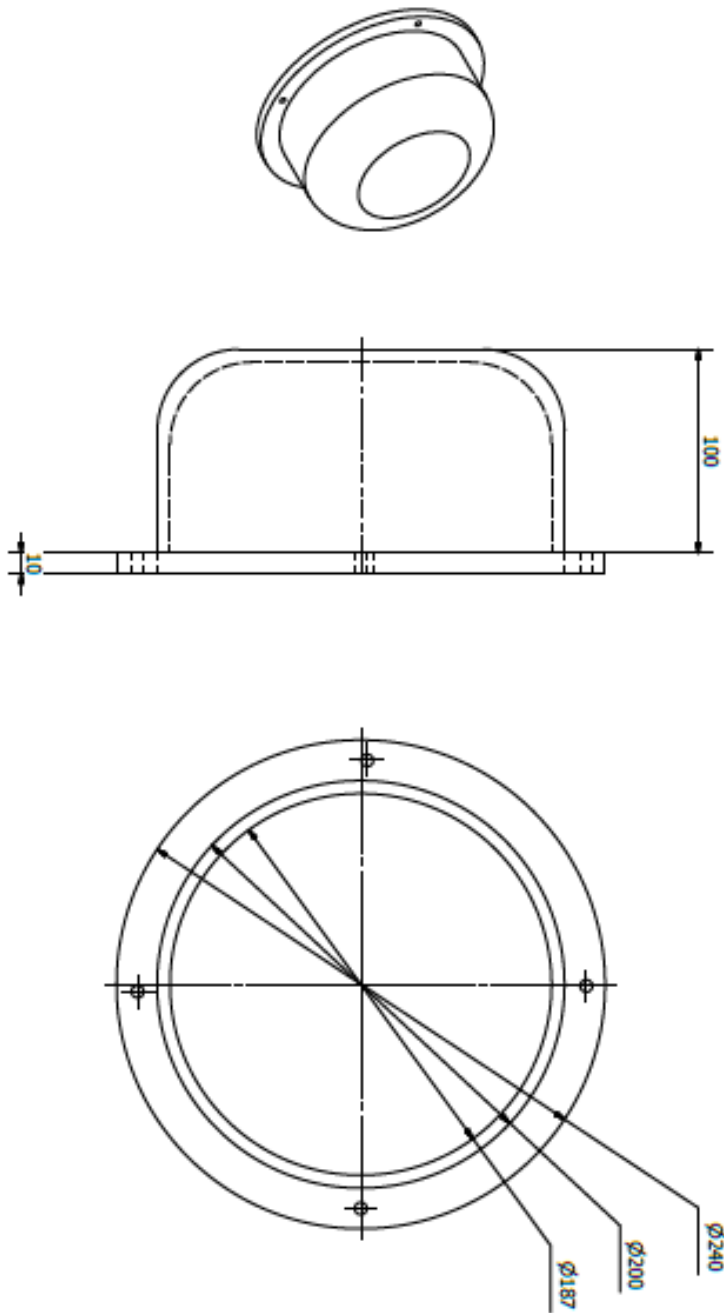
ANEXO D Planos del intercambiador de calor de coraza y tubos





- Nota:**
1. El espesor de la lamina de los componentes, excepto el serpentín es de 1/4 in. Para el serpentín es de 3,2 mm.
 2. Los agujeros que se encuentran en las bases y en la carcasa son esquemáticos.
 3. Estos planos no son planos de construcción, indican solamente como fue diseñado el dispositivo, por lo cual no se especifican tolerancias y ajustes del mismo, así como elementos de sujeción.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS Facultad de Ingeniería Mecánica		Hoja 1 de 1 Caricador de Calor	
Nombre PULI, JHON, Juan David	Apellido PULI, JHON, Juan David	Matrícula 316	Fecha 17/03/2017
Curso 316		Asignatura 316	
Proyecto 316		Temática 316	
Trabajo de Grado 316		Temática 316	



- Nota:**
1. El espesor de la lamina de los componentes, excepto el serpentín es de 1/4 in. Para el serpentín es de 3/2 mm.
 2. Los agujeros que se encuentran en las tapas y en la carcasa son esquadrados.
 3. Estos planos no son planos de construcción, indican solamente como fue diseñado el dispositivo, por lo cual no se especifican tolerancias y ajustes del mismo, así como elementos de sujeción.

 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS Facultad de Ingeniería Mecánica		Proyecto: Tubo de Grubo Tema: Intercambiador de Calor	
Nombre: IZQUIERDA Apellido: TAPA Matrícula: 171032071	Fecha: 17/03/2017 Hora: 10:00 Lugar: Salón de Clase	Escala: 1:1 Formato: A3 Tipo: 1	Calificación: 5/6 Fecha: 1

ANEXO E

Lenguaje de la rutina en Excel

frmPresentacion



```
Private Sub lblAyuda_Click()  
Me.Hide  
frmAyuda.Show  
End Sub
```

```
Private Sub lblNuevo_Click()  
Me.Hide  
frmEntrada.Show  
End Sub
```

```
Private Sub lblSalir_Click()  
End  
End Sub
```

frmAyuda

Ayuda

ELABORADO POR
Sonia Paola Burbano Rojas
Estudiante Ingeniería Mecánica
Código: 2085888

TESIS

"DISEÑO DE UN MÓDULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS"

INTRODUCCIÓN

La elaboración de la rutina se efectuó en dos grandes etapas: Una primera en la que se montaron las hojas de cálculo elaboradas en Excel, donde se realizó toda la parte del diseño del intercambiador de calor de coraza y tubo y sus métodos empleados para realizarlo, en este caso se empleó el método de LTDM (Diferencia de Temperatura Media Logarítmica); en la segunda etapa se construyeron las ventanas de la interfaz con el usuario y se elaboraron las rutinas de programación necesarias para la corrida del programa.

Volver

```
Private Sub btnRegresar_Click()  
Me.Hide  
frmPresentacion.Show  
End Sub
```

frmEntrada

Entrada de Datos

Variables

Temperatura Entrada: (C°)

Temperatura Salida: (C°)

¿Cuanta agua necesita calentar y en cuenta tiempo desea calentarla?

Flujo Masico: (Kg/s)

Defecto Calcular Volver

```
Private Sub btnCalcular_Click()  
If (txtTempE.Text = "" Or txtTempS.Text = "" Or txtFlujoM.Text = "") Then  
MsgBox "Los campos no pueden estar vacios.", vbCritical, "Error en la Entrada  
de Datos"  
Exit Sub  
End Sub
```

```

End If
If (Cdbl(txtTempE.Text) >= Cdbl(txtTempS.Text)) Then
    MsgBox "El Valor de la Temperatura de Entrada debe ser menor que el de Salida.", vbCritical, "Error en la Entrada de Datos"
    Exit Sub
End If
If (Cdbl(txtTempE.Text) < 5 Or Cdbl(txtTempE.Text) > 60) Then
    MsgBox "El Valor de la Temperatura de Entrada debe tener un rango [5,60].", vbCritical, "Error en la Entrada de Datos"
    Exit Sub
End If
If (Cdbl(txtTempS.Text) < 40 Or Cdbl(txtTempS.Text) > 100) Then
    MsgBox "El Valor de la Temperatura de Salida debe tener un rango [40,100].", vbCritical, "Error en la Entrada de Datos"
    Exit Sub
End If
If (Cdbl(txtFlujoM.Text) < 0.09 Or Cdbl(txtFlujoM.Text) > 5) Then
    MsgBox "El Valor del Flujo Masico debe tener un rango [0.09,5].", vbCritical, "Error en la Entrada de Datos"
    Exit Sub
End If
Cells(8, 19).Value = txtTempE.Text
Cells(17, 19).Value = txtTempS.Text
Cells(37, 7).Value = txtFlujoM.Text
frmSalida.lblLTN.Caption = Format((Cells(106, 3).Value / 2), "##0.000000")
frmSalida.lblLCN.Caption = Format(Cdbl(frmSalida.lblLTN.Caption) + 0.15, "##0.000000")
frmSalida.lblLTA.Caption = Format((Cells(106, 3).Value / 2), "##0.00")
frmSalida.lblLCA.Caption = Format(Cdbl(frmSalida.lblLTN.Caption) + 0.15, "##0.00")
Me.Hide
frmSalida.Show
End Sub

Private Sub btnDefecto_Click()
txtTempE.Text = 16
txtTempS.Text = 60
txtFlujoM.Text = 0.11078
End Sub

Private Sub btnRegresar_Click()
Me.Hide
frmPresentacion.Show
End Sub

```

```

Private Sub txtFlujoM_KeyPress(ByVal KeyAscii As MSForms.ReturnInteger)
'Accepts only numeric input
Select Case KeyAscii
    Case vbKey0 To vbKey9
    Case vbKeyBack, vbKeyClear, vbKeyDelete
    Case vbKeyLeft, vbKeyRight, vbKeyUp, vbKeyDown, vbKeyTab, 44
    Case vbKeyDecimal
    Case Else
        KeyAscii = 0
        Beep
End Select
End Sub

```

```

Private Sub txtTempE_KeyPress(ByVal KeyAscii As MSForms.ReturnInteger)
'Accepts only numeric input
Select Case KeyAscii
    Case vbKey0 To vbKey9
    Case vbKeyBack, vbKeyClear, vbKeyDelete
    Case vbKeyLeft, vbKeyRight, vbKeyUp, vbKeyDown, vbKeyTab
    Case Else
        KeyAscii = 0
        Beep
End Select
End Sub

```

```

Private Sub txtTempS_KeyPress(ByVal KeyAscii As MSForms.ReturnInteger)
'Accepts only numeric input
Select Case KeyAscii
    Case vbKey0 To vbKey9
    Case vbKeyBack, vbKeyClear, vbKeyDelete
    Case vbKeyLeft, vbKeyRight, vbKeyUp, vbKeyDown, vbKeyTab
    Case Else
        KeyAscii = 0
        Beep
End Select
End Sub

```

frmSalida

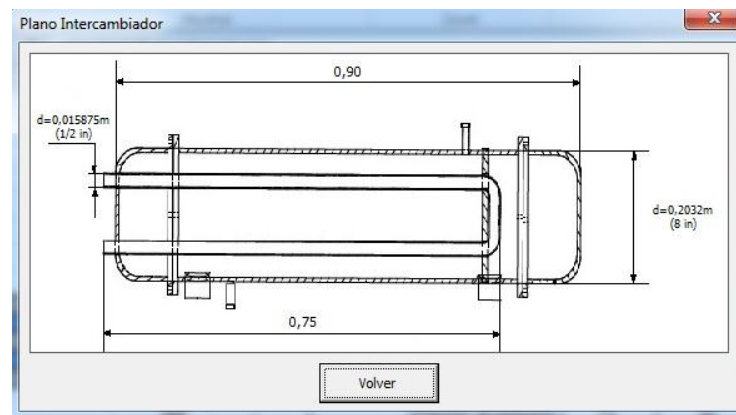
Resultados		Aprox
Longitud de Tubos (m):	0,747118	0,75
Longitud de Coraza (m):	0,897118	0,90

Imagen Volver

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
frmImagen.IblITA.Caption = IblITA.Caption  
frmImagen.IblICA.Caption = IblLCA.Caption  
Me.Hide  
frmImagen.Show  
End Sub
```

```
Private Sub btnVolver_Click()  
Me.Hide  
frmEntrada.Show  
End Sub
```

frmImagen



```
Private Sub btnVolver_Click()  
Me.Hide  
frmSalida.Show  
End Sub
```