



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA SIGUIENDO LA NORMA TEMA, ASME Y EL MÉTODO LMTD, IMPLEMENTADO EN UN BANCO DIDÁCTICO PARA PRUEBAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER, REGIONAL BARRANCABERMEJA

AUTORES

DIANA PATRICIA COLMENARES VELANDIA-28215511
LIVY ELIZABETH COLMENARES VELANDIA-1099364358
LINDA VALERI DELGADO DÍAZ-1096233307

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER SEDE BARRANCABERMEJA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA
FECHA DE PRESENTACIÓN: 28-10-2019**



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA SIGUIENDO LA NORMA TEMA, ASME Y EL MÉTODO LMTD, IMPLEMENTADO EN UN BANCO DIDÁCTICO PARA PRUEBAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER, REGIONAL BARRANCABERMEJA

AUTORES

DIANA PATRICIA COLMENARES VELANDIA-28215511
LIVY ELIZABETH COLMENARES VELANDIA-1099364358
LINDA VALERI DELGADO DÍAZ-1096233307

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA**

DIRECTOR

MSc. Ing Qca. LEIDYS MARLEYN RODRÍGUEZ CASTRO

CODIRECTOR

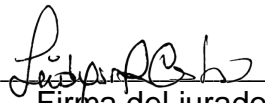
MSc. Ing. Mecatrónico ALEXIS LÓPEZ FIGUEROA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN – DIANOIA

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA**

FECHA DE PRESENTACIÓN: 28-10-2019

Nota de Aceptación


Firma del jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Dedico la culminación de esta meta, primero a Dios, en segundo lugar, a mis padres, Pablo y Olga, mis hermanos, Juan Pablo, Livy Elizabeth, Paola Andrea y Olga Maritza, así como a mis sobrinos y demás familiares

Dedico el alcanzar esta meta en mi vida profesional, a mis familiares y amigos, a mis compañeros de trabajo, a mis compañeros de aventuras académicas y a mis estudiantes, que ven en mi dedicación un ejemplo a seguir y a superar.

A mis compañeras del trabajo de grado, por los trasnochos y el trabajo en equipo desarrollado.

Diana Patricia Colmenares Velandia.

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres Pablo Colmenares y Olga Velandia, a mis hermanos, Diana, Juan, Paola, Maritza, mis sobrinos, David, Andrés, Cristopher y Nicolás y demás familiares ya que con su amor, paciencia y comprensión me han ayudado cuando más los necesitaba.

A mi amigo y compañero Ing. Jairo Alberto Bautista, que dedico tiempo, sabiduría, paciencia y esfuerzo para ayudarme a culminar este logro.

A mis compañeras de proyecto Linda y mi hermana Diana, con quienes con esfuerzo y dedicación sacamos adelante este trabajo.

Y finalmente, tanto a los compañeros que colaboraron en la elaboración de este trabajo, como a quienes hicieron parte de mi formación como ingeniera electromecánica, por todas y cada una de las vivencias compartidas.

Livy Elizabeth Colmenares Velandia

DEDICATORIA

La victoria y aprobación de este proyecto es gracias a DIOS y es a Él quien dedico en primera estancia este logro alcanzado para mi vida profesional.

También dedico este logro:

A mi madre Rosa Díaz por su carácter, disciplina, amor y constante apoyo.

A mi hermano Oskar Delgado por su apoyo incondicional, su paciencia, por la sabiduría que me ha dado para haber emprendido este camino, su fe y sus ganas de que yo hubiera alcanzado este triunfo.

A mi hermana Wendy Delgado por su compañía, apoyo y confianza.

A mi sobrino Samuel, por llenarme de alegría con su nacimiento.

A mi amigo y compañero Gustavo Serrano y familia, que dedicaron tiempo, sabiduría, paciencia y esfuerzo para ayudarme a culminar este logro.

A cada una de mis compañeras, Diana y Livy por el aporte que pusimos para lograr la realización de este proyecto.

Y a todas las personas que nos apoyaron y colaboraron en el camino de la carrera y proyecto: los compañeros de clases, los profesores, los directivos de la UTS sede Barrancabermeja, el personal administrativo y de servicios generales.

Linda Valeri Delgado Díaz

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarnos salud y templanza para trazarnos una meta y seguir el camino que nos llevaría a alcanzarla.

A todos nuestros familiares, parejas y amigos, que nos han acompañado en todos los momentos dulces y no tan dulces de nuestras vidas. Han sido y seguirán siendo los motores que hacen que despertemos, trabajemos y nos preparemos para una mejor calidad de vida.

A la MSc. Ing Qca. Leidys Marley Rodríguez Castro, directora de este proyecto, al MSc. Ing. Mecatrónico Alexis López Figueroa, codirector, y MSc. Darío Rincón Quintero, por ser guías de este trabajo y enriquecernos con sus conocimientos y orientaciones.

A las Unidades Tecnológicas de Santander, sede Barrancabermeja, por brindarnos la oportunidad de formarnos como ingenieras electromecánicas.

Al ornamentador Orlando Mercado, quien con sus conocimientos nos orientó para lograr los objetivos propuestos en el trabajo de grado, dedicando con agrado tiempo y paciencia para con nosotras, al igual que al ingeniero Jorge Luis Palencia, quien con su destreza en el manejo del software SOLIDWORKS nos ayudó a culminar este trabajo.

A Freddy Gómez, Eliecer Villalobos y Pedro Rico, quienes, con el previo trabajo hecho sobre diseño de intercambiadores de calor, fueron base y guía para el nuestro.

A nuestro laboratorista, Juancho, quien nos brindó su confianza y colaboración para llevar a cabo el proyecto.

A todos los profesores, quienes con sus enseñanzas nos han ayudado para formarnos como profesionales.

Finalmente, a los compañeros, quienes compartieron con nosotras este camino en nuestra formación como ingenieras electromecánicas, haciéndonos reír y colaborándonos cuando así lo necesitábamos, colmándonos de buenos y gratos recuerdos

DIANA, LIVY Y LINDA

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES	18
2. MARCOS REFERENCIALES	23
2.1. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1.1. INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	23
2.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	24
2.1.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CARCASA	31
2.1.4. COMPONENTES BÁSICOS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CARCASA	36
2.1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CORAZA Y TUBO	52
2.1.6. MÉTODOS DE DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CARCASA	62
2.2. MARCO LEGAL.....	63
2.2.1. NORMAS DE UN INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CARCASA.....	64
2.3. MARCO CONCEPTUAL	68
2.4. MARCO AMBIENTAL.....	72
2.4.1. REGLAMENTO TÉCNICO DE CALDERAS Y RECIPIENTES DE CALOR, LEY 9ª DE 1987.72	
2.4.2. MINISTERIO DEL TRABAJO Y DE MINAS Y ENERGÍA. BORRADOR REGLAMENTO TÉCNICO DE CALDERAS Y RECIPIENTES DE CALOR. RESOLUCIÓN 2014. 73	
3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	75
3.1. METODOLOGÍA	75
3.2. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN	80
3.2.1. DISEÑO TÉRMICO.....	80
3.2.2. DISEÑO HIDRÁULICO	83
3.2.3. DISEÑO MECÁNICO	86
3.2.4. SUMINISTRO DE LOS FLUIDOS	89
3.2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	91

3.3. ETAPA 2: PARAMETRIZACIÓN DEL BANCO GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	104
3.3.1. PARÁMETROS INICIALES.....	104
3.4. ETAPA 3: DESARROLLO DEL DISEÑO TÉRMICO, HIDRÁULICO Y MECÁNICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CORASA.....	107
3.4.1. DESARROLLO DEL DISEÑO TÉRMICO.....	107
3.4.2. DESARROLLO DEL DISEÑO HIDRÁULICO.....	114
3.4.3. DESARROLLO DEL DISEÑO MECÁNICO.....	117
3.4.4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.....	122
3.5. ETAPA 4: MODELAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	124
3.5.1. USO DEL SOFTWARE ASPEN ONE.....	124
3.5.2. USO DEL SOFTWARE CAD SOLIDWORKS.....	125
3.6. ETAPA 5: CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	125
<u>4. RESULTADOS.....</u>	<u>127</u>
4.1. RESULTADOS DEL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR, USANDO EL MÉTODO LMTD.....	127
4.1.1. DATOS DE LOS FLUIDOS.....	127
4.1.2. DISEÑO TÉRMICO Y DISEÑO MECÁNICO.....	128
4.1.3. DISEÑO HIDRÁULICO.....	129
4.2. RESULTADOS DEL SOFTWARE ASPEN ONE.....	130
4.3. RESULTADOS DEL SOFTWARE CAD SOLIDWORKS.....	141
4.4. CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	145
<u>5. CONCLUSIONES.....</u>	<u>154</u>
<u>6. RECOMENDACIONES.....</u>	<u>155</u>
<u>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>156</u>
<u>8. ANEXOS.....</u>	<u>159</u>

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Intercambiador de Calor de Flujo en Paralelo.....	26
Imagen 2. Intercambiador de Calor de Flujo en Contracorriente.	27
Imagen 3. Intercambiador de Calor de Flujo Cruzado.	27
Imagen 4. Intercambiadores de Paso Simple o Paso Múltiple.....	28
Imagen 5. Intercambiadores de Calor Regenerativos y No Regenerativos.....	30
Imagen 6. Partes de un intercambiador de calor de Coraza y Tubo.....	31
Imagen 7. Nomenclatura TEMA.....	35
Imagen 8. Componentes de un intercambiador de calor de coraza y tubos.	36
Imagen 9. Disposición de los tubos.....	38
Imagen 10. Tipos de Coraza.....	39
Imagen 11. Cabezal tipo bonete.	41
Imagen 12. Corte de un deflector.....	46
Imagen 13. Posicionamiento de los baffles en la coraza.....	46
Imagen 14. Barras de soporte.....	47
Imagen 15. Espejo para un haz de tubos.....	48
Imagen 16. Bridas y ubicación de las bridas.	50
Imagen 17. Tipos de boquillas.	51
Imagen 18. Intercambiador de tubos en U.	53
Imagen 19. Haz de tubos.....	54
Imagen 20. Intercambiador de cabezal fijo.....	57
Imagen 21. Haz de tubos.....	58
Imagen 22. Placa porta tubo.....	60
Imagen 23. Intercambiador de cabezal flotante.....	61
Imagen 24. Diagrama para el dimensionamiento de un intercambiador de calor.	78
Imagen 25. Placa bomba STANPROF.....	90
Imagen 26. Placa bomba pEDROLLO.....	91
Imagen 27. Dimensiones brida Lap Joint / Lapped (loca) 300 lb ANSI B16.5.....	120
Imagen 46. Correlación para el coeficiente de transferencia de calor del lado de la carcasa.	161
Imagen 47. Factor de transferencia de calor, lado carcasa.....	162

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de coraza.....	40
Tabla 2. Aplicaciones comunes de los cabezales estacionarios.....	41
Tabla 3 Aplicaciones comunes de los cabezales posteriores	44
Tabla 4. Parametrización inicial	105
Tabla 5. Datos iniciales para el desarrollo del diseño.....	106
Tabla 6. Normas y esfuerzos mínimos de los componentes del intercambiador de calor	117
Tabla 7. Características del posible material de la tubería	123
Tabla 8. Características físicas de la tubería seleccionada	123
Tabla 9. Datos de entrada para el modelamiento del diseño.....	124
Tabla 10. Resumen de los parámetros iniciales	127
Tabla 11. Resultados diseño térmico y mecánico	128
Tabla 12. Resultados diseño hidráulico.....	129
Tabla 13. Resultados del Software ASPEN ONE.....	130
Tabla 14. Diagramas de diseño generado por ASPEN ONE	138
Tabla 15. Piezas modeladas en CAD SOLIDWORKS.....	141
Tabla 16. Ensamblaje del intercambiador en CAD SOLIDWORK	144
Tabla 17. Comparación entre los diseños obtenidos y la construcción del intercambiador	145
Tabla 18. Evidencia fotográfica de la construcción del intercambiador de calor.	148
Tabla 19. Instalación del Intercambiador de Calor.	151
Tabla 20. Número de pasos por la carcasa según el tipo de intercambiador de calor y la selección del diámetro de la carcasa	159
Tabla 21. Valores estándar (pulgadas) para el espesor del deflector en intercambiadores de calor de clase R *	160
Tabla 22. Espesores tubería acero al carbono Diámetros nominales 8 in a 24 in	163

RESUMEN EJECUTIVO

En el desarrollo de este proyecto, se diseñó y construyó un intercambiador de calor de tubo y coraza de doble paso siguiendo la norma TEMA y el método LMTD, para usarse en un banco didáctico para pruebas de transferencia de calor en las unidades tecnológicas de Santander, regional Barrancabermeja.

La metodología dada por el LMTD fue la utilizada, puesto que este método facilita la utilización de programas de computadora para realizar el diseño.

Para el desarrollo de esta investigación se siguieron las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica.
2. Parametrización del banco global de transferencia de calor.
3. Desarrollo del diseño térmico, hidráulico y mecánico.
4. Modelamiento del intercambiador.
5. Construcción del intercambiador de calor.
6. Elaboración del informe final.

La puesta en marcha de estas etapas nos permite alcanzar la entrega modelada y física del intercambiador de calor de coraza y tubo, en concordancia a los cálculos realizados y consignados en este informe final que contiene el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubo, el modelamiento del diseño y las conclusiones obtenidas, de tal modo que sirva para poner en marcha el banco global de transferencia para pruebas de laboratorio, lo que permita que los estudiantes puedan afianzar sus conocimientos en esa área.

PALABRAS CLAVE. Intercambiador, TEMA, ASME, LMTD, Transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

En una de las aulas de las Unidades Tecnológicas de Santander, Regional Barrancabermeja, reposa un Banco Global de Transferencia de Calor (Naranjo, Portilla, & John, 2014) que no ha sido usado debido a que falta poner en marcha algunos de los elementos, entre ellos, un intercambiador de calor de tubo y coraza. En el desarrollo de este proyecto se podrá encontrar la respectiva literatura en la que se sustenta el diseño térmico, mecánico e hidráulico de un intercambiador de calor de este tipo, fundamentado en la aplicación de la norma TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1999), en la norma ASME (ASME, 2001), el método de diseño Diferencia de Temperatura Media Logarítmica LMTD (Kern D. Q., 1999), con la descripción de los respectivos cálculos.

La necesidad de poner en funcionamiento dicho banco para realizar pruebas de termodinámica, de transferencia de calor y de máquinas hidráulicas impulsó la ejecución de este proyecto, permitiendo realizar una mejora significativa en el proceso de transferencia de calor usando este tipo de intercambiador.

Además, se podrá encontrar el modelamiento del intercambiador usando el software ASPEN ONE, con los resultados arrojados por este y los respectivos dibujos utilizando el software CAD SOLIDWORKS.

Después, se encuentra la descripción de la construcción de la máquina, así como su implementación en el Banco Global.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Regional de las Unidades Tecnológicas de Santander ubicada en la ciudad de Barrancabermeja recibió un banco global para el estudio de la transferencia de calor. Dicho banco cuenta con diferentes sistemas, implementados para controlar diversas variables involucradas en la transferencia de calor.

Dentro del banco hay un intercambiador de calor de coraza y tubos, cuya coraza fue elaborada en acrílico, de manera tal que se puede observar el proceso llevado a cabo dentro de este. Ciertos componentes del intercambiador no fueron elaborados en material inoxidable, de manera que, al darle uso con agua, este material se oxidó, manchando la coraza. Al presentarse esta situación, el objetivo didáctico del banco global en esa parte, se pierde, pues al realizar las prácticas no se puede observar lo que sucede, además del arrastre de partículas que pueden terminar por dañar el sistema de bombas instalado.

De acuerdo a lo anterior, se formula la pregunta ¿cómo diseñar y construir un intercambiador de calor de tubo y coraza siguiendo la norma TEMA, ASME y el método LMTD, para implementarlo en un banco didáctico ya construido para pruebas de transferencia de calor en las Unidades Tecnológicas de Santander, regional Barrancabermeja?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El perfil del Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico y el Ingeniero Electromecánico que se encuentra en la página web de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS, 2018), contempla que el egresado de estos programas será capaz de controlar y supervisar máquinas eléctricas, industriales, hidráulicas y térmicas, e instalaciones industriales de media y baja tensión, seleccionar, instalar, controlar, operar y diseñar sistemas térmicos e hidráulicos en procesos industriales. Para que se dé cumplimiento a esto, el graduado debe tener fuertes bases teóricas y prácticas de cada uno de los conceptos vistos durante su paso por las diferentes asignaturas en la universidad.

En la Regional UTS Barrancabermeja se cuenta con la concepción teórica en las asignaturas Transferencia de calor, Termodinámica y Mecánica de Fluidos, pero no se cuenta con el debido proceso práctico. Esto se trató de solucionar con el desarrollo del trabajo de investigación titulado Implementación de un intercambiador de calor de coraza y tubos conformando un banco global de transferencia para pruebas de laboratorio en las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja (Caballero Tapias, Pardo Gómez, & Sánchez Tobón, 2017), aunque cierto material usado para la construcción del intercambiador de tubo y coraza que hace parte del banco global se óxido al realizar las pruebas usando agua, lo que contribuyó a manchar el intercambiador de tubo y coraza, hecho en acrílico. Este y otros factores, han contribuido a que el banco no se pueda poner en funcionamiento y cumplir los objetivos para los cuales fue construido.

De acuerdo a lo anterior, la presente propuesta plantea realizar el diseño, modelamiento y la construcción del intercambiador de calor de tubo y coraza que pertenece al banco global de pruebas. Lo anterior permitirá solucionar una parte de

los inconvenientes presentados en la puesta en marcha del banco y permitirá que las autoras del proyecto pongan en práctica la sustentación teórica adquirida durante el desarrollo del programa académico.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un intercambiador de calor de tubo y coraza siguiendo la norma TEMA y el método LMTD, para usarse en un banco didáctico para pruebas de transferencia de calor en las unidades tecnológicas de Santander, regional Barrancabermeja.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el estado del banco global de transferencia para pruebas de laboratorio ubicado en las Unidades Tecnológicas de Santander Regional Barrancabermeja y recopilar la información pertinente al diseño y construcción de un intercambiador de calor de coraza y tubo.
- Realizar el diseño térmico, hidráulico y mecánico de un intercambiador de calor de coraza y tubos teniendo como base la parametrización dada por el banco didáctico para pruebas de transferencia de calor ubicado en la UTS regional Barrancabermeja, aplicando el método LMTD y la norma internacional TEMA.
- Modelar el diseño obtenido, usando el software de CAD SOLIDWORK y ASPEN ONE.
- Construir el intercambiador de calor a partir del diseño realizado, teniendo en cuenta la norma ASME.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Puesto que este proyecto tiene como fin diseñar y construir un intercambiador de calor de tubo y coraza siguiendo la normas TEMA, ASME y el método LMTD, para implementarlo en un banco didáctico que ya se encuentra construido para pruebas de transferencia de calor en las Unidades Tecnológicas de Santander, y que debido a su uso y a los materiales con los que fue construido se deterioró, es importante hacer referencia a los trabajos implicados en la construcción de este banco para realizar los cambios y mejoras pertinentes, además de su importante información en las investigaciones mencionadas más adelante, pero también para el aprovechamiento de los conocimientos de quienes ya han realizado diseños de intercambiadores de calor bajo esta norma y bajo este método.

Se resalta que se han desarrollado muchas investigaciones de diseño y construcción de intercambiadores de calor para una variedad de aplicaciones tanto para la refinación de petróleo, así como industrias químicas que han permitido mejorar la operación, los costos de producción y operatividad y la seguridad en los procesos, también se han desarrollado proyectos orientados a necesidades académicas, entre estas investigaciones se encuentran las siguientes:

- Diseño Y Modelamiento De Un Intercambiador De Calor De Tubo Y Carcasa Bajo La Normativa TEMA Y ASME (Villalobos, Lopez, & Gómez, 2017).

El desarrollo de este proyecto de investigación tuvo como finalidad proporcionar el diseño de un intercambiador de calor de tubos y carcasa a las Unidades Tecnológicas de Santander regional Barrancabermeja. En ese documento se planifica el tiempo y los pasos necesarios para la realización del diseño y el modelamiento del mismo bajo las normas que

rigen este tipo de investigaciones, cumpliendo con los estándares legales y ambientales. De igual forma, se detallan cada uno de los resultados esperados mediante la realización de la investigación.

- Implementación de un intercambiador de calor de coraza y tubos conformando un banco global de transferencia para pruebas de laboratorio en las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja. (Caballero, Pardo, & Sánchez, 2016)

En el proyecto se expone el diseño y la construcción de un intercambiador de calor de coraza y tubo. El resultado de la investigación es un módulo o banco global, en el que se pueden realizar pruebas para determinar la transferencia de calor global entre dos fluidos a diferentes temperaturas. El proyecto se basa en la construcción bajo las normas internacionales TEMA (Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor Tubulares y la norma (ASME) división VIII, la cual es la encargada de regular el funcionamiento de recipientes bajo presión, con el fin de verificar y garantizar el buen funcionamiento del equipo, dándole cumplimiento a normas internacionales.

- Implementación de un intercambiador de calor de coraza y tubos para pruebas de laboratorio en las unidades tecnológicas de Santander (Naranjo, Portilla, & John, 2014).

Este proyecto tuvo como objetivo abastecer al laboratorio de máquinas térmicas de las Unidades Tecnológicas de Santander, de un equipo de pruebas de tal manera que sea capaz de intercambiar energía por transmisión de calor mediante dos fluidos de diferente temperatura, y que sirva como complemento de aprendizaje a los estudiantes del área

térmica de tal manera que se pueda comprender de una manera más ilustrativa y eficiente las teorías de la transferencia de calor.

Con el equipo de pruebas y siguiendo las recomendaciones, limitaciones y condiciones de las normas internacionales TEMA, ANSI B16.21 y el código ASME sección VIII, DIV 1, las cuales ayudan en el diseño, en la construcción y en la selección de materiales y componentes del Intercambiador de calor de coraza y tubos. Este está diseñado para trabajar con fluidos fríos y calientes, bajo un intervalo de temperaturas y presiones establecidas.

El intercambiador se construyó utilizando como soporte el software de diseño computarizado de Solidworks, así como la integración de los conocimientos de distintas áreas de la ingeniería, como lo son el diseño de máquinas, transferencia de calor y procesos de manufactura.

- Diseño Térmico y Mecánico de Intercambiadores de Calor de Casco y Tubo (Fonseca Picón & Riveros Vargas, 2009).

Este proyecto tuvo como objetivo el desarrollo de un software de diseño térmico y mecánico de intercambiadores de calor de casco y tubos con la finalidad de suministrarle a la escuela de ingeniería mecánica de la UIS, una herramienta informática que permitiera tanto el diseño térmico como mecánico de intercambiadores de coraza y tubos, teniendo en cuenta las normas ASME y las recomendaciones TEMA utilizadas para su diseño; en este proyecto se integraron varias herramientas informáticas que usualmente se trabajan de manera independiente como MATLAB para programar el diseño térmico y mecánico, y SOLIWORKS para los planos, los cuales facilitaron la integración de texto, imágenes y gráficos para un mejor entendimiento.

- Verificación del Diseño Mecánico y Análisis Financiero de los Intercambiadores de Calor Programados para la Reposición del 2012 en la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol (Pérez Moreno, 2012).

En el desarrollo de este proyecto se verificó el diseño mecánico y análisis financiero de los intercambiadores de calor programados para la reposición del 2012 en la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol. Este proyecto muestra los cambios que se presentan en el diseño mecánico al implementar nuevas metalurgias y así prever el impacto que ello genere, brindando mayor seguridad, eficiencia y confiabilidad en los cambios planteados. La verificación del diseño mecánico se realizó mediante el software de análisis y diseño de recipientes a presión PVElite y CodeCalc, dicho análisis se llevó a cabo en 16 intercambiadores en base a la norma ASME sección VIII división 1 y TEMA, también fueron sometidos a un análisis financiero (costo/beneficio) presupuestando la pérdida de producción que traería la no reposición del equipo o su mantenimiento metalúrgico.

- Diseño Térmico e Hidráulico de un Intercambiador de Coraza y Tubos. (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

Es un proyecto de grado con la realización de un diseño térmico e hidráulico de un intercambiador de coraza y tubos como recomendación para la refinería Talara en Perú, con colaboración de la industria ACERO DE LOS ANDES, donde analizaron los tipos de procesos de la refinería de los cuales lo más destacados fueron el calentamiento de crudo utilizando crudo reducido o producto de fondo de la torre destilación atmosférica, por lo cual se recomendó y selecciono un intercambiador tipo

AES , otro proceso importante escogido fue la generación de vapor de agua en cual se utilizó gasóleo mediano de vacío (MVGO) como fluido de calentamiento , por tal motivo este proceso permite el cambio de fase del agua y a la vez el enfriamiento de la corriente de gasóleo, por el cual se seleccionó un intercambiador tipo AKT.

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. MARCO TEÓRICO

La rama de la física denominada termodinámica establece la teoría y las leyes que permiten calcular la cantidad de calor que de un sistema pasa a otro, por medio de un proceso, y no hace relevancia a cuánto tiempo se demora esto. En ingeniería a menudo el interés se centra en la velocidad de esta transferencia, así, se puede definir la transferencia de calor como el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a temperatura diferente. El calor se puede transferir mediante tres procesos, a saber: conducción, convección o radiación. Los anteriores procesos pueden tener lugar simultáneamente, aunque puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

Una de las máquinas donde se pueden analizar procesos de transferencia de calor son los intercambiadores de calor, tema que ocupa esta propuesta de investigación.

2.1.1. INTERCAMBIADORES DE CALOR

De forma concreta, Jaramillo O. A. define un intercambiador de calor como un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.

- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. Se debe tener en mente que el calor sólo se transfiere en una dirección, del fluido con mayor temperatura hacia el fluido con menor temperatura. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separa (Jaramillo O. A., 2007).

2.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Un equipo de intercambio de calor es el que transfiere energía térmica desde una fuente o fluido de mayor temperatura hacia un fluido de menor temperatura generalmente con ambos fluidos moviéndose a través del equipo. Esta transferencia puede realizarse por contacto directo entre fluidos o a través de una pared que separa la fuente de transmisión y el fluido o fluidos (Fonseca Picón & Riveros Vargas, 2009).

Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son muy variadas y reciben diferentes nombres:

- **Condensador:** Son enfriadores cuyo propósito es eliminar el calor latente.

- **Enfriador:** Reduce la temperatura de un fluido generalmente por medio de agua.
- **Calentador:** Aplica calor sensible a un fluido.
- **Rehervidor:** Conectado a la base de una torre fraccionadora proporciona calor de re-ebullición que se necesita para la destilación.
- **Vaporizador:** Un calentador que vaporiza parte del líquido.

Hay diferentes tipos de intercambiadores de calor por lo cual existen varias maneras de clasificar los equipos de transferencia de calor, pero las más comunes son las que a continuación se anuncian:

- Intercambiadores de calor según la trayectoria de los fluidos.
- Intercambiadores de calor según su función.
- Intercambiadores de calor según sus características de construcción.

A continuación, se explican cada una de estas clasificaciones:

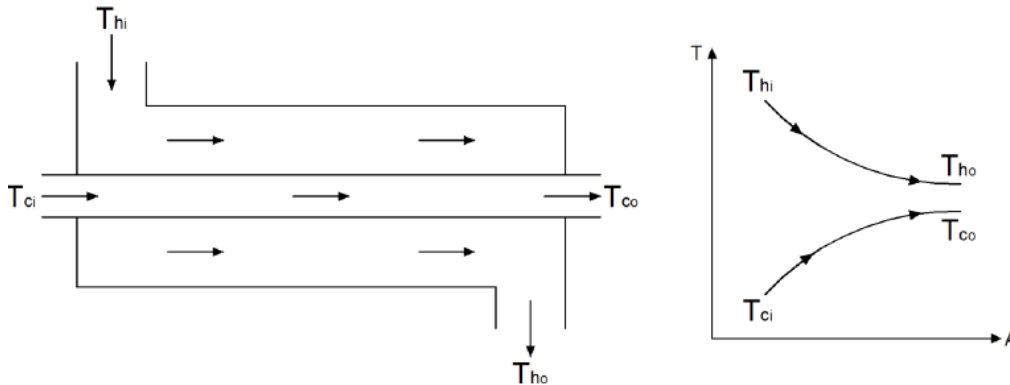
2.1.2.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR SEGÚN TRAYECTORIA DE LOS FLUIDOS

De acuerdo a la trayectoria que tienen los fluidos que intervienen en los procesos de los equipos de intercambio de calor pueden clasificarse así (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012):

- **Intercambiadores de flujo en paralelo:** Como lo ilustra la Imagen 1, existe un flujo en paralelo cuando el flujo interno y externo fluyen en la misma dirección y sentido. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador de calor por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de calor significativa. La temperatura de los fluidos se aproxima una de la otra, es

decir que uno disminuye su temperatura y el otro aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Se debe tener claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

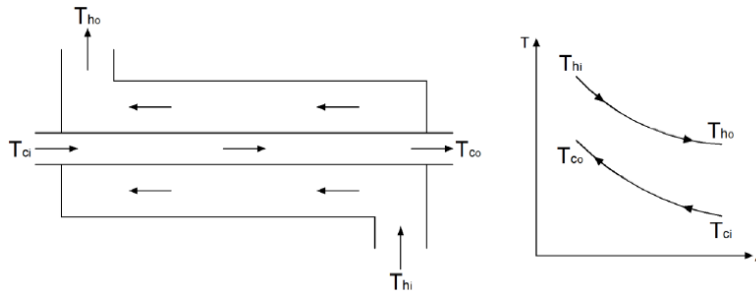
Imagen 1. Intercambiador de Calor de Flujo en Paralelo.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

- Flujo en contracorriente:** se presenta contracorriente cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador de calor por diferentes extremos, ya que el fluido con menor temperatura sale en contracorriente en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproxima a la temperatura del fluido de entrada. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que otros tipos. En contraste con el intercambiador de flujo en paralelo, el intercambiador de contraflujo o contracorriente puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realiza la transferencia de calor en el intercambiador, como se ilustra en la Imagen 2

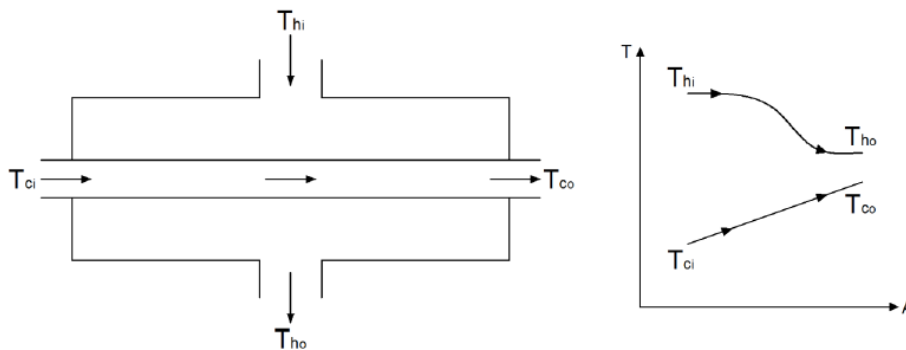
Imagen 2. Intercambiador de Calor de Flujo en Contracorriente.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

- **Flujo Cruzado:** En la Imagen 3 se muestra el intercambiador de calor de flujo cruzado; consiste en que uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro, es decir, uno de los fluidos pasa a través de los tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90°.

Imagen 3. Intercambiador de Calor de Flujo Cruzado.

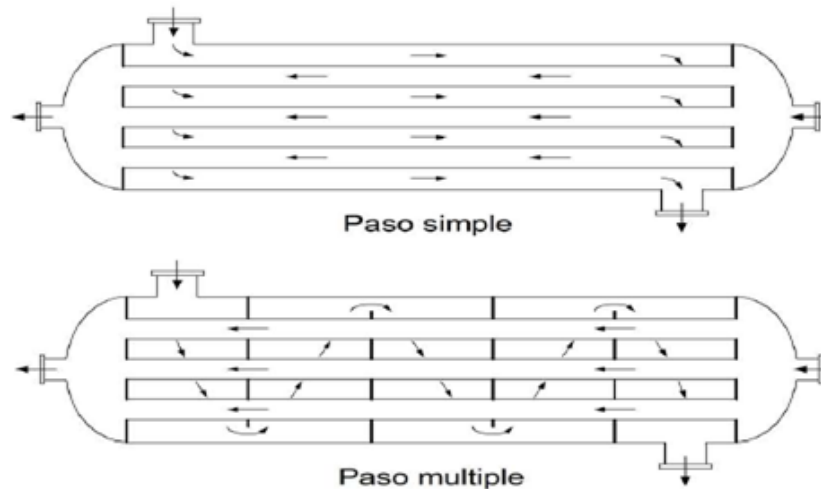


Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

- **Paso Simple y Paso Múltiple.** Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro

de un intercambiador de paso simple. Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos. Si el fluido solo intercambia calor una sola vez, se denomina intercambiador de paso simple. En la Imagen 4 se muestra un ejemplo de estos intercambiadores. Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos al utilizar dobleces en forma de “U” en los extremos, es decir, los dobles en forma de “U” permite al fluido fluir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador. Un segundo método para llevar a cabo múltiples pasos es insertar deflectores dentro del intercambiador.

Imagen 4. Intercambiadores de Paso Simple o Paso Múltiple.



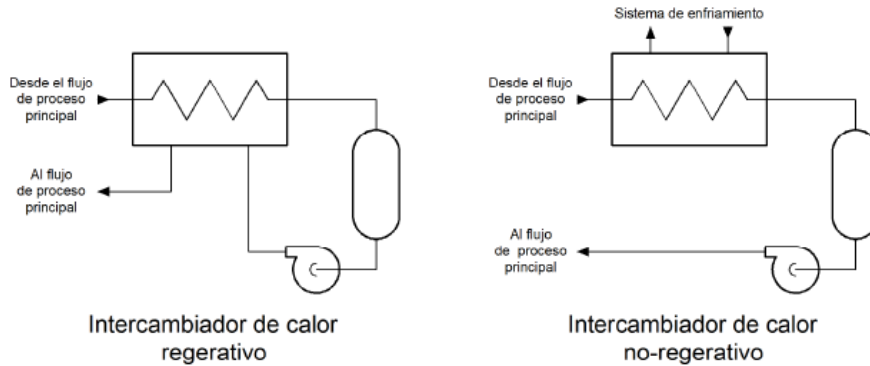
Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

2.1.2.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR SEGÚN SU FUNCIÓN.

Los intercambiadores de calor también pueden ser clasificados por su función en un sistema particular. Una clasificación común es: Intercambiador regenerativo y no regenerativo.

- **Intercambiador de Calor Regenerativo.** Un intercambiador regenerativo es aquel donde se utiliza el mismo fluido (el fluido caliente y el fluido frío es el mismo) como se muestra en la Imagen 5 la descripción de lo que sucede es: el fluido caliente abandona el sistema cediendo su calor a un regenerador y posteriormente regresando al sistema. Los intercambiadores regenerativos son comúnmente utilizados en sistemas con temperaturas altas donde una porción del fluido del sistema se remueve del proceso las refinerías se utilizan las fracciones que salen de las torres de destilación para recuperar calor por medio del tren de precalentamiento. Ya que el fluido que es removido del proceso principal contiene energía, el calor del fluido abandona el sistema se usa para recalentar (regenerar) el fluido de regreso en lugar de expeler calor hacia un medio externo más frío lo que mejora la eficiencia del intercambiador de calor.
- **Intercambiador de Calor no regenerativo:** En un intercambiador de calor no regenerativo como se muestra en la Imagen 5, el fluido con mayor temperatura es enfriado por un fluido de un sistema separado, y la energía removida no es regresada al sistema. Es importante recordar que el término “Regenerativo/no regenerativo” solo se refiere a cómo funciona el intercambiador de calor en un sistema y no indica el tipo de intercambiador.

Imagen 5. Intercambiadores de Calor Regenerativos y No Regenerativos.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

2.1.2.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN.

Los intercambiadores de calor son frecuentemente caracterizados por su construcción, los tres principales tipos de construcción son:

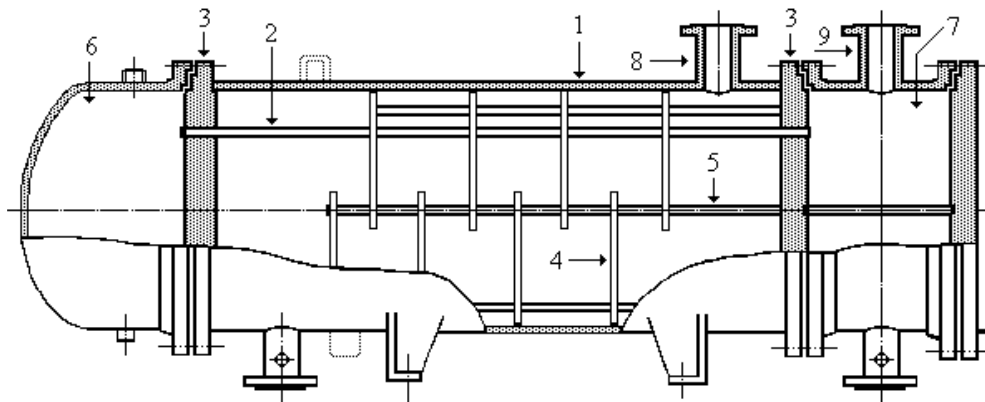
- Intercambiador de calor de doble tubo:* Este intercambiador de calor consiste en un tubo pequeño dentro de otro tubo de mayor diámetro, circulando uno de los fluidos en el interior del tubo de menor diámetro y el otro fluido entre ambos, pueden operar con flujo en paralelo y/o contracorriente.
- Intercambiador de calor de placas.* Un intercambiador de placas es un armazón con placas corrugadas o ranuras de metal. La armazón incluye una placa fija, una placa de presión y partes de conexión a presión. Las placas son presionadas unas a otras sobre una armazón.
- Intercambiador de coraza y tubos:* En este intercambiador un fluido fluye por el interior de los tubos (lado tubos), mientras el otro es forzado a través de la

coraza o casco y sobre el exterior de los tubos (lado casco o lado coraza)
(Martínez Rodríguez , 2009).

El objetivo general de este proyecto de investigación es diseñar y construir un intercambiador de calor de tubo y coraza siguiendo la norma TEMA, ASME y el método LMTD, por lo que a continuación se centra el marco teórico en este tipo de intercambiadores, su descripción, su modelamiento matemático y su funcionamiento.

2.1.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CARCASA

Imagen 6. Partes de un intercambiador de calor de Coraza y Tubo.



1-Carcasa. 2-Tubos. 3-Placa de tubos. 4-Deflectores. 5-Deflector longitudinal. 6-Cabezal posterior.

7-Cabezal fijo. 8-Boquilla de la carcasa. 9-Boquillas para los tubos. Fuente: Gonzales, Dosinda.

Guía de intercambiadores de calor: Tipos generales y aplicaciones, 2002.

Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcasa o coraza. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcasa o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por la(s) placa(s) del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionar un sello adecuado. En sistemas

donde los dos fluidos presentan una gran diferencia entre sus presiones, el líquido con mayor presión se hace circular típicamente a través de los tubos y el líquido con una presión más baja se circula del lado de la carcasa. Esto es debido a los costos en materiales, los tubos del intercambiador de calor se pueden fabricar para soportar presiones más altas que la cáscara del cambiador con un costo mucho más bajo. Los deflectores mostrados en la Imagen 6 también actúan como baffles para dirigir el flujo del líquido dentro de la carcasa hacia adelante y hacia atrás a través de los tubos.

A este tipo de intercambiador también se le conoce como Intercambiador de Calor de Tubo y Carcasa. De los diversos tipos de intercambiadores de calor, éste es el más utilizado en las refinerías y plantas químicas en general debido a que:

- a. Proporciona flujos de calor elevados en relación con su peso y volumen.
- b. Es bastante fácil de limpiar y reparar.
- c. Es relativamente fácil de construir en una gran variedad de tamaños.
- d. Es versátil y puede ser diseñado para cumplir prácticamente con cualquier aplicación.

Este tipo de equipo (Imagen 6) consiste en una carcasa cilíndrica [1] que contiene un arreglo de tubos [2] paralelo al eje longitudinal de la carcasa. Los tubos pueden o no tener aletas y están sujetos en cada extremo por láminas perforadas [3]. Estos atraviesan a su vez a una serie de láminas denominadas deflectores (baffles) [4] que, al ser distribuidas a lo largo de toda la carcasa, sirven para soportar los tubos y dirigir el flujo que circula por la misma, de tal forma que la dirección del fluido sea siempre perpendicular a los tubos. El fluido que va por dentro de los tubos es dirigido por unos ductos especiales conocidos como cabezales o canales [6 y 7].

Hay dos tipos básicos de intercambiadores de tubo y carcasa: El de tipo fijo o de tubos estacionario, que tiene los dos extremos de los tubos fijos a la carcasa, y el que tiene un sólo extremo de los tubos sujeto a la coraza. En el primer caso, se requiere de una junta de dilatación debido a la expansión diferencial que sufren los materiales que conforman el equipo. En el segundo caso los problemas originados por la expansión diferencial se pueden eliminar empleando un cabezal de tubos flotantes que se mueve libremente dentro de la coraza o empleando tubos en forma de U en el extremo que no está sujeto (Gonzalez Mendizabal, 2002).

Los intercambiadores de tubo y carcasa (o tubo y coraza) se diseñan de acuerdo a los estándares publicados por la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares, conocida como TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). TEMA presenta tres estándares para la construcción mecánica, los que especifican diseño, fabricación y materiales a utilizar en los intercambiadores de tubo y carcasa (Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1999). Estos son:

- Clase R: Para aplicaciones en petróleo y procesos relacionados.
- Clase C: Para aplicaciones en procesos comerciales.
- Clase B: Para servicio en procesos químicos.

Estos intercambiadores son aplicables atendiendo las siguientes limitaciones:

- Diámetro interno de la carcasa ≤ 1.524 mm (60 in)
- Presión ≤ 207 bar (3.000 psi, 20.700.000 Pa)
- Relación (diámetro interno carcasa) *(presión) ≤ 105.000 mm bar (60.000 in psi)

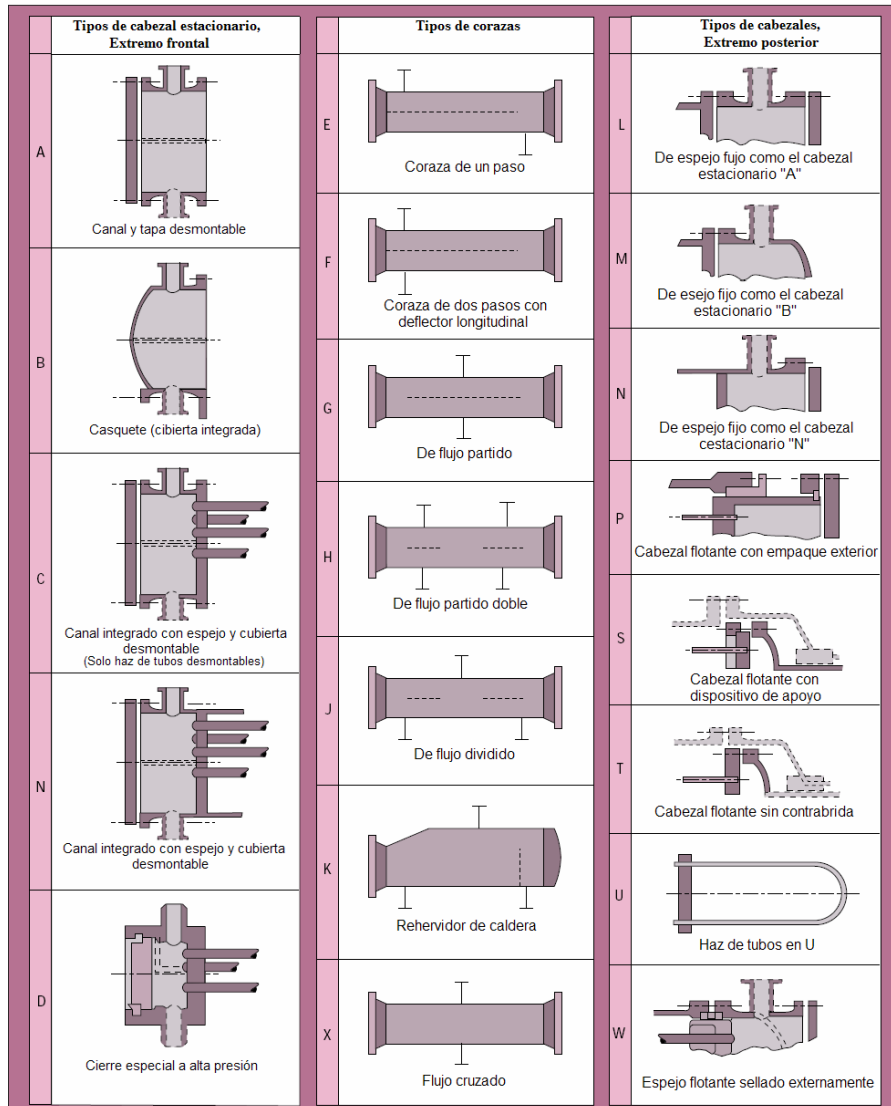
La intención de cumplir con los parámetros anteriores es limitar el diámetro de los pernos utilizados en el ensamblaje del equipo y el espesor de la carcasa a 50,8 mm (2 in), aproximadamente.

TEMA también propone un sistema de normas para la designación de los tipos de intercambiadores, conformada por tres letras que definen completamente el equipo. La primera letra designa al tipo de cabezal entrada o estacionario empleado; la segunda el tipo de casco o coraza y la tercera al tipo de cabezal posterior o salida (Cuadrado, Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica., 2010).

- Tipo de cabezal estacionario: Letras A, B, C, D, N.
- Tipo de coraza o casco: Letras E, F, G, H, J, K, X.
- Tipo de cabezal posterior: Letras L, M, N, P, S, T, U, W.

Por lo tanto, la descripción completa de estos equipos es como sigue: Diámetro de la Coraza / Longitud de los tubos XXX, donde XXX es igual a las letras que los definen según la Imagen 7

Imagen 7. Nomenclatura TEMA.



Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

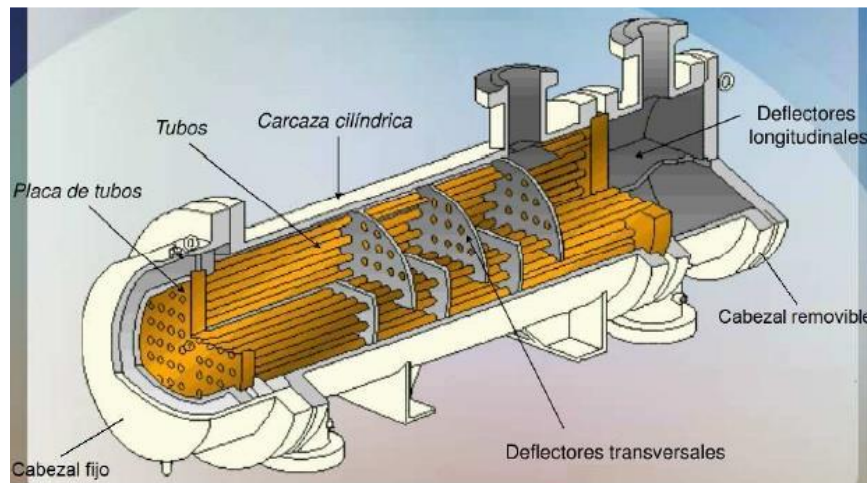
Para determinar la longitud de los tubos, en el caso que sean tubos en U, se mide desde el extremo hasta la tangente que pasa por el fondo de la "U"; en caso de no tener este tipo de tubos, se toma sencillamente la longitud de los mismos.

La selección del tipo de equipo es gobernada por factores tales como la facilidad de limpieza del mismo, la disponibilidad de espacios para la expansión entre el haz de tubos y la carcasa, previsión de empacaduras en las juntas internas, y sobre todo la función que va a desempeñar.

A continuación se detallarán los componentes básicos de este tipo de equipos (Cuadrado, Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica., 2010).

2.1.4. COMPONENTES BÁSICOS DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CARCASA

Imagen 8. Componentes de un intercambiador de calor de coraza y tubos.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

2.1.4.1 TUBOS

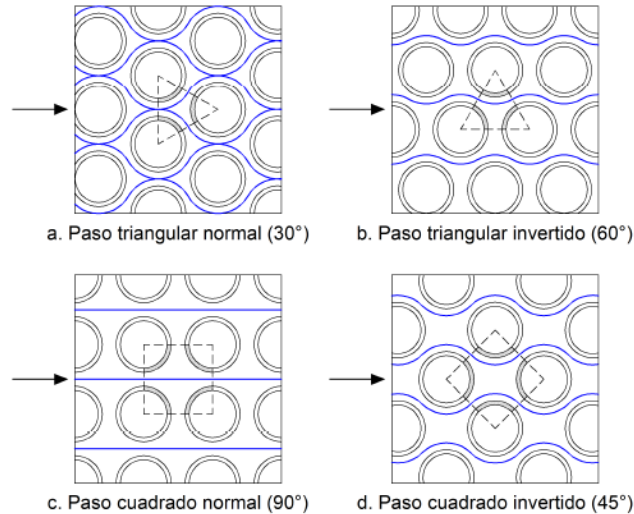
Los tubos son los componentes fundamentales, proporcionando la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por interior de los tubos y la coraza.

Los tubos pueden ser completos o soldados y generalmente están hechos de cobre o aleaciones de acero. Otras aleaciones de níquel, titanio o aluminio pueden ser requeridas para aplicaciones específicas.

Los tubos pueden ser desnudos o con aletas. Las superficies extendidas se usan cuando uno de los fluidos tiene un coeficiente de transferencia de calor (U) mucho menor que el otro fluido. La cantidad de pasos por los tubos y por la coraza dependen de la caída de presión disponible. A mayores velocidades, aumentan los coeficientes de transferencia de calor (U), pero también las pérdidas por fricción y la erosión en los metales. Por lo tanto, si la pérdida de presión es aceptable, es recomendable tener cantidad de tubos, pero de mayor longitud en un área reducida.

En cuanto al espaciado de los tubos, los orificios correspondientes no pueden situarse muy cerca entre sí, ya que ello debilitaría estructuralmente el cabezal de tubos o espejo. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes se denomina claro, y la distancia centro a centro en tubos adyacentes es el espaciado de tubos, con ambas dimensiones normalizadas. La disposición de los tubos puede ser triangular o en cuadro, y sus variedades se muestran en la Imagen 9.

Imagen 9. Disposición de los tubos.



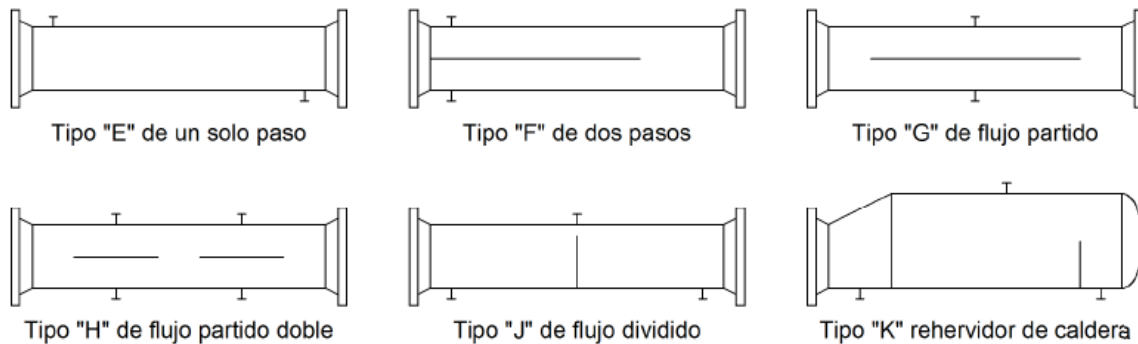
Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

La ventaja del espaciado cuadrado consiste en que los tubos resultan accesibles para limpieza externa y que tienen una baja caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada. En cambio, 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 la mejor para alcanzar valores altos del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la coraza, consiguiéndose así coeficientes en torno al 25% mayores con la disposición en cuadro bajo condiciones similares. Los tubos se pueden obtener en diferentes espesores, definidos por el calibrador Birmingham y en la práctica se denomina BGM del tubo (Cuadrado, Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica., 2010).

2.1.4.2 CORAZA, CARCASA O CASCO

La coraza es el contenedor del segundo fluido, generalmente es de sección circular y está hecha de una placa de acero al carbono conformado en forma cilíndrica y soldado longitudinalmente, los tipos de coraza se muestran en la Imagen 10 y se explican en la Tabla 1.

Imagen 10. Tipos de Coraza.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

TIPO	CORAZA	DESCRIPCIÓN
E	Un solo paso.	Es el arreglo más común por ser económico y térmicamente eficiente, las boquillas están ubicadas en los extremos opuestos de la coraza, dependiendo del tipo y numero de deflectores empleados.
F	Dos pasos.	Se utiliza cuando existe cruce de temperaturas y se pretende lograr una contracorriente pura o bien evitar un valor bajo de en el factor de corrección F al utilizar dos pasos en la coraza y más de cuatro en los tubos, evitando utilizar dos equipos en serie.
G	Flujo partido.	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 por la placa de soporte que divide la coraza en dos, la ventaja es que el vapor se mantiene por un tiempo más largo en contacto con los tubos.
H	Flujo partido doble.	Flujo partido doble se utiliza para reducir la caída de presión. En condensadores, la alimentación de vapor se divide en las dos boquillas de alimentación.
J	Flujo dividido.	Se emplea cuando el diseño se encuentra limitado por la caída de presión en la coraza, ya que la mitad del fluido del lado coraza atraviesa la misma área transversal y solo la mitad de la longitudinal. Esta coraza tiene una boquilla central de entrada y dos de salida.
K	Rehervidor de caldera.	Se utiliza para generar vapor.

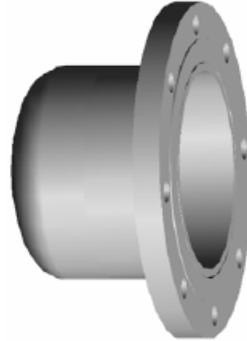
Tabla 1. Tipos de coraza

2.1.4.3 CABEZALES

A continuación, se describen los tipos de cabezales para el intercambiador de casco y tubo (tubo y coraza), especificados por la norma TEMA, con la finalidad de seleccionar el más adecuado.

Existen dos tipos de cabezales: estacionarios (anteriores) y posteriores, la facilidad de acceso a los tubos es el factor que gobierna la selección del cabezal estacionario, mientras la necesidad de limpieza, el estrés térmico, los posibles problemas de empaquetaduras, el goteo y el costo, son factores que influyen en la selección del cabezal posterior (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

Imagen 11. Cabezal tipo bonete.



Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

Cabezales estacionarios o fijos: Hay dos tipos básicos de cabezales fijos: los tipo canal (channel) y los tipo sombrero o bonete (bonnet), como el de la Imagen 11. La Tabla 2 resume las aplicaciones más comunes de los cabezales estacionarios.

CABEZAL	APLICACIÓN
A	Es el más común entre los cabezales fijos y se aplica con placas de tubos , tubos en U y banco de tubos removibles
B	Se emplea con placa de tubos fija, tubos en U, banco de tubos removible y coraza de tubos removibles.
C	Se emplea en bancos de tubos removible y en diseños de placa de tubos fijas.
D	Se emplea especialmente a altas presiones (lado tubo >1000 psi)

Tabla 2. Aplicaciones comunes de los cabezales estacionarios

Los cabezales de canal atornillados denominados según TEMA de tipo “A” consisten en ductos cilíndricos con bridas en ambos extremos, una de ella es atornillada en una cubierta plana y la otra a la placa de los tubos o a otra brida en el extremo de la coraza. Este tipo de cabezal se emplea cuando es frecuente la limpieza interna de los tubos.

Otro tipo son los de canales o cabezales soldados denominados tipo C y N que son similares a los atornillados, pero solo en un extremo posee bridas, las que son atornilladas a una cubierta plana el otro extremo está soldado a la placa de los tubos o la coraza. Al igual que en el tipo anterior, se tiene acceso *in situ* a los tubos, pero como el canal y la cubierta de tubos forman una unidad, el haz de tubos no puede ser extraído. Los canales soldados son más baratos que los atornillados, ya que solo poseen una brida en vez de dos, además son seleccionados para servicios de altas presiones y/o fluidos letales (peligrosos), dado que poseen un mínimo de juntas externas (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

Cabezales Posteriores: Estos cabezales pueden ser de tres tipos: Fijos, flotantes o tubos en “U”. Los cabezales fijos se denominan según TEMA de tipo L, M y N contribuyen a un sistema rígido ya que la placa de los tubos (espejo) está adherida a la coraza, razón por la cual a los intercambiadores de calor con este tipo de cabezales se les denomina como tipo caja. El interior de los tubos puede limpiarse mecánicamente, pero el haz de los tubos no puede ser removido sin cortar la coraza, la limpieza exterior de los mismos solo puede ser efectuada por medios químicos. Por ello, estos equipos solo deben ser usados con fluidos limpios en el lado de la coraza.

Entre las ventajas más relevantes del cabezal fijo están: pueden emplearse con cualquier número de pasos de tubos ; cada tubo puede ser reemplazado en forma individual; ausencia de uniones internas , lo que elimina una potencial fuente de fugas de un fluido a otro; permite acomodar un mayor número de tubos que cualquier otro cabezal dentro de un determinado diámetro de coraza , es adecuado para manejar altas presiones y/o manejo de fluidos peligrosos; su costo es relativamente bajo un poco más caro que el tipo de tubos en “U”. Los intercambiadores que emplean tubos en “U” (TEMA tipo U) solo necesitan cubierta para los tubos, lo que permite que estos puedan “moverse libremente” respecto a la

coraza. Por otra parte el haz de tubos para limpieza mecánica externa, pero internamente debe limpiarse con químicos, por lo que el fluido a circular por los tubos debe ser relativamente limpio (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

Los cabezales flotantes son denominados así ya que mientras el fijo se encuentra adherido a la coraza o casco, estos se encuentran virtualmente flotando dentro de la misma, permitiendo la extracción completa del haz de tubos y la ocurrencia de movimientos diferenciales entre los tubos y la coraza. Existen cuatro tipos de cabezales flotantes, denominados de anillos divididos o tipo “S”, tracción continua o tipo “T”, flotante empacado externamente o tipo “P” y flotante sellado externamente o tipo “W”.

El cabezal tipo “S” está construido con una placa de tubo flotante entre un anillo dividido y una cubierta de placa de tubos. La placa se puede mover libremente dentro de la cubierta de la coraza. Como existe una junta interna, este cabezal es propenso a sufrir fugas, por lo tanto, su presión interior se limita a 50 bares aproximadamente, este tipo de cabezal es recomendado para diseños con tubos removibles.

El cabezal tipo “T” está construido con placas de tubo flotante atornilladas a la cubierta de la placa de tubos. Posee la ventaja de reducir el tiempo de limpieza ya que el acceso a los tubos es muy sencillo; además permite el manejo de presiones de 70 bares. Sin embargo, el número de tubos que éste permite acomodar es menor a cualquier otro tipo de cabezal y la posibilidad de fuga permanece.

En el cabezal tipo “W”, también conocido como tipo anillo de faro, los fluidos se encuentran separados por dos empaquetaduras, una para la coraza y otra para los tubos, su uso se encuentra limitado para uno o dos pasos de tubos, bajas presiones y fluidos no peligrosos.

Por último, el cabezal flotante externo tipo “P” posee todas las ventajas del tipo de faro, es decir, del tipo “W” además de no tener restricciones en cuanto a la elección del fluido del lado de los tubos. No obstante, en la coraza se debe restringir las bajas presiones y fluidos no letales, dada la presencia de sellos en este lado. En la Tabla 3 se resumen las características de los cabezales posteriores.

CABEZAL	APLICACIONES
L	Se emplea en intercambiadores con placa de tubos fija, cuando se requiere limpieza mecánica en el lado de los tubos.
M	Se emplea con intercambiadores con placa de tubos fija, para servicios de altas presiones.
N	Se emplea en intercambiadores con placa de tubos fija
P	Se le denomina cabezal empacado externamente. Permite expansión y se puede diseñar para cualquier número de pasos. Los fluidos no se mezclan en caso de presentarse fugas en las empaquetaduras. Es un diseño muy costoso
S	Se le denomina cabezal de anillo dividido. Tiene a la placa de tubos entre un anillo dividido removible y la cubierta, la cual tiene un diámetro mayor que la coraza. Se recomienda para bancos de tubos removibles.
T	Comúnmente se le denomina cabezal flotante de arrastre. Puede ser removido de la coraza. Solo permite un número par de pasos para los tubos.
U	Diseño sencillo que requiere una placa de tubos sin junta de expansión y es muy fácil de remover. No es posible remover tubos individuales, la limpieza de la U es muy difícil, diseño económico.
W	Se le denomina cabezal flotante empacado con anillo de faro. Es posible un arreglo de uno o dos pasos para los tubos. El sistema de tubos más deflectores es fácil de remover, diseño económico.

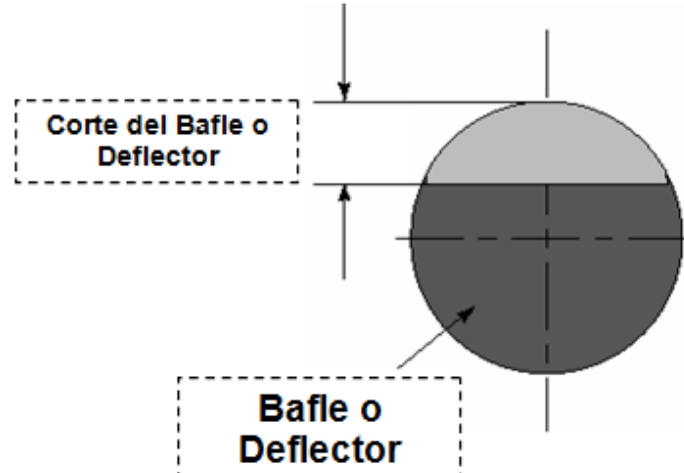
Tabla 3 Aplicaciones comunes de los cabezales posteriores

2.1.3.4 DEFLECTORES O BAFLES

Usualmente se instalan deflectores del lado de la coraza, bien sea transversal o longitudinal. Los deflectores longitudinales se usan cuando se requieren dos o más pasos por la coraza o para sustituir a dos corazas tipo E en serie. Estos deflectores son denominados también divisores de paso. El divisor de pasos debe ajustar perfectamente en los surcos de la placa de tubos (espejo) y en cabezal para minimizar la posibilidad de derrame de una división a otra, lo que traería como consecuencia un serio deterioro en el funcionamiento del intercambiador. Los deflectores longitudinales pueden ser diseñados removibles o soldados. Los primeros se emplean con cabezales flotantes y requieren de bandas de sello flexibles o un dispositivo entre el deflector y la coraza que evite la fuga del fluido. Los segundos se utilizan con cabezales fijos y no requieren de juntas de expansión (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

Los deflectores o bafles transversales se emplean para soportar los tubos evitando así el pandeo, vibración y para incrementar el coeficiente de transferencia de calor del fluido debido al aumento de turbulencia y por lo tanto del número de Reynolds (Re), pero al momento del diseño es necesario tener en cuenta que no afecte la caída de presión sugerida para este tipo de equipo. Este tipo de bafles pueden ser segmentados con o sin tubos en la ventana, multi-segmentados o de disco y anillo, para deflectores segmentados el corte está entre el 15-40 % (el mejor resultado se obtiene con 25% de corte) del diámetro interno de la coraza, es decir que generalmente el deflector corresponde al 75% del diámetro de la coraza, en el caso del espaciado entre deflectores el mínimo es del 20% del diámetro interno de la coraza, este parámetro es vital en el diseño, por lo general el espaciado óptimo está entre 30 a 60% (Llangarí Lliguín & Solís Sánchez, 2012).

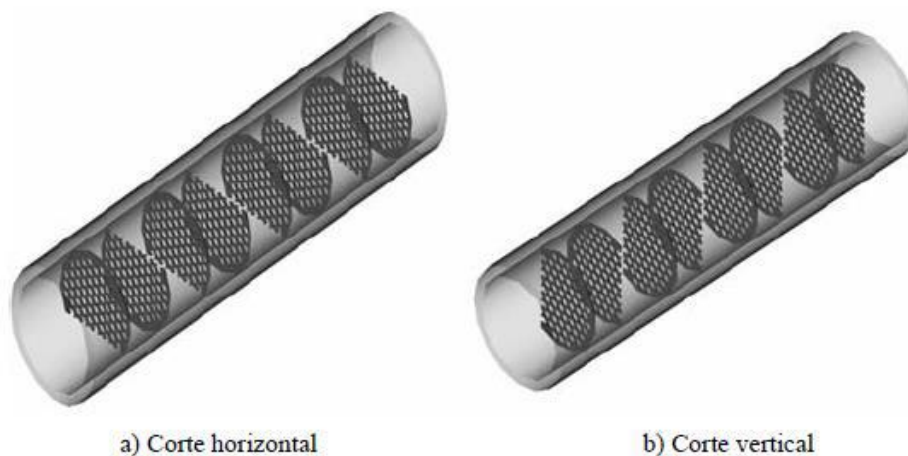
Imagen 12. Corte de un deflector.



Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

Los deflectores se clasifican de acuerdo a la posición del corte: horizontal y/o vertical .La Imagen 13 muestra cómo se pueden posicionar los baffles en la coraza de acuerdo con su orientación.

Imagen 13. Posicionamiento de los baffles en la coraza.

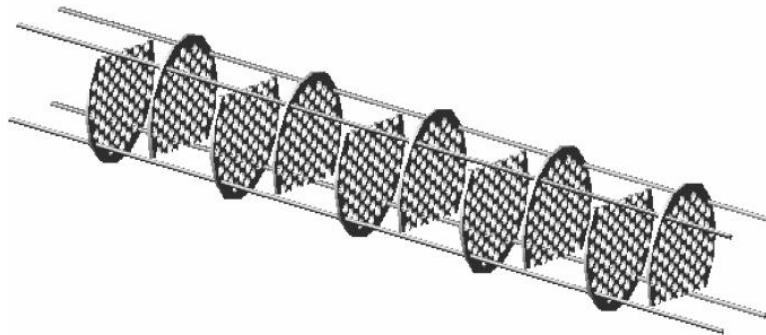


Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

2.1.4.5 BARRAS DE SOPORTE

Las barras de soporte con componentes que dan soporte a los baffles y los mantiene a distancia optima de diseño. Si no se colocaran estas barras durante el ensamble del arreglo de tubos y los baffles de la coraza, los baffles podrían moverse a lo largo de los tubos causando un mal desempeño térmico del intercambiador de calor o dañado a los tubos por pandeo o vibración (Flores González, 2007). La Imagen 14 muestra un ejemplo de baffles de corte horizontal sujetos a las barras de soporte.

Imagen 14. Barras de soporte.

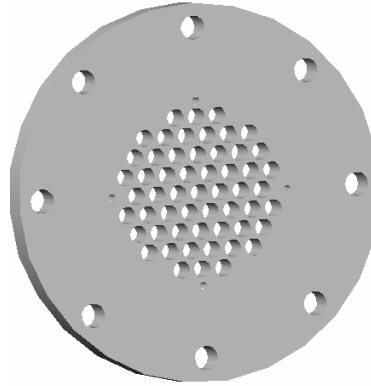


Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

2.1.4.6 ESPEJO O PLACA PARA TUBOS

Los espejos son unos de los componentes más importantes del intercambiador de calor de casco y tubos, debido a que su propósito es separar los fluidos de la coraza y de los tubos, además de darle soporte al arreglo de tubos, barras de soporte, baffles o deflectores, a la coraza y los cabezales. La Imagen 15 muestra un ejemplo de espejo para un haz de tubos (Flores González, 2007):

Imagen 15. Espejo para un haz de tubos.



Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

Las principales características y aplicaciones de los diferentes tipos de espejos son:

El espejo fijo es el más empleado en la industria para aplicaciones moderadas donde los esfuerzos térmicos son bajos, esto se debe a que su fabricación es sencilla y de bajo costo, al eliminar las bridas, debido a que la coraza se fija a los espejos, éstos permiten su unión con los cabezales de entrada y salida por medio de pernos. Los espejos fijos usados, también como brida solo permiten la limpieza interior de los tubos, al retirarse los cabezales. Por esta razón se recomiendan flujos de baja suciedad en la coraza. En estos espejos el número de pasos de los tubos puede ser cualquier cantidad, mientras que los pasos de la coraza se limitan a dos.

El espejo flotante se utiliza en los intercambiadores de calor de cabezal flotante con empaque exterior, de cabezal flotante interno o de cabezal flotante removible, estos tipos de fabricaciones son por lo regular para la industria química o del petróleo. El espejo flotante permite las dilataciones diferenciales entre la coraza y los tubos, así como también retirar al arreglo de tubos para su limpieza y mantenimiento, sin embargo, la construcción de estos tipos de espejos es más compleja, por lo que se incrementa el tiempo de fabricación y el costo.

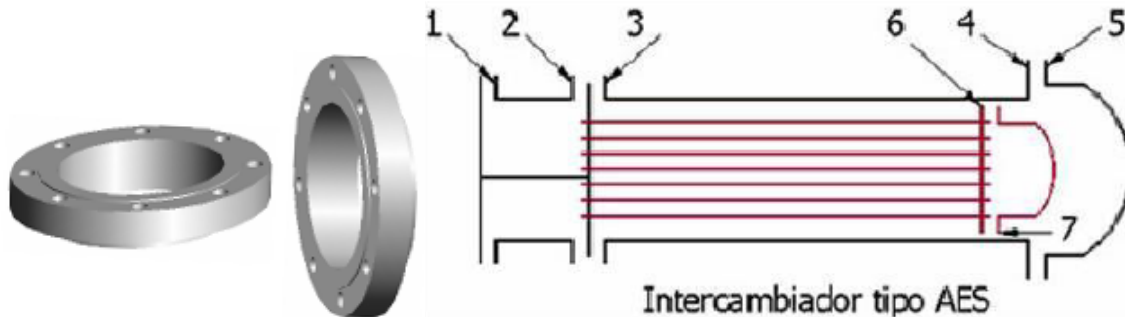
Los espejos removibles, son placas redondas del tamaño de las bridas, los cuales permiten retirar el arreglo de tubos para reparaciones y mantenimientos de los tubos, estos espejos son utilizados en arreglos de tubos en “U”.

De las características que presentan los espejos descritos anteriormente, se determina que el espejo fijo utilizado también como brida, el cual se muestra en la Imagen 15, es el más apropiado para el intercambiador de calor, debido que su fabricación es sencilla y de bajo costo, su fabricación consiste de una placa redonda, la cual se barrena para sujetar al arreglo de tubos por medio de soldadura o rolado. El agua es el fluido de trabajo de la coraza y de los tubos, el cual es un fluido de baja suciedad y no tan corrosivo, no requiriendo limpieza mecánica externa de los tubos, pero si limpieza mecánica en el interior de los tubos al retirarse los cabezales de entrada y salida. Este tipo de espejo resiste las expansiones térmicas del equipo, a las temperaturas de operación de los fluidos de trabajo, las cuales no son tan altas: en la coraza son de un rango de 10 a 30°C y en los tubos de 40 a 80°C.

2.1.4.7 BRIDAS

Las bridas sirven para acoplar partes del intercambiador de calor y unir la tubería a las tuberías del proceso. Generalmente las bridas son de acero al carbono forjadas de acuerdo a las especificaciones técnicas, aunque también se utilizan fundiciones de hierro para servicios de baja presión. Las bridas tienen una capacidad asignada como 150, 300, 400, 600, 900, 1500 y 2500 libras, esta capacidad que corresponde a presiones de servicio a una temperatura especificada.

Imagen 16. Bridas y ubicación de las bridas.



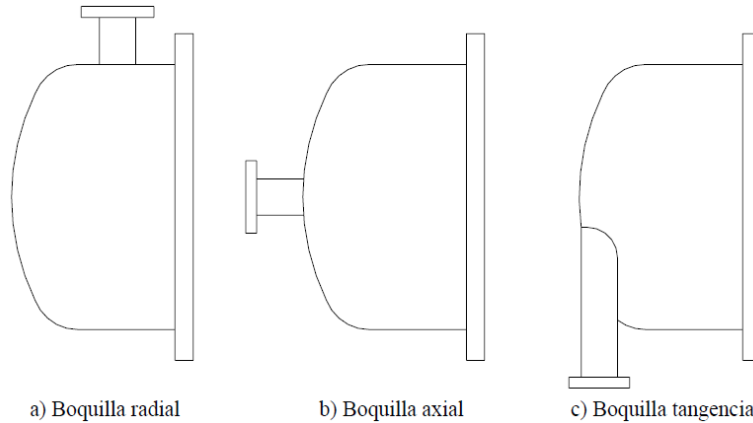
Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

Por lo general las bridas 1, 2, 3 y 5 pueden ser seleccionadas de bridas estándar establecidas en códigos como TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1999), o catálogos de fabricantes, para diámetros de bridas o diámetro interno del recipiente en donde estén ubicadas, menores a 24 pulgadas, para diámetros mayores de bridas deben diseñarse, la construcción especial de las bridas 4, 6 y 7, requiere de un procedimiento establecido por ASME (ASME, 2001).

2.1.4.8 BOQUILLAS

Las boquillas son componentes que permiten el enlace con las bombas de los circuitos de los fluidos de trabajo que pasaran por el intercambiador de calor y con los instrumentos de medición del intercambiador de calor, pero principalmente tienen la finalidad de proporcionar una buena distribución del fluido en el arreglo de tubos. La Imagen 17 muestra las diferentes formas de unir las boquillas al equipo y/o cabezales.

Imagen 17. Tipos de boquillas.



Fuente: Flórez, Rafael. Fabricación Y Validación Experimental de un Intercambiador de Tubo y Coraza, 2007.

Las boquillas radiales son las más adecuadas para los cabezales debido a que tiene una mejor distribución del fluido en el arreglo de los tubos, aumentando la transferencia de calor del equipo, apropiada para intercambiadores de calor horizontales.

En resumen (Fonseca Picón & Riveros Vargas, 2009), un intercambiador de calor de casco y tubo, es un recipiente cilíndrico a presión (casco), el cual envuelve un grupo de tubos rectos en su interior (haz de tubos), y el haz de tubos está inmerso en el fluido que circula por el casco.

Por el interior de los tubos circula otro fluido, llamado fluido lado tubo, el cual está a una temperatura diferente del fluido que circula por el casco, llamado fluido lado casco.

La finalidad del intercambiador de calor es la de transferir calor entre el fluido lado casco y el fluido lado tubo, como el fluido circula por separado en una cámara del

intercambiador, los fluidos nunca se mezclan, y la transferencia de calor ocurre por convección y conducción a través de las paredes de los tubos.

Un intercambiador de calor se presenta en cuatro partes principales: casco, cabezal estacionario, cabezal posterior y haz de tubos que en el capítulo de elementos mecánicos se expone su definición. El haz de tubos es soportado en sus extremos por dos placas fijas, llamadas porta tubos.

Los intercambiadores de coraza y tubo comúnmente usados por sus ventajas en mantenimiento, economía, montaje y construcción son los que a continuación se describen:

- Intercambiador Tipo U.
- Intercambiador de cabezal fijo.
- Intercambiador de cabezal flotante.

2.1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CORAZA Y TUBO

2.1.5.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO U

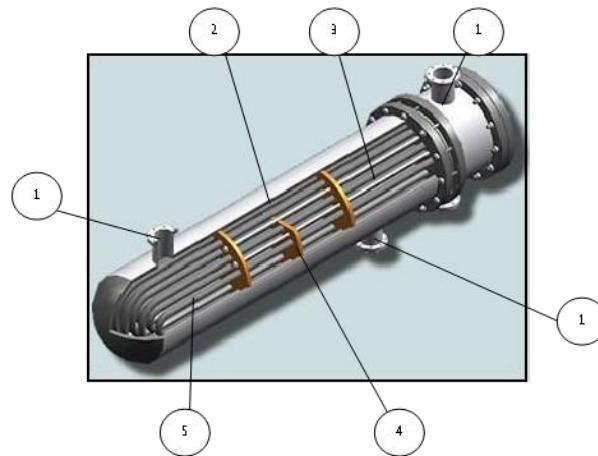
En este tipo de intercambiador, los tubos son doblados en forma de U y están unidos a una única placa porta tubos. De esta manera los tubos pueden moverse relativamente respecto al casco eliminando los problemas de movimiento diferencial entre el casco y los tubos.

Este tipo de intercambiador proporciona que el haz de tubos pueda ser retirado, permitiendo que el exterior de los tubos sea aseado con medios mecánicos, pero la limpieza del interior de los tubos se debe realizar con medios químicos. Por lo tanto el tipo de tubo en U está limitado a trabajar con fluidos no ensuciantes en el lado

tubo aunque algunos fluidos ensuciantes pueden ser transportados por el lado de la coraza (Fonseca Picón & Riveros Vargas, 2009).

Los tubos en U tienen diferentes radios de curvaturas, como resultado una vez hecho el haz de tubos, solo los tubos que están en la periferia son accesibles para la renovación, mientras los tubos averiados que se encuentran en filas interiores deben ser taponados. La principal ventaja del intercambiador con los tubos en U es que cada tubo puede extenderse y contraerse independientemente al estar unido a una única placa porta tubos, haciéndolo muy apropiado para servicios donde se presente choque térmico muy grande o para servicios de alta presión.

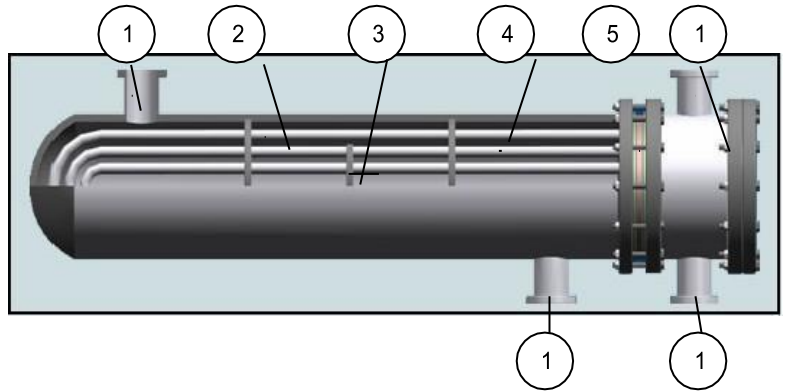
Imagen 18. Intercambiador de tubos en U.



1. Brides. 2. Carcasa. 3. Espaciador. 4. Bafle. 5. Tubo. Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo.

Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

Imagen 19. Haz de tubos.



1. Brida. 2. Carcasa. 3. Baffle. 4. Tubo. 5. Placa portatubo. Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

Este tipo de configuración presenta las siguientes desventajas (Fonseca Picón & Riveros Vargas, 2009):

- El número de tubos que pueden ser acomodados es ligeramente menor que para el tipo cabezal fijo, debido al mínimo radio requerido en el doblado para hacer la forma en U.
- No pueden realizarse diseños de un solo paso por el lado tubo, lo que impide lograr una verdadera transferencia de calor con flujos a contracorriente.
- El espesor de la pared de los tubos es menor en la sección doblada.
- Es muy difícil drenar el circuito del fluido lado tubo para intercambiadores montados verticalmente.

2.1.5.2 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL TIPO FIJO

Los intercambiadores de cabezal fijo son el diseño más simple de casco y tubos, y se construyen sin juntas empaquetadas en el lado del casco.

Existen diversos tipos de construcciones, los que tienen ambas placas de porta tubos soldadas al casco forman una caja para que de esta forma se proporcione un sello absoluto para prevenir las fugas del fluido lado casco, los cabezales se apernar al casco.

En otros intercambiadores se suelda el casco y los cabezales a la placa porta tubos formando una unidad integral. A veces el diámetro de la placa porta tubos se extiende más allá del diámetro del casco y tienen en su periferia una brida con agujeros para pernos los cuales permiten unir las placas porta tubos a los cabezales. En este tipo de intercambiador, el casco puede ser llenado completamente con tubos para lograr la máxima transferencia de calor, pero esto incrementa la caída de presión del fluido lado casco, y limita el intercambiador a servicios relativamente limpios.

Después de remover las cubiertas de los cabezales en cada extremo del intercambiador se obtiene el acceso a los tubos, por lo tanto, el interior de los tubos puede ser limpiados por medios mecánicos.

Como el haz de tubos no puede ser removido, la limpieza del exterior de los tubos se hace con medio químicos, esto limita al intercambiador de placa porta tubos fija a trabajar con fluidos no ensuciantes por el lado casco, aunque algunos fluidos ensuciantes pueden ser guiados a través de los tubos.

La combinación de temperaturas y coeficientes de expansión del casco y los tubos durante el servicio puede causar un movimiento diferencial entre ellos. Si este movimiento diferencial es excesivo los tubos se aflojarán en la placa porta tubos.

Por lo tanto, es muy importante chequear el diseño de la placa contra todos los movimientos diferenciales que probablemente ocurran, no sólo durante la operación regular, sino también en el arranque, limpieza, cierre y demás.

Esto hace que el intercambiador con placas porta tubos fijas este limitado a servicios de baja presión y servicios no letales porque la junta no es flexible al movimiento diferencial.

Un intercambiador de placa porta tubos fija sin un fuelle de expansión en el casco puede absorber solamente un limitado movimiento diferencial, si este movimiento se vuelve excesivo debe utilizarse un fuelle.

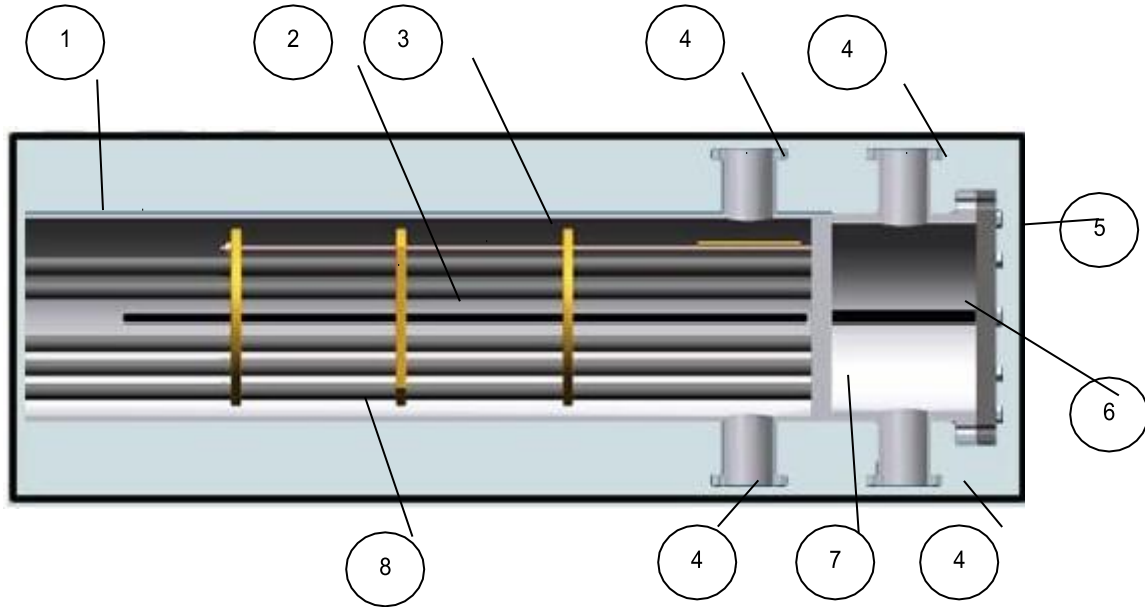
Normalmente se utilizan fuelles de con voluta sencilla desde que el diferencial de temperatura no exceda los 200 F y las cargas cíclicas sean insignificantes.

De todas formas, son muy costosos los fuelles diseñados para diámetros grandes, para altas presiones y para absorber grandes movimientos diferenciales. En estos casos es mejor considerar los diseños de cabezal flotante.

El barril del casco y el cabezal deben estar hechos de materiales que pueden ser soldados el uno al otro como acero-acero, pero no acero-aluminio o acero-latón. Cuando ocurre incompatibilidad entre los metales del casco y el cabezal, la práctica más común es usar cabezales bimetal, el metal requerido para el cabezal es colocado en la cara del lado tubo y el metal requerido para el barril del casco es colocado en la cara del lado casco.

Una solución alternativa es soldar una brida del mismo material del casco en cada extremo del casco, y atornillarlas a los cabezales utilizando los empaques apropiados.

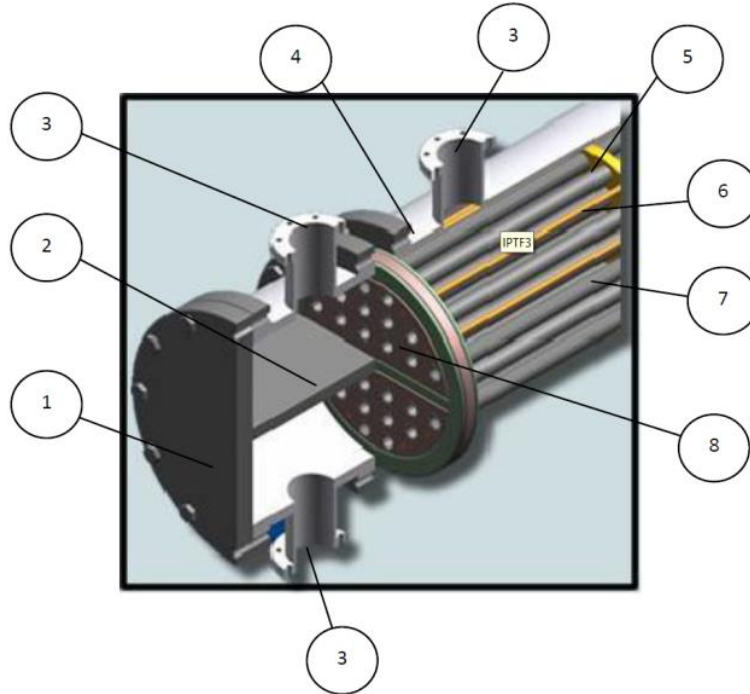
Imagen 20. Intercambiador de cabezal fijo.



1. Carcasa. 2. Baffle. 3. Espaciador. 4. Brida. 5. Cubierta del canal. 6. Separación de paso. 7. Placa porta tubo. 8. Tubo.

Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

Imagen 21. Haz de tubos.



1. Cubierta del canal. 2. Separación de paso. 3. Brida. 4. Carcasa. 5. Bafle. 6. Espaciador. 7. Tubo. 8. Placa porta tubo.

Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

La combinación de temperaturas y coeficientes de expansión del casco y los tubos durante el servicio puede causar un movimiento diferencial entre ellos. Si este movimiento diferencial es excesivo los tubos se aflojarán en la placa porta tubos.

Por lo tanto, es muy importante chequear el diseño de la placa contra todos los movimientos diferenciales que probablemente ocurran, no sólo durante la operación regular, sino también en el arranque, limpieza, cierre y demás.

Esto hace que el intercambiador con placas porta tubos fijas este limitado a servicios de baja presión y servicios no letales porque la junta no es flexible al movimiento diferencial.

Un intercambiador de placa porta tubos fija sin un fuelle de expansión en el casco puede absorber solamente un limitado movimiento diferencial, si este movimiento se vuelve excesivo debe utilizarse un fuelle.

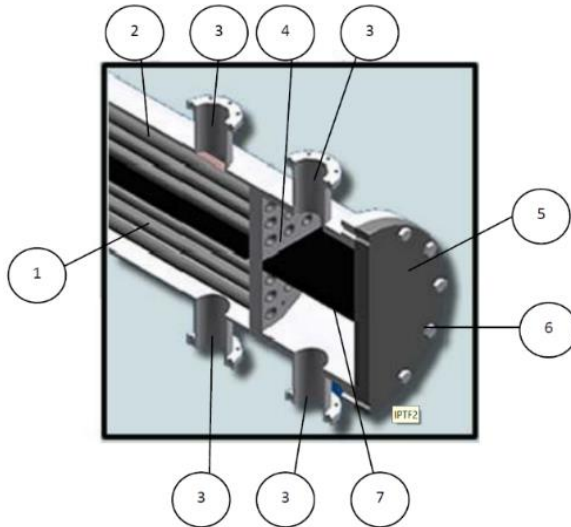
Normalmente se utilizan fuelles de con voluta sencilla desde que el diferencial de temperatura no exceda los 200 F y las cargas cíclicas sean insignificantes.

De todas formas, son muy costosos los fuelles diseñados para diámetros grandes, para altas presiones y para absorber grandes movimientos diferenciales. En estos casos es mejor considerar los diseños de cabezal flotante.

El barril del casco y el cabezal deben estar hechos de materiales que pueden ser soldados el uno al otro como acero-acero, pero no acero-aluminio o acero-latón. Cuando ocurre incompatibilidad entre los metales del casco y el cabezal, la práctica más común es usar cabezales bimetal, el metal requerido para el cabezal es colocado en la cara del lado tubo y el metal requerido para el barril del casco es colocado en la cara del lado casco.

Una solución alternativa es soldar una brida del mismo material del casco en cada extremo del casco, y atornillarlas a los cabezales utilizando los empaques apropiados.

Imagen 22. Placa porta tubo.



1. Tubo.
2. Carcasa.
3. Brida.
4. Placa portatubo.
5. Cubierta del canal.
6. Tornillo.
7. Cubierta del canal.

Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

La principal ventaja del intercambiador de placa porta tubo fija es la de no poseer juntas internas, esto elimina una fuente potencial de fugas entre un fluido y otro. Además, la ausencia de juntas internas permite para un diámetro de casco dado, acomodar el mayor número de tubos que en cualquier otro tipo de intercambiador de casco y tubos, proporcionando de esta manera una mayor área de transferencia de calor.

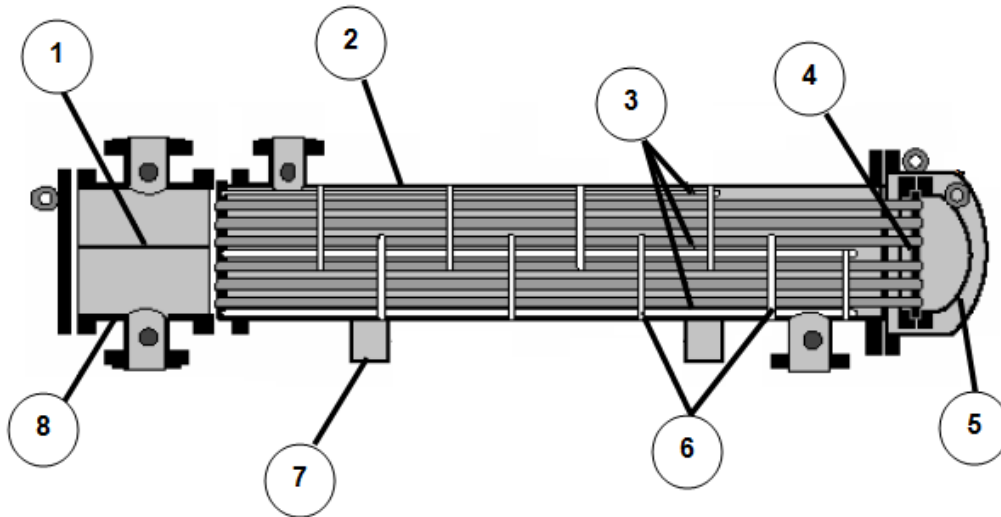
El intercambiador con placas porta tubos fijas es el diseño de más bajo costo por pie cuadrado de superficie de transferencia de calor, además este diseño puede ser intercambiable con otros intercambiadores fabricados del mismo tipo TEMA.

2.1.5.3 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE

Este tipo de intercambiador se caracteriza por tener una hoja de tubos fijas, mientras que la otra flota libremente permitiendo el movimiento diferencial entre la coraza y los tubos, este es el diseño indicado en servicios en los que la limpieza de tubos o su remplazo es frecuente. Hay dos tipos básicos de intercambiador de cabezal

flotante. Uno emplea un cabezal flotante (es decir deslizante) con o sin anillo seccionado. El otro usa una empaquetadura para permitir la expansión térmica, este se llama comúnmente intercambiador de cabezal flotante de unión empaquetada y no se usa en servicio con fluidos peligrosos o cuando las fugas pueden ser tóxicas. Hay numerosos subtipos de intercambiadores de cabezal flotante cuyas diferencias están en el diseño del cabezal de la cubierta. Los diseños de la cubierta apuntan a evitar y prevenir que se tuerza el cabezal o el haz de tubos, lo cual producirá fugas. Se requiere un maquinado preciso y un ensamble muy exacto, por lo tanto, esto genera un costo elevado de fabricación e instalación. Otros usan un anillo espaciador y un segundo anillo o abrazadera a 90° de la primera para obtener una unión más fuerte, el cabezal generalmente está sujeto por unas placas (Calahorrano Bangarrote, 2012).

Imagen 23. Intercambiador de cabezal flotante.



1. Separador de Paso. 2. Coraza. 3. Barras tirantes. 4. Espejo o Placa porta tubos. 5. Cabezal Flotante. 6. Baffles. 7. Silla de Soporte. 8. Cabezal Estacionario.

Fuente: Galvis, Albeiro; Pacheco, Danilo. Diseño de un intercambiador de calor coraza y tubos para optimizar el margen de refinación en la unidad de destilación combinada de la refinería de Cartagena (RCSA), 2014.

2.1.6. MÉTODOS DE DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CARCASA

Existen varios métodos importantes para el diseño de intercambiadores de calor: el LMTD (Log Mean Temperature Difference o Diferencia de Temperatura Media Logarítmica) y el NTU (Number of Transfer Units o Número de Unidades de Transferencia), el método de Kern, entre otros.

2.1.6.1 MÉTODO NTU

El método NTU es, básicamente, un método para el análisis de intercambiadores de calor. A través de él podemos analizar el comportamiento de un determinado intercambiador de calor (un equipo que ya está construido) bajo parámetros diferentes a los de diseño. En este método se utilizan varias curvas para la determinación de la relación entre la efectividad y los NTU (Cuadrado, Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica., 2010).

2.1.6.2 MÉTODO LMTD

El LMTD es un método de diseño. En él, con el conocimiento de las temperaturas de entrada y salida y el flujo másico de los fluidos es posible determinar el área de transferencia de calor siguiendo un procedimiento lógico. Considerando que lo que se desea es realizar el diseño, más no el análisis, de un intercambiador, se selecciona el método LMTD. Además, este método facilita la utilización de programas de computadora para realizar el diseño (Cuadrado, Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica., 2010).

Para efectos del presente proyecto, la metodología dada por el LMTD es la seleccionada para realizar el diseño.

2.1.6.3 MÉTODO DE KERN

En 1965, Donald Q. Kern publicó el libro Process Heat Transfer. En este libro el autor presenta un método para realizar los cálculos pertinentes a la construcción de un intercambiador de calor de tubo y coraza (Kern D. Q., 1999). Dicho método, junto con el LMTD son los considerados a desarrollar en este proyecto.

Nota aclaratoria: existen otros métodos para realizar el diseño de un intercambiador de calor de tubo y coraza, que se dejan a consideración del lector, pues no se usarán para el desarrollo de este proyecto.

2.2. MARCO LEGAL

El diseño de recipientes a presión, como el de la gran mayoría de los equipos para procesos industriales, se encuentra regido por normas y códigos. Para el caso de los intercambiadores tipo tubular, el código más empleado es el ASME que se encuentra constituido por un conjunto de normas, especificaciones, fórmulas de diseño y criterios que permite construir un equipo óptimo y eficiente para las características del proceso y operatividad en la planta, específicamente se manifiestan estos puntos en la sección VIII de la ASME en la división I.

La aplicación de dicho código, requiere un amplio criterio para la implementación correcta del mismo en el diseño. Asimismo, existen las normas TEMA (Tubular Exchangers Manufactures Association) cuya finalidad es regular los criterios de diseño y fabricación de intercambiadores de casco y tubos.

Todos los elementos que integran la construcción de intercambiadores de calor de tipo tubular, han sido objeto de una normalización publicada por TEMA, que especifica las características mecánicas y térmicas para el diseño del equipo correspondiente a las diversas condiciones de funcionamiento, por otra parte es importante indicar que la categoría o clase a emplear de este tipo de norma es la denominada CLASE R que corresponde a los requisitos de diseño, fabricación y materiales más estrictos de la norma TEMA teniendo en cuenta que se emplea para condiciones severas de operación , procesos de petróleo y sus derivados.

2.2.1. NORMAS DE UN INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CARCASA.

2.2.1.1 NORMA AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE “ANSI” B16.21

Recomienda las dimensiones para los diferentes tipos de empaques planos no metálicos utilizados para las diferentes clases de bridas atornilladas, tales dimensiones son el diámetro interior y exterior del empaque, número y diámetro de los barrenos o agujeros.

2.2.1.2 CÓDIGO AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS “ASME”

Especifica los materiales y normas para la construcción de recipientes a presión, en donde, el intercambiador de calor de tubo y coraza es considerado como un recipiente bajo presión interna. Del código ASME sección VIII división 1, se observan recomendaciones para la fabricación de algunos componentes del intercambiador de calor de coraza y tubo.

2.2.1.3 TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION “TEMA”

La norma más ampliamente utilizada para el diseño, fabricación y selección de materiales de un intercambiador de calor de tubo y coraza es la Standard of Tubular Exchanger Manufacturers Association, “TEMA”. Ésta norma cataloga a los intercambiadores de calor de tubo y coraza en tres clases, de acuerdo al proceso y a las condiciones de operación.

El diseño de intercambiadores de calor de casco y tubos se encuentra bastante estandarizado y es así como su construcción ya está muy bien establecida de acuerdo a procedimientos y recomendaciones estándares de algunas instituciones especializadas y de las mismas compañías fabricantes.

Dentro de este marco tenemos los siguientes:

1. Diseño térmico y mecánico: HEDH. Capítulos 3 y 4.
2. Diseño mecánico:
 - Normas ASME. Sección VIII. (Recipientes a presión).
 - Recomendaciones TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association).

2.2.1.3.1 MANUAL HEDH.

El manual HEDH establece métodos para el diseño de intercambiadores de calor que permiten realizar manualmente procesos para determinar todos los parámetros esenciales de construcción de un intercambiador, los cuales se diseñan para desempeñar una debida labor térmica.

En estos métodos se cuenta con criterios especificados o implícitos, tales como la facilidad en la limpieza y el mantenimiento, velocidades de flujo máximas o mínimas,

erosión, caídas de presión, limitaciones de tamaño o peso, expansión térmica, etc., esencialmente buenas prácticas de diseño.

2.2.1.3.2 DESCRIPCIÓN NORMA ASME-SECCIÓN VIII.

Las normas ASME- Sección VIII referente a recipientes a presión es un conjunto de reglas para el diseño, la fabricación, la inspección y pruebas de los recipientes a presión, que se encuentra dividido en tres subsecciones principales:

- Requerimientos Generales
- Procesos de fabricación
- Materiales

2.2.1.4 REQUERIMIENTOS GENERALES

Constituido por una serie de párrafos UG-xx donde se establecen los requerimientos referentes a las condiciones generales del diseño tales como las cargas a tener en cuenta en él, las fórmulas que establecen la manera de calcular los espesores requeridos en cada una de las configuraciones como se puede construir un recipiente cilíndrico tanto para presión interna como externa, los factores de seguridad, los procedimientos de prueba (UG-99) etc.

2.2.1.4.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Establece las consideraciones para la fabricación de recipientes a presión ya sea por soldadura o roblonado. Determina los tipos de junta que existen en un recipiente soldado y la categoría de dichas juntas (posición de la junta soldada dentro del recipiente) con el objeto de determinar la **eficiencia de la junta** como función de

dichas características y del tipo de examen que se haga a la soldadura (radiográfico o solo visual).

2.2.1.4.2 MATERIALES

Suministra una completa información acerca de los esfuerzos admisibles de acuerdo a la designación de los diferentes materiales normalizados que se utilizan en la fabricación de recipientes a presión tanto para aceros al carbón, aleados o inoxidable como materiales no-ferrosos.

2.2.1.4.3 RECOMENDACIONES TEMA

Las recomendaciones TEMA, como su nombre lo indica no son de obligado cumplimiento, se refieren a una serie de consideraciones para el diseño y la fabricación de intercambiadores tubulares producto de la experiencia de los fabricantes a lo largo de los años. Considera aspectos como los tipos y la designación más comúnmente utilizados en la construcción de intercambiadores de calor tubulares y la clase de aplicación que se da al intercambiador de acuerdo a la severidad del servicio, encontrándose tres clases denominadas:

Clase R: Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase R, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para requerimiento generalmente riguroso en la industria del petróleo y procesos relacionados.

Clase C: Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase C, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para los requerimientos normalmente moderados de procesos comerciales y aplicaciones generales, buscando obtener el máximo de economía.

Clase B: Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase B, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para el servicio de los procesos de la industria química.

De acuerdo a la clase de servicio se dan recomendaciones específicas para la selección, diseño y consideraciones especiales de cada una de las partes de un intercambiador, entre las cuales maneja:

- R-1 Aplicación y requerimientos generales.
- R-2 Tubos
- R-3 Cascos y cubiertas de casco
- R-4 Baffles y placas soporte
- R-5 Cabezales flotantes
- R-6 Empaques
- R-7 Placas portatubos (Tubesheet)
- R-8 Canales, cubiertas y campanas
- R-9 Boquillas
- R-10 Bridas y aperturamiento.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

API: American Petroleum Institute es una organización que se encarga de la elaboración de normas en el área de toda la industria del petróleo y el gas natural.

AREA DE TRANSFERENCIA: Es el área o superficie por donde transita el calor debido a un gradiente de temperatura entre el sistema y el entorno.

ASME: American Society of Mechanical Engineers es un conjunto de normas, especificaciones, fórmulas de diseño y criterios basados en muchos años de experiencia, todo aplicado al diseño, fabricación, instalación y recipientes sujetos a presión.

CAIDA DE PRESIÓN: Es la pérdida de presión de un fluido desde un punto inicial a uno final cuando fluye por una tubería debido a factores como la fricción, accesorios entre otros aspectos operativos.

CALOR: Es la energía transferida a través de una frontera de un sistema debido a la diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno del sistema, los sistemas no contienen calor, contienen energía, y el calor es una energía en tránsito.

CALOR LATENTE: Es la cantidad de energía necesaria para comunicar en forma de calor a una sustancia que se mantiene a presión constante para que cambie de fase.

CALOR SENSIBLE: Es la cantidad de energía necesaria para comunicar en forma de calor a una sustancia que se mantiene a presión constante para que varíe su temperatura sin que haya cambio de fase.

COEFICIENTE DE CONVECCIÓN: Es una función de la geometría del sistema, de las propiedades del fluido, de la velocidad del flujo y de la diferencia de temperaturas.

CONDUCCIÓN: Es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región alta de temperatura o a otra de baja temperatura dentro de un medio (sólido, líquido y gaseoso), o entre medios diferentes que estén en contacto físico directo. La energía

se transmite por comunicación molecular sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

CONVECCIÓN: Es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida, líquido o gas.

FLUJO LAMINAR: Es un flujo que tiene un movimiento ordenado, en el que las partículas del fluido se mueven en líneas paralelas (capas), sin que se produzca mezcla de la materia entre las distintas capas.

FLUJO MÁSIKO: Se llama flujo másico a la cantidad de masa que atraviesa una determinada superficie cada segundo y tiene unidades Kg/s, Lb/s.

FLUJO TURBULENTO: Es un flujo que tiene un movimiento caótico, desordenado con mezcla intensiva entre las distintas capas.

HAZ DE TUBOS: Es el elemento formado por un conjunto de tubos, situado en el interior de la coraza y orientado paralelamente a ella.

LADO CORAZA: Es llamado de esa forma al conducto por donde circula el fluido que pasa por interior de los tubos de transferencia.

LADO TUBOS: Es llamado de esa forma a los conductos por donde circula el fluido que baña a los tubos de transferencia.

LMTD: Logarithmic mean temperature difference, Diferencia de Temperatura Media Logarítmica, se usa para determinar la fuerza que impulsa la transferencia de calor en sistemas de flujo, particularmente en intercambiadores de calor.

NUSSELT: El número de nusselt (Un) es un numero adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre o fluye (por convección) comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción.

PELIGRO: Fuente, situación o acto con potencial de daño en términos de enfermedad o lesión a las personas, o una combinación de estos.

PRANDTL: El número de prandtl (Pr) es un numero adimensional proporcional al cociente entre la difusividad del momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

RADIACIÓN: Es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a uno de baja temperatura, cuando estos están separados por un espacio, incluso puede ser el vacío.

REYNOLDS: El Reynolds es un numero adimensional definida como la relación entre los términos conectivos y los términos viscosos de la ecuación de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos.

RIESGO: Es la probabilidad de ocurrencia de un evento que atente contra la integridad física, mental y/o social del sujeto expuesto causando accidente o enfermedad.

SEGURIDAD INDUSTRIAL: Es la disciplina que se encarga de la conservación de la salud de la empresa (Industria).

TEMA: Tubular Exchangers Manufacturers Association es una norma internacional que tiene como finalidad regular los criterios de diseño y fabricación de los intercambiadores de casco y tubos.

2.4. MARCO AMBIENTAL

2.4.1. *REGLAMENTO TÉCNICO DE CALDERAS Y RECIPIENTES DE CALOR, LEY 9ª de 1987.*

A la nación, en cumplimiento del artículo 2 de la Constitución Nacional, le corresponde velar por la Seguridad de los ciudadanos y por el cumplimiento del anterior reglamento.

La Ley 9ª de 1987 en su artículo 113, establece que “Las calderas, cilindros para gases comprimidos y otros recipientes sometidos a presión, sus accesorios y aditamentos deberán ser diseñados, construidos y operados de acuerdo con las normas y regulaciones técnicas y de seguridad que establezcan las autoridades competentes (Ministerio de Minas y Energía, 2014)”.

Los Ministerios de Protección Social y de Minas y Energía son las autoridades competentes para expedir la regulación de seguridad y técnica para las calderas. Este reglamento representa un medio adecuado para regular la instalación, operación y mantenimiento de las calderas, para poder brindar protección y seguridad a las personas, a los equipos y el medio ambiente.

Entre otras, el reglamento contempla las siguientes disposiciones generales:

- a) Proteger la vida, la salud y la seguridad humana, animal y vegetal.
- b) Proteger el medio ambiente.
- c) Prevenir prácticas que puedan inducir a error al usuario.
- d) Defensa del usuario.
- e) Seguridad nacional en el sentido fomentar el Uso racional y Eficiente de la Energía.

2.4.2. MINISTERIO DEL TRABAJO Y DE MINAS Y ENERGÍA. BORRADOR REGLAMENTO TÉCNICO DE CALDERAS Y RECIPIENTES DE CALOR. RESOLUCIÓN 2014.

El objetivo básico del Sistema General de Riesgos Laborales es la promoción de la salud ocupacional y la prevención de los riesgos laborales, con el fin de evitar accidentes de trabajo y enfermedades laborales. Este reglamento representa un medio adecuado para regular la instalación, operación y mantenimiento de las calderas y recipientes de alta presión.

El (ministerio de minas y energía, 2014), en su artículo 1 del reglamento técnico de calderas y recipientes afirma que la función del presente reglamento es:

Establecer los requisitos que deben cumplir las calderas y elementos de calor con sus instalaciones y espacios complementarios así como los de sus principales componentes, sistemas de control y seguridad, sus equipos auxiliares y, tales requisitos están orientados a proteger la vida, la salud y la seguridad de los trabajadores, la protección de la vida y la salud humana, protección de la vida animal y vegetal, preservación del medio ambiente, y la prevención de prácticas que puedan inducir a error al usuario. El reglamento técnico de calderas y sistemas de calor, pretende eliminar, prevenir, o controlar, los riesgos presentes en el uso de calderas, mediante el

establecimiento de especificaciones técnicas, con carácter obligatorio a través de disposiciones, relativas a requerimientos mínimos de diseño, materiales, dispositivos de control y seguridad, accesorios, construcción, requisitos de instalación y operación, mantenimiento y reparaciones, así como las inspecciones y pruebas a las que se deben someter estos equipos para demostrar la conformidad con el presente reglamento. (p.2) (MINISTERIO DEL TRABAJO Y DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA, 2018)

- **Campo de aplicación**

El reglamento técnico de calderas y recipientes de calor aplica para las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que tengan o pretendan tener en funcionamiento calderas, equipos auxiliares o tuberías sujetas a presión. De igual manera aplica para las personas naturales o jurídicas que emitan documentos de conformidad con el presente reglamento, en los productos o en el funcionamiento y seguridad de las calderas. Las calderas nuevas o usadas, rehabilitadas, reparadas o repotenciadas de instalación fija, temporal, convertidas, eléctricas o móviles que se instalen en la república de Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

3.1. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se adoptó una metodología de tipo experimental, toda vez que se deben manipular los valores de diversas variables tales como el número de pasos del fluido por los tubos, la longitud y diámetro de la tubería, de manera que se pueda evidenciar los cambios provocados por estas manipulaciones en otras variables involucradas en el diseño y la construcción de un intercambiador de calor.

Teniendo en cuenta que los datos obtenidos son numéricos, esta investigación tendrá también un enfoque metodológico cuantitativo de manera que se puedan desarrollar los objetivos específicos planteados en este trabajo.

Para el desarrollo de la investigación, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- **ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN**

Durante el desarrollo de esta etapa se recopiló el material bibliográfico y la información necesaria relacionada con el diseño, el modelamiento y la construcción de intercambiadores de calor.

Lo anterior, para adquirir afianzamiento académico que permita determinar cada uno de los pasos y de los cálculos que se deben llevar a cabo para lograr el objetivo general y los objetivos específicos de este proyecto de investigación. La documentación se llevó a cabo de repositorios universitarios, libros, apuntes de clase, manuales y trabajos de grado de diversas universidades.

- **ETAPA 2: PARAMETRIZACIÓN DEL BANCO GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Teniendo en cuenta que el trabajo de investigación consiste en la realización del diseño, modelamiento y construcción de un intercambiador de calor de coraza y tubo, los parámetros iniciales de construcción fueron tomados del trabajo de grado que respalda el banco construido y ubicado en las Unidades Tecnológicas de Santander, Regional Barrancabermeja (Caballero Tapias, Pardo Gómez, & Sánchez Tobón, 2017).

Durante esta etapa se definieron cada uno de los parámetros que ha de cumplir el diseño realizado en la presente investigación. De igual manera, de acuerdo a los valores de los parámetros iniciales, a medida que se aplique el proceso matemático, se obtendrán otros valores considerados iniciales, teniendo en cuenta los fluidos con los que se realizará el proceso de intercambio de calor, que para este caso son agua por ambos lados.

Algunos de los parámetros iniciales son:

- Temperatura inicial del agua lado tubo.
- Temperatura inicial del agua lado casco.
- Flujo másico del agua caliente.
- Flujo másico del agua fría.
- Tipo de trayectoria de los fluidos en el intercambiador (flujo paralelo, cruzado o contraflujo).
- Cantidad de pasos por los tubos.
- Caídas de presión permitidas.

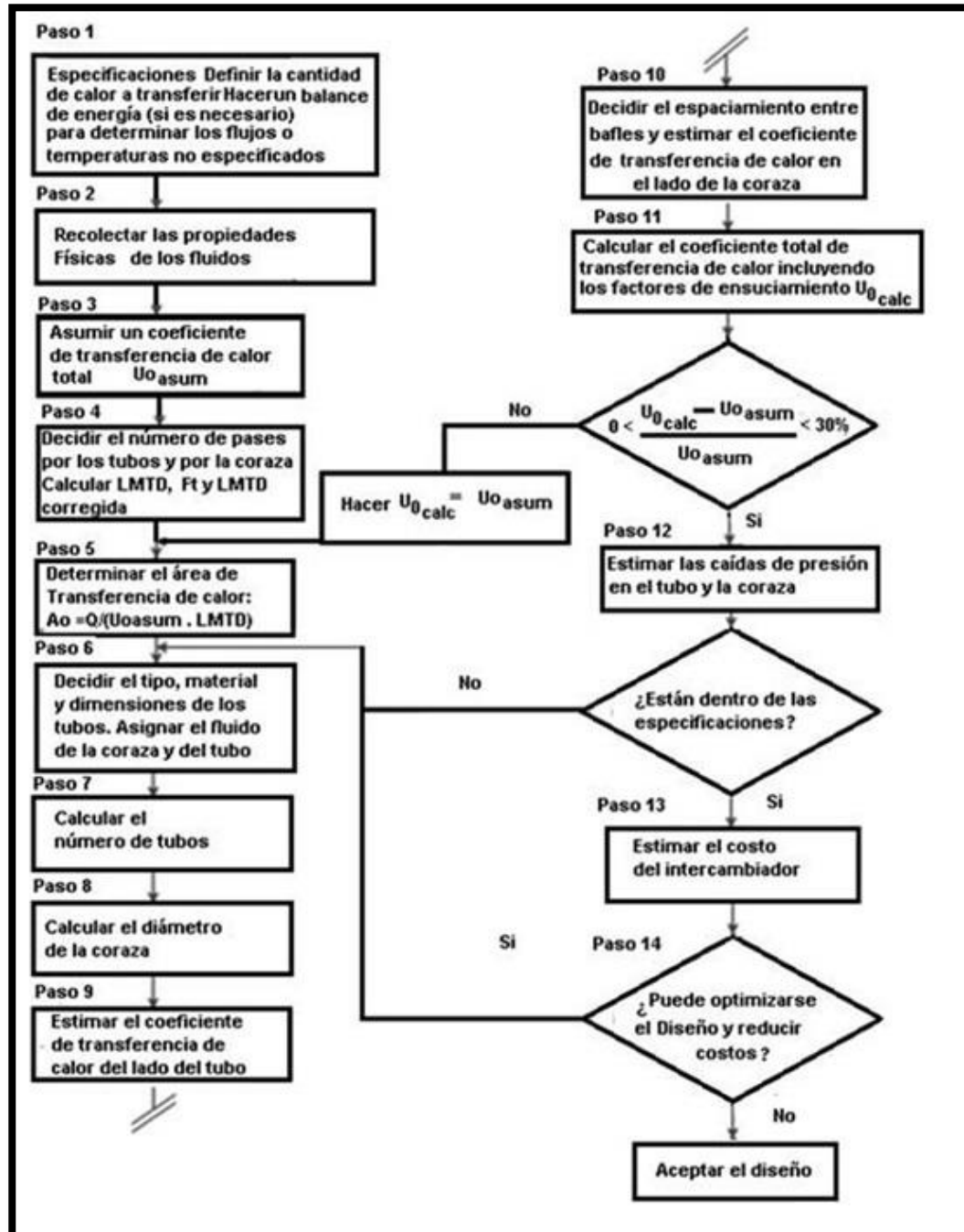
- **ETAPA 3: DESARROLLO DEL DISEÑO TÉRMICO, HIDRÁULICO Y MECÁNICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORASA**

De acuerdo a la serie de ecuaciones matemáticas obtenidas en la primera etapa, y a los valores obtenidos en la parametrización, se aplicará el procedimiento para dimensionar el intercambiador de calor de coraza y tubo, desde su diseño térmico, hidráulico y mecánico, mediante la variación experimental de diferentes variables tales como el diámetro de los tubos, la cantidad de pasos por los tubos, la longitud de los misma y los arreglos de ellos.

Los diseños térmico e hidráulico del intercambiador de calor se realizarán aplicando el método de Kern, que, usando las propiedades físicas de los fluidos involucrados en el proceso, permite determinar el valor de variables como el coeficiente de transferencia de calor global y las pérdidas de presión en el lado casco y el lado tubo.

En la Imagen 24, se puede ver el procedimiento necesario para el dimensionamiento térmico e hidráulico del intercambiador de calor. Determinadas las características necesarias para que el diseño cumpla con los parámetros establecidos, se procederá a realizar el diseño mecánico, el cual consiste en la determinación de los espesores, los diámetros y las longitudes que requieren las diferentes piezas que hacen parte del intercambiador de calor, de tal manera que cumplan con la resistencia necesaria para soportar las diferentes presiones y temperaturas a las que estarán sometidas.

Imagen 24. Diagrama para el dimensionamiento de un intercambiador de calor.



Fuente: Rodríguez, Maida. Automatización y optimización del diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza mediante el método Taborek.

- **ETAPA 4: MODELAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORASA**

Usando los softwares ASPEN ONE y SOLIDWORK, se realizará el respectivo modelamiento del intercambiador de calor cuyo diseño se obtuvo en las etapas anteriores.

El uso de APEN ONE permite verificar que lo obtenido se verifique, pues este es un software especializado en el diseño de este tipo de intercambiadores, además de obtener los planos, las dimensiones y visualizar la configuración de los tubos y otros componentes del mismo.

- **ETAPA 5: CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORASA**

A partir de los resultados obtenidos en los cálculos y las simulaciones realizadas, se procederá a construir dicho intercambiador de calor, con la coraza en acrílico transparente, con el fin de hacer que el proceso interno se pueda visualizar.

3.2. ETAPA 1: DOCUMENTACIÓN

3.2.1. DISEÑO TÉRMICO

El diseño de un intercambiador de calor se basa en los principios fundamentales establecidos en el estudio de la transferencia de calor, las leyes de la termodinámica y la mecánica de fluidos. Según Burbano (2014, pág. 38), para realizar el diseño térmico es necesario hacer el análisis termodinámico del intercambiador de calor de carcasa y tubos, de manera tal que se pueda establecer la tasa de transferencia de calor y la diferencia de temperatura media logarítmica. Para poder determinar el área de transferencia de calor se necesita encontrar el coeficiente global de transferencia de calor, este coeficiente se da en términos de la resistencia térmica total a la transferencia de calor entre dos fluidos, lo cual implica la resistencia de conducción y convección que haya lugar. Lo anterior depende de las características de los flujos, las propiedades de los fluidos, dimensiones de los conductos, entre otros que hacen de este diseño un proceso de cálculos iterativos.

3.2.1.1 Parámetros para el diseño térmico

A continuación se presentan los aspectos a tener en cuenta para el diseño de un intercambiador de carcasa y tubos, dados por (Gonzalez, s.f):

3.2.1.1.1 Selección de la tubería

Para seleccionar la tubería se deben tener en cuenta tres aspectos: diámetro, longitud y coeficiente de convección.

Al seleccionar diámetros pequeños para la tubería se logran construcciones económicas, pequeñas y compactas, pero estas tienden a ensuciarse de manera

rápida, necesitando mantenimiento permanente que se dificulta por las mismas características mencionadas; Si se seleccionan tubos con un diámetro mayor, la construcción no será ni pequeña ni compacta, pero aumentará el costo.

Para seleccionar la longitud de los tubos, se debe tener en cuenta que los diseños más económicos son los de tuberías de un diámetro pequeño y grandes longitudes debido a que para obtener la misma área de transferencia de calor, entre más largo es el tubo, se la tubería tiene un menor diámetro.

Para este tipo de intercambiador se consideran dos tipos de tubería: lisa y aletada. Para seleccionar la adecuada, se debe tener en cuenta que cuando el coeficiente de convección en el exterior de los tubos resulta mucho menor que en el interior de los mismos, se sugiere hacer uso de tuberías aletadas, en caso contrario, se sugiere tubería lisa, pero, el costo de la tubería aletada es 50 a 70% mayor que el de la tubería lisa, lo que incrementa significativamente los costos. Se debe también tener en cuenta que para poder hacer uso de tuberías aletadas el factor de ensuciamiento en el lado de la coraza no debe ser mayor a $0,003 h \cdot ft^{2\circ}f/Btu$.

3.2.1.1.2 Numero de pasos por la tubería

Para seleccionar el número de pasos lado tubo del fluido se puede seleccionar desde 2 hasta 8 pasos. Si se trabaja con valores fuera de este rango la construcción se dificulta y se incrementa el costo del intercambiador.

3.2.1.1.3 Numero de tubos

El número de tubos que se puede alojar en una determinada carcasa depende de factores tales como: el diámetro de las boquillas, el sistema de fijación de los tubos, el uso de cabezales flotantes que puede reducir el límite exterior de los tubos y el

número de pasos por los tubos, debido a que no se puede insertar tubería en los espacios ocupados por las particiones de los mismos, entre otros.

3.2.1.1.4 Arreglo de la tubería

Se deben seleccionar un arreglo de acuerdo a las características de los fluidos del proceso. En general, el espaciado o “Pitch” de la tubería no debe ser mayor a 1,25 veces el diámetro de la misma; en casos en los que se manejan fluidos muy limpios y tubos de pequeño diámetro, se puede reducir el “Pitch” a 1,20 veces el diámetro de la tubería empleada. Para obtener haces de tubos compactos, se recomienda utilizar ángulos de 30° o 60°, ya que permiten acomodar un 15% más de tubos que los demás arreglos.

El uso de arreglos cuadrados está limitado a intercambiadores de calor con un factor de ensuciamiento en el lado de la coraza superiores a $0,002 \text{ h.ft}^2.\text{°f}/\text{Btu}$ o cuando se requiere realizar limpieza mecánica externa.

El arreglo de tubos para haces removibles puede ser cualquiera de los anteriormente mencionados, aunque generalmente se usa el arreglo triangular de 30°.

3.2.1.1.5 Disposición de los fluidos

Para asignar que fluido será lado tubo y cuál será lado carcasa, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El fluido más corrosivo debe hacerse circular por el interior de la tubería, con el fin de evitar la corrosión de todo el intercambiador.

- Los fluidos con un alto factor de ensuciamiento es recomendable ubicarlos dentro de los tubos, ya que se puede modificar la velocidad de los mismos con el fin de reducir este efecto.
- Los fluidos con menor pérdida de presión admisible deben ser alojados dentro de los tubos.
- El fluido con mayor viscosidad debe ser colocado fuera de los tubos con el fin de obtener altos coeficientes de transferencia al crearse una mayor turbulencia.
- El fluido con menor flujo másico es recomendable alojarlo fuera de los tubos para que sea sometido a una mayor turbulencia y de esta manera mejorar el coeficiente global de transferencia de calor.

3.2.2. DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico permite conocer la caída de presión del fluido tanto en la coraza como en los tubos, asegurando que estos se encuentren dentro de los rangos permisibles para el correcto funcionamiento del equipo. Para evaluar el diseño hidráulico se debe contar con las caídas de presión admisibles tanto para la coraza como para los tubos y estos valores no deben superar bajo ninguna circunstancia los valores admisibles (Llangari & Solis, 2012).

A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas para la realización del diseño hidráulico de la presente investigación, más exactamente, las requeridas para calcular tanto la caída de presión en la tubería, como en la coraza.

3.2.2.1 Caída de presión en la tubería (ΔP_i)

Factor de fricción

$$f = 0.4137Re^{-0.2585} \quad (1)$$

Numero de Reynolds

$$\#Re = \frac{4m n_p}{\mu D_i n_t \pi} \quad (2)$$

Densidad de flujo másico

$$G = \frac{m \left(\frac{n_p}{n_t} \right)}{\frac{\pi (D_i)^2}{4}} \quad (3)$$

Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = \frac{f n_p L G^2}{7.50 \times 10^{12} D_i s} \quad (4)$$

Perdidas menores

$$\Delta P_r = \frac{1.334 \times 10^{-13} (2n_p - 1.5) G^2}{s} \quad (5)$$

Perdidas por las boquillas

$$\Delta P_n = \left(\frac{2 \times 10^{-13} N_s (G_n)^2}{s} \right) \quad (6)$$

Donde:

$$G_n = \frac{m}{\frac{\pi(D_n)^2}{4}} \quad (7)$$

$N_s =$ Numero de boquillas

Caída total de presión en los tubos

$$\Delta P_i = \Delta P_f + \Delta P_r + \Delta P_n \quad (8)$$

3.2.2.2 Caída de presión en la carcasa (ΔP_o)

Factor de fricción

$$f = 144 \left[f_1 - 1.25 \left(1 - \frac{B}{d_s} \right) (f_1 - f_2) \right] \quad (9)$$

Donde:

$$f_1 = (0.0076 + 0.000166d_s)Re^{-0.125} \quad (10)$$

$$f_2 = (0.0016 + 5.8 \times 10^{-5}d_s)Re^{-0.157} \quad (11)$$

Perdidas por fricción

$$\Delta P_f = \frac{fG^2d_s(n_b + 1)}{7.50 \times 10^{12}d_e s} \quad (12)$$

Donde:

$$n_b + 1 = \frac{L}{B} \quad (13)$$

Caída de presión total en la carcasa

$$\Delta P_o = \Delta P_f + \Delta P_n \quad (14)$$

3.2.3. DISEÑO MECÁNICO

Para cada componente del intercambiador, como la coraza, placas y tubos se deben analizar las tensiones, fuerzas y deformaciones a las que están sometidos. Burbano (2014) afirma:

Además de calcular los espesores de la coraza y sus demás componentes, se debe verificar el espesor de pared de los tubos seleccionados en el diseño térmico para posteriormente calcular los elementos sujetos a presión y realizar el dimensionamiento de los no sujetos a presión (p.36).

A continuación, se muestran las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos para determinar el área de transferencia de calor, el diámetro y espesor de la carcasa, así como el diámetro externo, espesor, longitud de los tubos, número de tubos.

3.2.3.1 Espesor de la carcasa

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (15)$$

$$t_2 = \frac{PR}{2SE - 0,4P} \quad (16)$$

$t_1 = \text{Espesor requerido [mm]}$

$t_2 = \text{Espesor requerido [mm]}$

$P = \text{Presion interna de diseño [pa]}$

$R = \text{Radio interno de la coraza [mm]}$

$S = \text{Esfuerzo disponible del material [pa]}$

$E = \text{Eficiencia de la junta}$

3.2.3.2 Espesor de la tubería

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (17)$$

$P = \text{Presion interna de diseño}$

$R = \text{Radio interno de la tubería}$

$S = \text{Esfuerzo disponible del material}$

$E = \text{Eficiencia de la junta}$

3.2.3.3 Diámetro interno de la tubería

$$D_{it} = D_{et} - 2t_t \quad (18)$$

$D_{it} = \text{Diametro interno tubería}$

$D_{et} = \text{Diametro exterior tubería}$

$t_t = \text{Espesor de pared del tubo}$

3.2.3.4 Espesor de los espejos

$$T = \frac{FG}{2} \cdot \sqrt{\frac{P}{S}} \quad (19)$$

$T = \text{Espesor efectivo [mm]}$

$F = \text{Constante del tipo de espejo}$

$G = \text{Diametro medio del empaque [mm]}$

$P = \text{Presion de diseño [pa]}$

$S = \text{Esfuerzo disponible del material [pa]}$

3.2.3.5 Espesor de las tapas

$$T = \frac{0.885PD}{SE - 0.1P} \quad (20)$$

$P = \text{Presion interna de diseño}$

$D = \text{Diametro interno de la tapa}$

$S = \text{Esfuerzo disponible del material}$

$E = \text{Eficiencia de la junta soldada}$

3.2.3.6 Área de intercambio de calor

$$A = \frac{q}{U_{est} \cdot F \cdot LMTD} \quad (21)$$

$q = \text{Tasa de transferencia de calor}$

$U_{est} = \text{Coeficiente de transferencia de calor estimado}$

$F = \text{Factor de correccion}$

$LMTD = \text{Diferencia de temperatura logaritmica}$

3.2.3.7 Numero de tubos

$$\#tubos = \frac{A}{\pi \cdot \Phi_{ext} \cdot L} \quad (22)$$

$A = \text{Area de transferencia requerida}$

$\Phi_{ext} = \text{Diametro externo de la tuberia}$

$L = \text{Longitud de la tubería}$

3.2.4. SUMINISTRO DE LOS FLUIDOS

- **Agua lado tubo:**

Para el suministro de agua lado tubo hacia el intercambiador de calor, se utilizarán los datos provenientes de una electrobomba marca STANPROF QB 60, cuya potencia es de 0,5 HP con un caudal máximo de $35 \frac{L}{min}$, y una altura máxima de 35m (114,83ft).

La presión de descarga se obtendrá de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_d = \frac{H \cdot S_g}{2,31} = \frac{114,83ft \cdot 0,9779}{2,31} = 48,6 \text{ Psi}$$

Donde

$P_d = \text{Presión de descarga}$

$H = \text{Altura de la bomba}$

$S_g = \text{Gravedad específica del fluido en la bomba}$

A continuación, en la Imagen 25 se puede observar la placa de la bomba anteriormente referenciada:

Imagen 25. Placa bomba STANPROF



Fuente: Autoras

- **Agua lado coraza:**

Para el suministro de agua lado coraza hacia el intercambiador de calor, se utilizarán los datos provenientes de una electrobomba marca pEDROLLO CPM 600, cuya potencia es de 0,5 HP con un caudal mínimo de $10 \frac{L}{min}$ y máximo de $80 \frac{L}{min}$, y una altura máxima de 22m (72,18ft).

La presión de descarga será, entonces:

$$P_d = \frac{H \cdot S_g}{2,31} = \frac{72,18ft \cdot 0,9979}{2,31} = 31,18 Psi$$

A continuación, en la Imagen 26 se puede observar la placa de la bomba anteriormente referenciada:

Imagen 26. Placa bomba pEDROLLO



Fuente: Autoras

3.2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Cuando se va a realizar el diseño de un intercambiador de calor es muy importante conocer los métodos de análisis existentes, con el fin de facilitar la obtención de datos y de esta manera lograr avanzar de forma más eficiente en el diseño del intercambiador. A continuación, se describen algunos de estos métodos:

3.2.5.1 Método por factor de corrección en la temperatura media logarítmica (LMTD)

Este método resulta el más adecuado para lograr determinar el tamaño de un intercambiador de calor siempre y cuando se conozcan todas las temperaturas de entrada y salida, así como el flujo másico de los fluidos. De esta manera se logra

calcular el área de transferencia y posteriormente el coeficiente global de transferencia de calor. En este método la razón de transferencia de calor se determina por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (23)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (24)$$

Donde:

ΔT_{ml} = Diferencia de temperatura media logarítmica

ΔT_1 y ΔT_2 = Diferencia de temperatura en dos extremos del intercambiador

Q = Transferencia de calor

U = Coeficiente global de transferencia de calor

A = Área

Cuando $\Delta T_1 = \Delta T_2$, la diferencia de temperatura media logarítmica es $\Delta T_{ml} = \Delta T_1 = \Delta T_2$. Aunque este método permite calcular directamente el área de transferencia dadas las temperaturas de entrada y salida, tiene una limitación clave y es que a la hora de calcular las temperaturas de salida dados U y las temperaturas de entrada requiere de un proceso iterativo, para esto superar esta limitación se creó el método NTU (Jaramillo O. , 2007).

Para los cálculos requeridos se usan las ecuaciones presentadas a continuación:

3.2.5.1.1 Temperatura media logarítmica flujo contracorriente

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_i - t_o) - (T_o - t_i)}{\ln\left(\frac{T_i - t_o}{T_o - t_i}\right)} \quad (25)$$

3.2.5.1.2 Temperatura media logarítmica flujo paralelo

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_i - t_i) - (T_o - t_o)}{\text{Ln} \left(\frac{T_i - t_i}{T_o - t_o} \right)} \quad (26)$$

Donde:

T_i = Temperatura caliente a la entrada

T_o = Temperatura caliente a la salida

t_i = Temperatura fría a la entrada

t_o = Temperatura fría a la salida

3.2.5.1.3 Factor de corrección

Para determinar el factor de corrección de la temperatura media logarítmica se deben calcular inicialmente algunos valores adicionales.

$$R = \frac{T_i - T_o}{t_o - t_i} \quad (27)$$

$$P = \frac{t_o - t_i}{T_i - t_i} \quad (28)$$

Para $R \neq 1$ el factor de corrección se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{\sqrt[2]{R^2 + 1} \text{Ln} \left(\frac{1 - R}{1 - RS} \right)}{(R - 1) \text{Ln} \left(\frac{2 - S(R + 1 - \sqrt[2]{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt[2]{R^2 + 1})} \right)} \quad (29)$$

Donde:

$$S = \frac{\alpha - 1}{\alpha - R} \quad (30)$$

$$\alpha = \left(\frac{1 - RP}{1 - P}\right)^{\frac{1}{N}} \quad (31)$$

$N =$ Numero de pasos por la carcaza

Para $R = 1$ se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{S^2 \sqrt{2}}{(1 - S) \text{Ln} \left(\frac{2 - S(2 - \sqrt{2})}{2 - S(2 + \sqrt{2})} \right)} \quad (32)$$

Donde:

$$S = \frac{P}{N - (N - 1)P} \quad (33)$$

3.2.5.1.4 Coeficiente convectivo en los tubos

$$h_i = \frac{Nu k}{D_i} \quad (34)$$

Donde:

$$\text{Numero de nussel } [Nu] = 0,023 Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (35)$$

$$\text{Numero de Reynolds} = \frac{4m n_p}{\mu D_i n_t \pi} \quad (36)$$

$$\text{Prandtl } [Pr] = C_p \frac{\mu}{K} \quad (37)$$

$m =$ Flujo masico

$n_p =$ Numero de pasos por los tubos

$n_t =$ Numero de tubos

$D_i =$ Diametro interno de la tuberia

$K =$ Coeficiente de resistencia del fluido en los tubos

$\mu =$ Viscosidad dinamica del fluido en los tubos

3.2.5.1.5 Coeficiente convectivo en la carcasa

$$h_o = j_H \left(\frac{K}{D_e} \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (38)$$

Donde:

$$j_H = 0.5 \left(1 + \frac{B}{d_s} \right) (0.08Re^{0.6821} + 0.7Re^{0.1772}) \quad (39)$$

$B =$ Espacio entre bafles

$d_s =$ Diametro interno de la carcasa

$\mu_w =$ Viscosidad a la temperatura de pared

3.2.5.1.6 Coeficiente de transferencia de calor requerido

$$U_{req} = \frac{q}{AF(\Delta T_{ln})} \quad (40)$$

3.2.5.1.7 Coeficiente de transferencia de calor limpio

$$U_c = \left[\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2K_{fluido}} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (41)$$

3.2.5.1.8 Coeficiente de transferencia de calor con factor de ensuciamiento

$$U_D = \left(\frac{1}{U_c} + R_D \right)^{-1} \quad (42)$$

3.2.5.1.9 Factor de ensuciamiento

$$R_D = R_{Di} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + R_{Do} \quad (43)$$

R_{Di} = Factor de ensuciamiento requerido dentro de los tubos

R_{Do} = Factor de ensuciamiento requerido en el lado de la carcasa

3.2.5.2 Método NTU

Este método permite calcular las temperaturas de salida directamente, usando A, U, y las temperaturas de entrada como parámetros. “Como en el método anterior la deducción del método NTU se basa en asumir U constante en el balance de energía de un intercambiador de calor” (Carrero, 2008, pág. 21).

Para utilizar el método NTU es necesario definir la efectividad. Esta corresponde al cociente entre el valor realmente intercambiado y el máximo que podría transferirse en un intercambiador de área infinita y flujo contracorriente (Reyes, pág. 4).

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{máximo}} \quad (44)$$

Donde:

$$Q_{máximo} = m_h C p_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \text{ si } m_h C p_h < m_c C p_c \quad (45)$$

$$Q_{máximo} = m_c C p_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \text{ si } m_c C p_c < m_h C p_h \quad (46)$$

Por tanto, la efectividad será:

$$\varepsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \text{ si } m_h * Cp_h < m_c * Cp_c \quad (47)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \text{ si } m_c * Cp_c < m_h * Cp_h \quad (48)$$

El NTU es un parámetro adimensional usado para el análisis de intercambiadores de calor y se define como:

$$NTU = \frac{U * A}{(m * Cp)_{min}} \quad (49)$$

Por otro lado, se define el coeficiente de capacidad (Cr)

$$Cr = \frac{(m * Cp)_{max}}{(m * Cp)_{min}} \quad (50)$$

Ahora expresando ε en función de Cr y NTU se obtiene:

- **Para flujo paralelo**

$$NTU = \frac{1}{\frac{C_{min}}{C_{max}} + 1} \ln \frac{1}{1 - (\frac{C_{min}}{C_{max}} + 1)\varepsilon} \quad (51)$$

- **Para flujo contracorriente**

$$NTU = \left(\frac{1}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}} \right) \ln \left(\frac{1 - \epsilon \frac{C_{min}}{C_{max}}}{1 - \epsilon} \right) \quad (52)$$

Donde:

$T_{c,i}$ = Temperatura de entrada del liquido frio en °C

$T_{c,o}$ = Temperatura de salida del liquido frio en °C

$T_{h,i}$ = Temperatura de entrada del liquido caliente en °C

$T_{h,o}$ = Temperatura de salida del liquido caliente en °C

Cp_h = Calor especifico del liquido caliente en $\frac{J}{Kg.K}$

Cp_c = Calor especifico del liquido frio en $\frac{J}{Kg.K}$

C_{min} = Capacidad calorifica minima

C_{max} = Capacidad calorifica maxima

3.2.5.3 Método de Kern

Este método no tiene en cuenta las corrientes secundarias y está limitado a intercambiadores 1-2 con deflectores segmentados con 25% de corte. Es un método sencillo y ampliamente usado al arrojar datos precisos en el cálculo del coeficiente de transferencia, sin embargo sus datos de caída de presión en la carcasa son muy imprecisos (Toro, 2013, pág. 186).

Las ecuaciones que permiten la realización de los cálculos por este método son las siguientes:

- **Calculo del diámetro equivalente en paso triangular**

$$Deq = \frac{3,464p^2}{\pi d_e} - d_e \quad (53)$$

Donde

p = paso entre los tubos

d_e = diametro de los tubos

- Calculo del diámetro equivalente en paso cuadrado

$$Deq = \frac{4p^2}{\pi d_e} - d_e \quad (54)$$

p = paso entre los tubos

d_e = diametro de los tubos

- Calculo de la velocidad másica transversal

$$G_{ct} = \frac{M}{act} \quad (55)$$

act = area de paso transversal

M = caudal masico

- Calculo de área transversal

$$ac_T = \alpha B \frac{D_c}{p} (p - d_e) \quad (56)$$

B = espaciado entre deflectores

α = 1, en paso cuadrado y triangular normal

α = $\frac{2}{3^{\frac{1}{2}}}$, en paso triangular invertido

α = $\frac{1}{2^{\frac{1}{2}}}$, en paso cuadrado invertido

- Calculo del coeficiente externo

$$\frac{h_e Deq}{k} = 0,36 Re m^{0,55} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14} \quad (57)$$

$$Re m = \frac{Deq G c_T}{\mu} \quad (58)$$

- Perdida de carga en el interior de los tubos

$$\Delta P_{tubos} = \frac{n_t G^2}{\rho} \left(\frac{f l}{d_i \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^m} + 2 \right) \quad (59)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{a c_T} \quad (60)$$

$m = 0,25$ para fluidos laminares

$m = 0,14$ para fluidos turbulentos

$G =$ velocidad masica

$n_p =$ numero de pasos

$n_t =$ numero total de tubos

$l =$ longitud efectiva de cada tubo

$f =$ factor de friccion

$\dot{m} =$ flujo masico

- Perdida de carga en la carcasa

$$\Delta P_c = \frac{f G_{ct}^2 (N_b + 1) D_c}{2 \rho D_e \phi_s} \quad (61)$$

$$\phi_s = \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0,14} \quad (62)$$

$$N_b = \frac{L}{B - 1}, \text{ esto es el numero de baffles} \quad (63)$$

$$f = e^{0,576 - 0,19Re_{ct}}, \text{ donde } 40 < Re_{ct} = \frac{G_{ct} D_{eq}}{\mu} \leq 1 * 10^6 \quad (64)$$

- Numero de Reynolds

Este número relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión de un flujo en una expresión adimensional. Generalmente es utilizado con el fin de establecer si el flujo en estudio es laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V_{max} \cdot D}{\nu} \quad (65)$$

Donde:

ρ = densidad del fluido

V = velocidad del fluido

D = diametro de la tuberia

μ = viscosidad del fluido

ν = viscosidad cinematica del fluido

Para números de Reynolds <2000 o >3000 , el régimen es laminar o turbulento respectivamente (Marquez, 2005, pág. 39).

- Numero de Nusselt

Este número es el coeficiente de transmisión de calor adimensional y aparece debido a la convección. Este número provee una medida de la convección en la superficie (Jougard & Perez, 2004).

Está definido por la siguiente ecuación:

$$Nu = \frac{\text{Transferencia por conveccion}}{\text{Transferencia por conduccion}} = \frac{h \cdot L}{k} \quad (66)$$

Donde:

h = coeficiente de transmision de calor

L = longitud caracteristica

k = conductividad termica

En el caso de tuberias, L corresponde al diametro hidraulico de la misma.

- Numero de Prandtl

El número de Prandtl proporciona “una medida de la efectividad relativa del transporte de momento y energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica, respectivamente” (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 318). En otras palabras, representa la relación entre la difusividad molecular de movimiento y la difusividad molecular del calor o entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecula de la cantidad de moviemento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$= \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (67)$$

El número de Prandtl varía desde <0,01 para los metales hasta >100000 para los aceites pesados. El calor se difunde con mucha rapidez en los metales y con mucha lentitud en los aceites, esto indica que la capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales y mucho más delgada para los aceites, es decir, que entre más gruesa sea la capa límite más rápido se difundirá el calor en el fluido.

- Coeficiente global de transferencia de calor

Para realizar la estimación del coeficiente global de transferencia de calor es necesario suponer los siguientes valores: diámetro, espesor y material del tubo a usar, así como los coeficientes de transferencia de calor y resistencias térmicas por ensuciamiento de los fluidos.

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + Rf_s + \left(\frac{L_{tw}}{\gamma_{tw}}\right)\left(\frac{A_o}{A_m}\right) + \left(Rf_t + \frac{1}{\alpha_t}\right)\left(\frac{A_o}{A_i}\right)} \quad (68)$$

$$A_m = \pi L(r_o + r_i) \quad (69)$$

Donde:

A_m = Area media efectiva

L_{tw} = Espesor de la pared del tubo

α_t = Coeficiente de transferencia de calor del fluido por el lado del tubo

α_s = Coeficiente de transferencia de calor del fluido por el lado de la carcasa

Rf_t = Resistencia termica por ensuciamiento del fluido en los lados del tubo

Rf_s = Resistencia termica por ensuciamiento del fluido en los lados de la coraza

r_o = Radio externo del tubo

r_i = Radio interno del tubo

γ_{tw} = Conductividad termica de la pared del tubo

El diseño y la construcción que se realizará corresponde al de un intercambiador de calor de coraza y tubos, por el cual transitará agua como fluido de trabajo. Se seleccionó el intercambiador de calor de coraza y tubos (AES), teniendo en cuenta que tiene, entre otras, las siguientes ventajas: es un equipo ampliamente utilizado en el campo industrial, lo que permitirá al futuro ingeniero tener un acercamiento a

la aplicación de este tipo de equipos, presenta facilidad en su construcción y existe variedad de prácticas disponibles con las cuales los estudiantes podrán afianzar los conocimientos adquiridos en las áreas de transferencia de calor, mecánica de fluidos y termodinámica.

En la presente investigación se emplea el método LMTD y el Kern, con el fin de realizar el diseño del intercambiador de calor de tubos y coraza. Mediante el uso de estos métodos se busca determinar el área de transferencia de calor necesaria en el intercambiador, teniendo en cuenta que el diseño requiere que el paso del fluido por los tubos sea mayor a 1 y el paso por la coraza sea 1.

3.3. ETAPA 2: PARAMETRIZACIÓN DEL BANCO GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

3.3.1. PARÁMETROS INICIALES

Para realizar el diseño del intercambiador de calor de coraza y tubos mediante el método de la Temperatura Media Logarítmica (LMTD), es necesario establecer algunos parámetros iniciales, como son: las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, flujos máxicos, y las propiedades de los fluidos de trabajo.

A continuación en la Tabla 4, se presenta la parametrización obtenida a partir de la observación del Banco Global de Transferencia de Calor, ubicado en la Regional UTS Barrancabermeja

Tabla 4. Parametrización inicial

SISTEMA INTERNACIONAL			SISTEMA BRITÁNICO		
	AGUA CALIENTE	AGUA FRÍA		AGUA CALIENTE	AGUA FRÍA
T1 [°C]	80	10	T1 [°F]	176	50
T2 [°C]	60	40	T2 [°F]	140	104
Tm [°C]	70	25	Tm [°F]	158	77
M [kg/s]	2	1,33716475	M [lb/h]	15873,2958	10612,6058
	Lado tubo	Lado Coraza		Lado tubo	Lado coraza

Fuente: Autoras

A partir, de los datos de la Tabla 4, se desarrollan a continuación los cálculos correspondientes a los métodos antes mencionados, para obtener el diseño del intercambiador

Balance termodinámico agua lado tubo:

De acuerdo a la ecuación (23):

$$Q = m_{agua} C_{p_{agua}} (\Delta T)$$

Por tanto,

$$Q = 571602,68 \frac{Btu}{h}$$

Flujo másico de agua lado coraza requerido:

Despejando la ecuación 23 procedemos a encontrar el flujo másico del agua:

$$m_{H_2O \text{ Lado coraza}} = \frac{Q}{C_{p_{vapor}} \Delta T}$$

$$m_{H_2O \text{ Lado coraza}} = 10612,6058 \frac{lb}{h}$$

Gravedad específica del agua

$$Sg = \frac{\rho_{agua}}{\rho_{agua\ 4^{\circ}C}}$$

$$Sg_{H_2O\ Lado\ tubo} = 0,9779$$

$$Sg_{H_2O\ Lado\ coraza} = 0,9979$$

En la Tabla 5 se presenta el listado de datos con los cuales se hará las iteraciones para el desarrollo de la investigación:

Tabla 5. Datos iniciales para el desarrollo del diseño

Parámetro	Valor	Obtención
Q [Btu/h]	571602,68	Calculado
M.agua lado tubo [lb/h]	15873,2958	Suministro bomba
M.agua lado coraza [lb/h]	10612,6058	Calculado
T1 agua lado tubo [°F]	176	Parámetro de diseño
T2 agua lado tubo [°F]	140	Parámetro de diseño
t1 lado coraza [°F]	50	Parámetro de diseño
t2 lado coraza [°F]	104	Parámetro de diseño
Tm agua lado tubo[°F]	158	Calculado
Tm agua lado coraza[°F]	77	Calculado
Cp agua lado tubo [Btu/lb.°F]	1,00028705	Tabla A-9 cengel a Tm
Cp agua lado coraza [Btu/lb.°F]	0,9974204	Tabla A-9 cengel a Tm
K. agua lado tubo [Btu/h.ft.°F]	0,38344631	Tabla A-9 cengel a Tm
K. agua lado coraza [Btu/h.ft.°F]	0,351531	Tabla A-9 cengel a Tm
μ agua lado tubo[lb/ft.h]	0,97755239	Tabla A-9 cengel a Tm
μ agua lado coraza [lb/ft.h]	2,15322788	Tabla A-9 cengel a Tm
Pr agua lado tubo	2,551	Tabla A-9 cengel a Tm

Pr agua lado coraza	6,114	Tabla A-9 cengel a Tm
ρ agua lado tubo [lb/ft3]	61,0483412	Tabla A-9 cengel a Tm
ρ agua lado coraza [lb/ft3]	62,2969012	Tabla A-9 cengel a Tm
Factor ensuciamiento agua lado tubo	0,0005	Tabla 3.3 Serth
Factor ensuciamiento agua lado coraza	0,0005	Tabla 3.3 Serth
Sg agua lado tubo	0,9779	Calculada
Sg agua lado coraza	0,9979	Calculada
N (paso por la coraza)	1	Parámetro de diseño
n (paso por los tubos)	>1	Parámetro de diseño

Fuente: Autoras.

3.4. ETAPA 3: DESARROLLO DEL DISEÑO TÉRMICO, HIDRÁULICO Y MECÁNICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO TUBO Y CORASA

3.4.1. DESARROLLO DEL DISEÑO TÉRMICO

Con los parámetros iniciales procedemos al diseño térmico del intercambiador, haciendo uso del método LMTD:

Temperatura media logarítmica

Empleando la ecuación (25):

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_i - t_o) - (T_o - t_i)}{\ln \left[\frac{(T_i - t_o)}{(T_o - t_i)} \right]}$$

se obtiene:

$$\Delta T_{LMTD} = 80,66556212^{\circ}F$$

Parámetros R, P, S y α

Estos parámetros permiten el cálculo del factor de corrección para el intercambiador de calor a diseñar. Mediante el uso de las ecuaciones (27), (28), (30) y (31) se obtuvieron los siguientes valores:

$$R = \frac{T_i - T_o}{t_o - t_i} = 0,666666667 \quad \text{Adimensional}$$

$$P = \frac{t_o - t_i}{T_i - t_i} = 0,428571429 \quad \text{Adimensional}$$

$$\alpha = \left(\frac{1 - RP}{1 - P} \right)^{\frac{1}{N}} = 1,25 \quad \text{Adimensional}$$

$$S = \frac{\alpha - 1}{\alpha - R} = 0,428571429 \quad \text{Adimensional}$$

Factor de corrección

Mediante el uso de la ecuación (29), se determinó que:

$$F = \frac{\sqrt[2]{R^2 + 1} \ln\left(\frac{1 - R}{1 - RS}\right)}{(R - 1) \ln\left(\frac{2 - S(R + 1 - \sqrt[2]{R^2 + 1})}{2 - S(R + 1 + \sqrt[2]{R^2 + 1})}\right)} = 0,94791106 \quad \text{Adimensional}$$

Estimación del coeficiente de transferencia de calor [U]

Los valores típicos del coeficiente de transferencia de calor para intercambiadores de tubo y carcasa con agua como fluidos de trabajo, generalmente se encuentran en el rango de 200 a 700 $\frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$ (Kern D. , 1965).

$$U_{est} = 240 \frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$$

Área de transferencia requerida

Empleando la ecuación (21) se obtuvo el siguiente resultado:

$$A = \frac{q}{U_{est} \cdot F \cdot LMTD} = 31,147779156 \text{ ft}^2$$

Pitch

Para el diámetro de tubería seleccionada y un arreglo triangular se recomienda el siguiente valor pitch:

$$Pt = 4/5" = 0.8 \text{ in}$$

Calculo del número de tubos

Mediante la ecuación (22) se obtiene el siguiente resultado

$$\#tubos = \frac{A}{\pi \cdot \phi_{ext} \cdot L} = 59,88599204 \quad \text{Adimensional}$$

Numero de pasos por la tubería

Al realizar diferentes iteraciones con las ecuaciones, y de acuerdo al anexo A, se logra establecer que el fluido lado tubo debe tener el siguiente número de pasos:

$$\#pasos \text{ por tubos} = 4$$

#Reynolds en tubería

Se calculó mediante el uso de la ecuación (2)

$$\#Re = \frac{4m n_p}{\mu D_i n_t \pi} = 40731,6983 \quad \text{Adimensional}$$

Velocidad del fluido tubos

La velocidad del fluido dentro de los tubos debe estar en el rango de $3 a 8 \frac{ft}{s}$, para que el proceso de intercambio de calor sea adecuado, está se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{m_{agua} \cdot \left(\frac{n_p}{n_t}\right)}{\rho_{agua} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (\phi_{int})^2} = 5,34881043 \frac{ft}{s}$$

Selección de la coraza

La selección del diámetro de la carcasa del intercambiador a diseñar, se realizó mediante el uso de la tabla presentada en el anexo A. Se selecciona el diámetro de coraza con el haz de tubos más próximo al calculado anteriormente.

$$\phi_{coraza} = 10''$$

$$\#tubos = 62$$

Calculo del coeficiente de transferencia de calor requerido

Aplicando la ecuación (40)

$$U_{req} = \frac{q}{n_t \cdot \pi \cdot \phi_{ext} \cdot L \cdot F \cdot LMTD} = 231,8167434 \frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$$

3.4.1.1 Calculo del coeficiente de película en los tubos

Numero de Prandtl

Aplicando la ecuación (37)

$$Pr = C_p \frac{\mu}{K} = 2,550117102 \text{ Adimensional}$$

Numero de Reynolds

Mediante la ecuación (36)

$$\#Re = \frac{4m_{agua} \cdot \left(\frac{n_p}{n_t}\right)}{\pi \cdot \phi_{in} \cdot \mu_{agua}} = 39342,87355 \text{ Adimensional}$$

Numero de Nusselt

De la ecuación (35), se obtiene:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14} = 148,9843803 \text{ Adimensional}$$

Coeficiente de película dentro de los tubos

Se realiza el cálculo por medio de la ecuación (34)

$$h_i = \frac{Nu k}{D_i} = 1685,023231 \frac{Btu}{h.ft.^{\circ}F}$$

3.4.1.2 Calculo del coeficiente de película en la carcasa

Empleando la Tabla 21. Valores estándar (pulgadas) para el espesor del deflector en intercambiadores de calor de clase R *Tabla 21, correspondiente al anexo B, se obtuvo el siguiente valor:

$$C' = 0,1875 \text{ in}$$

Asimismo, de la Imagen 28, correspondiente al anexo C:

$$d_e = 0,535 \text{ in} = 0,0446 \text{ ft}$$

$$\frac{B}{ds} = 0,25$$

$$[B] = \frac{B}{ds} \cdot d_s = 0,25 \cdot 10 \text{ in} = 2,5 \text{ in}$$

$$as = \frac{d_s \cdot C' \cdot B}{144 \cdot Pitch} = 0,0401 \text{ ft}^2$$

$$G = \frac{m_{vapor}}{as} = 264890,642 \frac{lb}{ft^2 \cdot h}$$

$$\#Reinolds [Re] = \frac{G \cdot d_e}{\mu_{vapor}} = 5484,653019$$

$$JH = 0,0076 \quad \text{Adimensional (Ver anexo D)}$$

$$h_o = \frac{JH \cdot \#Reinolds \cdot Pr^{0.33} \cdot K_{vapor}}{d_e} = 597,3670083 \frac{btu}{h.ft.^{\circ}f}$$

3.4.1.3 Calculo del coeficiente global limpio (U_c)

Calculado mediante la ecuación (41)

$$U_c = \left(\frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2K_{tubo}} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1} = 379,5415738 \frac{btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$$

3.4.1.4 Calculo del coeficiente global sucio (U_d)

Obtenido mediante la ecuación (42)

$$U_D = \left(\frac{1}{U_c} + R_D \right)^{-1} = 256,2413509 \frac{btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$$

$$R_D = \frac{R_{di} \cdot \phi_{ext}}{\phi_{int}} + R_{do} = 0,001267813 \frac{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}{Btu}$$

3.4.1.5 Calculo del sobrediseño y sobredimensionamiento

Overdesign

$$Overdesign = \frac{U_D}{U_{req}} - 1 = 11\%$$

Oversurface

$$Oversurface = \frac{U_c}{U_{req}} - 1 = 63\%$$

3.4.2. DESARROLLO DEL DISEÑO HIDRÁULICO

3.4.2.1 Caída de presión en la tubería

Pérdidas por fricción

Calculada por medio de la ecuación (4)

$$\Delta P_f = \frac{f \cdot N_p \cdot L \cdot G^2}{7,5 \times 10^{12} \cdot \phi_{int} \cdot Sg_{agua} \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu_{agua}} \right)} = 1,751634033 \text{ psi}$$

Donde:

$$\text{factor de fricción } [f] = 0,4137 \cdot \#Re^{-0,2585} = 0,026608351$$

$$G = \frac{m_{agua} \cdot \left(\frac{N_p}{N_t} \right)}{\frac{\pi \cdot \phi_{int}}{4}} = 1134401,284 \frac{lb}{h \cdot ft^2}$$

Pérdidas menores a lo largo de la tubería

Calculada por medio de la ecuación (5)

$$\Delta P_r = \frac{1,334 \cdot 10^{-13} (2n_p - 1,5) G^2}{Sg_{agua}} = 1,141059152 \text{ psi}$$

Pérdidas por boquillas

Obtenidas mediante la ecuación (6)

$$\Delta P_n = \frac{2 \times 10^{-13} \cdot N_s \cdot (G_n)^2}{Sg} = 0,579403972 \text{ psi}$$

$N_s = \text{Numero de boquillas} = 1$

$$G_n = \frac{m}{\frac{\pi \cdot (\phi_n)^2}{4}} = 1683150,535 \frac{lb}{h \cdot ft^2}$$

$\phi_n = \text{Diametro de la boquilla} = 1,315 \text{ in}$ (Ver anexo C)

Pérdidas totales en la tubería

Mediante la ecuación (8):

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_r + \Delta P_n = 3,472097158 \text{ psi}$$

3.4.2.2 Caídas de presión en la carcasa

Perdidas por fricción

Calculadas mediante las ecuaciones (9), (10), (11), (12) y (13)

$$\Delta P_f = \frac{f \cdot G^2 \cdot d_s \cdot (N_b + 1)}{7,50 \times 10^{12} \cdot d_e \cdot Sg \cdot \varphi} = 0,129904997 \text{ psi}$$

$$\text{factor de fricción } [f] = 144 \left[f_1 - 1,25 \left(1 - \frac{B}{d_s} \right) (f_1 - f_2) \right] = 0,104572221$$

$$f_1 = (0,0076 + 0,00016 d_s) Re^{-0,125} = 0,003156584 \frac{ft^2}{in^2}$$

$$f_2 = (0,0016 + 5,8 \times 10^{-5} d_s) Re^{-0,157} = 0,00056417 \frac{ft^2}{in^2}$$

$$N_b + 1 = \frac{L}{B} = 15,284$$

$$d_s = 10 \text{ in}$$

$$d_e = 0,535 \text{ in}$$

$$\varphi = 1 \text{ valor supuesto}$$

$$\text{Mass flux [G]} = 264890,642 \frac{lb}{ft^2 \cdot h}$$

Pérdidas por boquillas

Obtenidas mediante las ecuaciones (6) y (7)

$$\Delta P_n = \frac{2 \times 10^{13} \cdot N_s \cdot (G_n)^2}{Sg \text{ vapor}} = 0,253763556 \text{ psi}$$

$$G_n = \frac{m}{\frac{\pi \cdot (\phi_n)^2}{4}} = 1125234,759 \frac{lb}{h \cdot ft^2}$$

$$\text{Numero de boquillas } (N_s) = 1$$

$$\phi_n = 0,10958 \text{ in}$$

Perdida de presión total en la carcasa

Calculada mediante la ecuación (14)

$$\Delta P_o = \Delta P_f + \Delta P_n = 0,383668553 \text{ psi}$$

3.4.3. DESARROLLO DEL DISEÑO MECÁNICO

Primero se debe determinar la presión y la temperatura de diseño tanto en lado de la tubería como en la coraza.

$$\text{Presión de diseño} = Pd = 1,5xP_o$$

$$Pd_{tuberia} = 1,5 \times 48,6 \text{ psi} = 72,9 \text{ psi}$$

$$Pd_{coraza} = 1,5 \times 31,18 \text{ psi} = 46,77 \text{ psi}$$

Por lo general la temperatura de diseño es 14°C más alta que la temperatura máxima de servicio (Cuadrado, Diseño, Construcción Y Pruebas De Intercambiadores De Carcasa Y Tubos Para Laboratorio De Termicas De La Facultad De Mecanica, 2010).

$$\text{Temperatura diseño de la tubería } (T_t) = 80^\circ\text{C} + 14^\circ\text{C} = 94^\circ\text{C} = 201,2^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura diseño de la carcasa } (T_c) = 40^\circ\text{C} + 14^\circ\text{C} = 54^\circ\text{C} = 129,2^\circ\text{F}$$

En la Tabla 6 se muestra la norma que rige las propiedades de los materiales empleados en la presente investigación, así como el esfuerzo máximo permisible (S) de cada uno de ellos.

Tabla 6. Normas y esfuerzos mínimos de los componentes del intercambiador de calor

Descripción	Material	Norma	S [psi]	Referencia
Tubería	Cobre	ASME B-42	4800	Anexo F
Carcasa	Acero al carbón	ASME A-106	13700	Anexo G
Espejos	Acero al carbón	ASME A-515	20000	Anexo H
Baffles	Acero al carbón	ASME A-515	-	Anexo H
Empaques	Asbesto	-	-	-
Boquillas	Acero al carbón	ASME A-105	-	-

Fuente: Autoras

3.4.3.1 Espesor de la carcasa

Para calcular el diámetro de la carcasa se hace uso de las ecuaciones (15) y (16).

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0,6P} = 0,44mm$$

$$t_2 = \frac{PR}{2SE - 0,4P} = 0,21 mm$$

Presion interna de diseño [P] = 46,77 psi = 322467,9252 pa

Radio de la coraza [R] = 5 in = 127 mm

Esfuerzo disponible del material [S] = 13700 psi = 94458212 pa

Eficiencia de la junta [E] = 1

Se toma el mayor valor y se le suman 3 mm por efectos de corrosión.

$$t = 3,44 mm$$

Según TEMA (1999) para carcasas de diámetros en el rango de 8 – 12 in, se recomienda emplear como mínimo tuberías cedula 40. Por esta razón, se seleccionó tubería de 10" SCH 40, con un espesor de 9,27 mm, en el anexo E se pueden evidenciar las características de la tubería seleccionada.

3.4.3.2 Espesor de la tubería

Mediante la realización del cálculo del espesor de la tubería por medio de la ecuación 17, se busca verificar que la tubería seleccionada para el

dimensionamiento del intercambiador de calor, cumpla con los requerimientos establecidos en este apartado.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} = 1,32 \text{ mm}$$

Presion interna de diseño [P] = 72,9 psi = 5026278pa

Radio interno de la tubería [R] = 7,9375 mm

esfuerzo maximo disponible del material [S] = 4800 psi = 33095000 pa

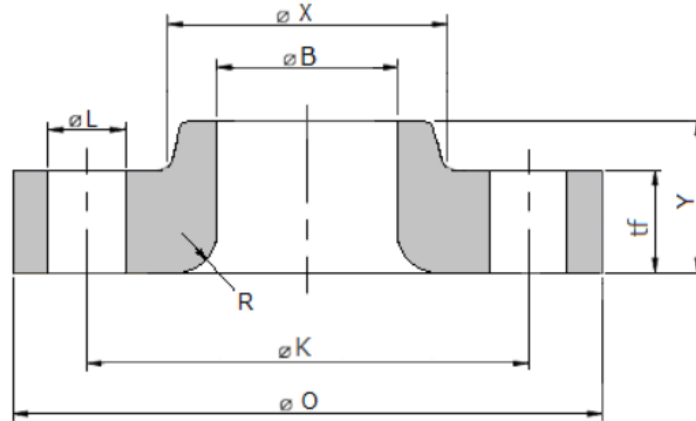
Eficiencia de la junta [E] = 1

El espesor calculado resulta mucho menor que el de la tubería empleada en el dimensionamiento del intercambiador de calor (5,5372 mm), de tal modo que se opta por trabajar con el utilizado en el dimensionamiento debido a que es una medida que se puede encontrar comercialmente.

3.4.3.3 Acoples

Se han seleccionado bridas Lap Joint / Lapped (loca) Class 300 lbs bajo la Norma ANSI B 16.5 equivalente a la Norma ASME en cuanto a medidas, tolerancias y presiones de trabajo (DNBrida, s.f.). Se han seleccionado estas bridas debido a que la presión de diseño es mucho menor que la tolerada por estos acoples, como se evidencia en el anexo I. De igual manera, se seleccionaron bridas tipo Slip-on debido a su bajo costo y poca dificultad para su montaje. En la Imagen 27 se pueden observar las medidas de la brida seleccionada.

Imagen 27. Dimensiones brida Lap Joint / Lapped (loca) 300 lb ANSI B16.5



Fuente: Bridas ANSI

$$B = 277,4 \text{ mm}$$

$$L = 28,575 \text{ mm}$$

$$X = 321 \text{ mm}$$

$$K = 387,4 \text{ mm}$$

$$t_f = 47,7 \text{ mm}$$

$$Y = 95 \text{ mm}$$

$$O = 445 \text{ mm}$$

3.4.3.4 Espesor de los espejos

A continuación, se presentan los cálculos realizados para la obtención del espesor de los espejos, mediante el uso de la ecuación (19) y el ANEXO H.

$$T = \frac{FG}{2} \cdot \sqrt{\frac{P}{S}}$$

$F = \text{Constante del tipo de espejo} = 1$

$G = \text{Diametro medio del empaque} = 254 \text{ mm}$

$P = \text{Presion de diseño en la carcasa} = 46,77 \text{ psi} = 322467,9252 \text{ pa}$

$S = \text{Esfuerzo maximo disponible del material} = 20000 \text{ psi} = 1,379 \times 10^8 \text{ pa}$

$T = \text{Espesor efectivo del espejo}$

$$T = \frac{254 \text{ mm}}{2} \cdot \sqrt{\frac{322467,9252 \text{ pa}}{1,379 \times 10^8 \text{ pa}}} = 6,14 \text{ mm}$$

Según TEMA (1999, pág. 45), el espesor mínimo recomendado para los espejos de un intercambiador de calor clase C, es de $\frac{3}{4}$ del diámetro exterior de la tubería cuando este es menor o igual a 1". Es decir que el espesor mínimo recomendado por la norma vendría dado de la siguiente manera:

$$T_{min} = \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{8} \text{ in} = 0,46875 \text{ in} = 11,91 \text{ mm}$$

De acuerdo con lo anterior y el espesor calculado, se ha tomado una platina con un espesor comercial de calibre 16 (1,5 mm) para la fabricación de los espejos del intercambiador de calor.

3.4.3.5 Espesor de las tapas

A continuación, se presentan los cálculos correspondientes al espesor de las tapas empleadas en el diseño del intercambiador de calor. Se seleccionaron tapas

toriesférica ASME debido a que son las de mayor aceptación por su costo y resistencia ante altas presiones. Aplicando la ecuación (20) se obtiene:

$$T = \frac{0,885PD}{SE - 0,1P} = 0,94 \text{ mm}$$

$P = \text{Presion interna de diseño} = 322467.8 \text{ pa}$

$D = \text{diametro interno de la tapa} = 277.4 \text{ mm}$

$S = \text{Esfuerzo maximo disponible del material} = 93623909 \text{ pa}$

$E = \text{Eficiencia de la junta soldada} = 0,9$

La normatividad TEMA establece que ninguna tapa debe tener un espesor de pared menor al de la coraza a la cual se va a unir. En base a lo anterior, se establece que el espesor de las tapas será igual al espesor de la carcasa debido a que el espesor calculado resultó mucho menor al espesor de la carcasa seleccionada.

Este espesor corresponde a tapas toriesférica SCH 40.

3.4.4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

- **Tubería**

Para realizar la selección del material del que estarían compuestos los tubos del intercambiador de calor, se tendrá en cuenta aspectos tales como su resistencia a la corrosión, la conductividad térmica y la durabilidad. A continuación, se presenta una tabla comparativa de los materiales que se estudiaron para la selección de la tubería. Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se decide seleccionar la tubería de cobre al poseer la mayor conductividad térmica de los materiales bajo estudio y su baja necesidad de mantenimiento (Tabla 7):

Tabla 7. Características del posible material de la tubería

Material	Conductividad	Resistencia a la corrosión	Ventajas
Cobre	226 Btu/h.ft.°F	Excelente	Excelente conductividad y maleabilidad
Acero al carbón	35 Btu/h.ft.°F	Tiende a oxidarse	Buena resistencia a la tracción, maleable y dúctil
Acero Inox 302	8,7 Btu/h.ft.°F	Muy alta	Resistente a suciedad, oxidación y altas temperaturas

Fuente: (Villalobos, Lopez, & Gómez, 2017)

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearán los datos correspondientes a tubería de cobre de 5/8" calibre 12, con un diámetro interno de 0,407", como se puede leer en la Tabla 8:

Tabla 8. Características físicas de la tubería seleccionada

Material	D.ext [ft]	D.int [ft]	Longitud [ft]	K [Btu/h.ft.°F]
Cobre	0,052083	0,0339167	3,18	226

Fuente: Autoras

- **Coraza y tapas**

Teniendo en cuenta que la construcción del intercambiador debe ser didáctico, se decidió que la coraza irá en acrílico transparente, de forma que se podrá visualizar el proceso que la máquina térmica realizará.

En cuanto al material de las tapas se seleccionó acero galvanizado de calibre 16

El resumen de los cálculos obtenidos se presenta en el Capítulo 4, en la Tabla 17, como parte de los resultados del proyecto.

3.5. ETAPA 4: MODELAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

3.5.1. USO DEL SOFTWARE ASPEN ONE

Para el modelamiento del intercambiador de calor de la presente investigación, se usó el software ASPEN ONE, se utilizaron los datos de la Tabla 9 como entrada. Los resultados obtenidos se detallan en el capítulo 4.

Tabla 9. Datos de entrada para el modelamiento del diseño

DATOS DE ENTRADA		
DESCRIPCION	UNIDADES	VALOR
<i>Temp. Entrada vapor</i>	<i>°F</i>	392
<i>Temp. Salida vapor</i>	<i>°F</i>	248
<i>Temp. Entrada agua</i>	<i>°F</i>	86
<i>Temp. Salida agua</i>	<i>°F</i>	122
<i>Transf. Calor [q]</i>	<i>Btu/h</i>	285187,1538
<i>Flujo másico vapor</i>	<i>lb/h</i>	3426
<i>Flujo másico agua</i>	<i>lb/h</i>	7936
<i>Δp permitida en tubos</i>	<i>psi</i>	5
<i>Δp permitida en carcasa</i>	<i>psi</i>	5
<i>F. ens. Agua</i>	<i>h. °F/Btu</i>	0,001
<i>F. ens. Vapor</i>	<i>h. °F/Btu</i>	0,0001
<i>Tipo de intercambiador</i>	----	AES
<i>Diámetro ext. tubería</i>	<i>in</i>	$\frac{3}{4}$

<i>Numero de tubos</i>	<i>Adimensional</i>	16
<i>Longitud tubería</i>	<i>in</i>	5
<i>Material de los tubos</i>	----	Cobre
<i># pasos por tubos</i>	<i>Adimensional</i>	4
<i>Pitch</i>	<i>in</i>	0,9375
<i>Diámetro de carcasa</i>	<i>in</i>	8
<i>Material de la carcasa</i>	-----	Acero al carbón
<i>Arreglo de la tubería</i>	<i>Adimensional</i>	Triangular a 60° rotado
<i>Espaciado de los baffles</i>	<i>in</i>	2,4

Fuente: Autores

3.5.2. USO DEL SOFTWARE CAD SOLIDWORKS

Se utilizó el software de dibujo computarizado CAD SOLIDWORKS. Se suministraron los datos de diseño, incluyendo que el material de la coraza o carcasa seleccionado, por motivos pedagógicos, es en acrílico transparente.

Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo 4.

3.6. ETAPA 5: CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Con los datos obtenidos en cada una de las etapas anteriores, se procedió a adquirir los materiales pertinentes y realizar la construcción del intercambiador.

Lo anterior hace parte de los objetivos planteados para el desarrollo de este proyecto, por lo que esta etapa se mostrará en el capítulo 4.

El intercambiador fue instalado en el Banco Global de Transferencia de Calor, ubicado en una de las aulas de la Regional Barrancabermeja. Este proceso implicó realizarle modificaciones estructurales a dicho banco. Lo anterior, se muestra, igualmente, en el capítulo 4. Se realizaron pruebas de funcionamiento y de rendimiento de la máquina. Dichos resultados se muestran junto a lo anterior.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del diseño del intercambiador de calor, usando el método LMTD.

4.1.1. Datos de los fluidos.

En la Tabla 10, se presenta el resumen de los datos de los fluidos tanto en el Sistema Internacional de Medidas como en el Sistema Británico.

Tabla 10. Resumen de los parámetros iniciales

Sistema internacional			Sistema británico		
PARÁMETRO	AGUA CALIENTE	AGUA FRÍA	PARÁMETRO	AGUA CALIENTE	AGUA FRIA
T1 [°C]	80	10	T1 [°F]	176	50
T2 [°C]	60	40	T2 [°F]	140	104
Tm [°C]	70	25	Tm [°F]	158	77
Cp [J/kg.°c]	4188	4176	Cp [Btu/lb.°F]	1,00028705	0,9974209
M [kg/s]	2	1,33716475	M [lb/h]	15873,2958	10612,6058
k [w/m.°C]	0,6632	0,608	k [Btu/h.ft.°F]	0,38344631	0,351531
μ [kg/m.s]	0,0004041	0,0008901	μ [lb/ft.h]	0,97755239	2,15322788
Pr	2,551	6,114	Pr	2,551	6,114
ρ [kg/m3]	977,9	997,9	ρ [lb/ft3]	61,0483412	62,2969012
Factor Ens.	0,0005	0,0005	Factor Ens.	0,0005	0,0005
q [W]	167520	167520	q [btu/h]	571602,68	-571602,68
SG	0,9779	0,9979		Tubo	Carcaza
			Arreglo de los tubos:	TRIANGULAR	

Fuente: Autoras.

4.1.2. Diseño térmico y diseño mecánico.

A continuación, en la Tabla 11, se presenta el resumen de los cálculos realizados para encontrar el diseño térmico del intercambiador:

Tabla 11. Resultados diseño térmico y mecánico

Diseño Térmico	
q[BTU/H]	571602,68
LMTD	80,66556212
Pasos Carcaza	1
R	0,666666667
P	0,428571429
α	1,25
S	0,428571429
F	0,94791106
Uest [BTU/ft ² .f]	240
Área [ft ²]	31,14779156
Tubería	
Dext [in]	5/8
Cedula	12
Dint [in]	0,407
Longitud [ft]	3,18
Pitch [in]	4/5
Material	Cobre
K [Btu/h.ft.f]	226
# Tubos	59,88599204
Pasos x tubos	4
# Reynolds	40731,6983
Velocidad [ft/s]	5,343881043
# real tubos	62
Carcasa ID [in]	10
Ureq [BTU/ft ² .f]	231,8167434
Calculo hi tubos	
# prandtl	2,550117102
# Reynolds	39342,87355
Nusselt	148,9843803
hi [Btu/h.ft.f]	1685,023231
ho en coraza	
%corte	25
C' [in]	0,1875

Diseño Térmico	
de [in]	0,535
B/ds	0,25
B [in]	2,5
as [ft^2]	0,0401
G [lb/ft2.h]	264890,642
De [ft]	0,045
# Reynolds	5484,653019
JH	0,0076
# prandtl	6,114
ho [btu/h.ft.f]	597,3670083
Uc	379,5415738
Calculo U sucio [UD]	
Rdi	0,0005
Rdo	0,0005
RD	0,001267813
UD	256,2413509
Over-design	11%

Fuente: Autoras.

4.1.3. Diseño hidráulico.

En la Tabla 12, se presenta el resumen de los cálculos correspondientes a este diseño:

Tabla 12. Resultados diseño hidráulico

Diseño hidráulico	
Caída de presión en tubos	
factor de fricción	0,026608351
G [lb/h.ft2]	1134401,284
ΔPf [Psi]	1,751634033
ΔPr [Psi]	1,141059152
Diámetro boquillas [in]	1,315
Diámetro boquillas [ft]	0,10957895
Gn [lb/h.ft2]	1683150,535
ΔPn [Psi]	0,579403972
$\Delta Ptotal$ [Psi]	3,472097158
Caída de presión en coraza	
f1	0,003156584
f2	0,00056417

f	0,104572221
Nb+1	15,264
ΔPf [Psi]	0,129904997
#Reynolds	57268,39668
Diámetro boquilla [in]	1,315
Diámetro boquilla [ft]	0,109583333
Gn [lb/h.ft2]	1125234,759
ΔPn [Psi]	0,253763556
ΔPo [Psi]	0,383668553
Carcasa	0,767337106

Fuente: Autoras.

4.2. Resultados del Software ASPEN ONE.

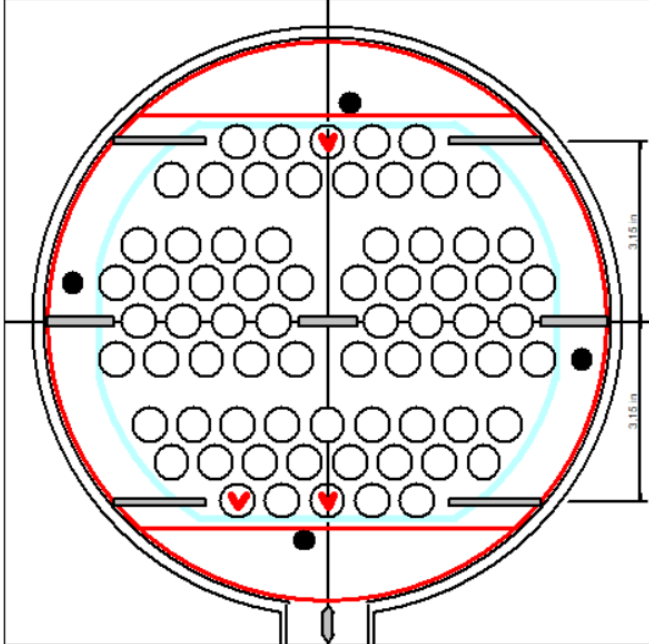
A continuación, se presenta el procedimiento de diseño usando el software mencionado. Dicho procedimiento se muestra por medio de imágenes tomadas directamente del programa usado, organizando la información más relevante en la


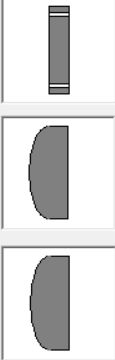
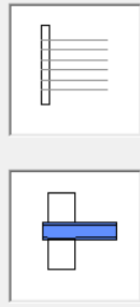
Tabla 13. Resultados del Software ASPEN ONE.

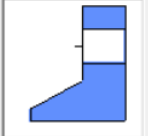
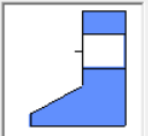


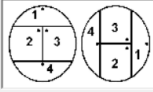
Tabla 13.

Tabla 13. Resultados del Software ASPEN ONE.

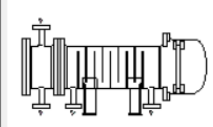
Procedimiento	Evidencia del Procedimiento
<p>Se suministraron los parámetros iniciales y se seleccionó el tipo de norma y el modo de cálculo Rating/Checking, y el software arrojó un primer diseño geométrico y térmico.</p>	

Procedimiento	Evidencia del Procedimiento																																																																																																																																																																	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">Hotside</th> <th colspan="2">Coldside</th> <th colspan="2">Most recent run</th> <th colspan="2">Previous run</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Calculation mode</td> <td colspan="8">Rating / Checking</td> </tr> <tr> <td colspan="9">Process Conditions</td> </tr> <tr> <td>Mass flowrate:</td> <td>lb/h</td> <td>15873</td> <td>10612</td> <td>15873</td> <td>10612</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Inlet pressure:</td> <td>psi</td> <td>48,6</td> <td>31,18</td> <td>32,2</td> <td>34,7</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Outlet pressure:</td> <td>psi</td> <td>45,6</td> <td>26,18</td> <td>30,71</td> <td>34,3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Inlet temperature:</td> <td>°F</td> <td>176</td> <td>50</td> <td>176</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Outlet temperature:</td> <td>°F</td> <td>140</td> <td>104</td> <td>142,94</td> <td>99,38</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Inlet vapor fraction:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Outlet vapor fraction:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Heat load:</td> <td>BTU/h</td> <td>571602</td> <td>NA</td> <td>524696</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Initial Heat load:</td> <td>BTU/h</td> <td>NA</td> <td>NA</td> <td>571438</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="9">Process Input</td> </tr> <tr> <td>Allowable pressure drop:</td> <td>psi</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fouling resistance:</td> <td>h F/BTU</td> <td>0,0005</td> <td>0,0005</td> <td>0,0005</td> <td>0,0005</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="9">Calculated Results</td> </tr> <tr> <td>Pressure drop:</td> <td>psi</td> <td></td> <td></td> <td>1,49</td> <td>0,4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> </div>		Hotside		Coldside		Most recent run		Previous run										Calculation mode	Rating / Checking								Process Conditions									Mass flowrate:	lb/h	15873	10612	15873	10612				Inlet pressure:	psi	48,6	31,18	32,2	34,7				Outlet pressure:	psi	45,6	26,18	30,71	34,3				Inlet temperature:	°F	176	50	176	50				Outlet temperature:	°F	140	104	142,94	99,38				Inlet vapor fraction:				0	0				Outlet vapor fraction:				0	0				Heat load:	BTU/h	571602	NA	524696					Initial Heat load:	BTU/h	NA	NA	571438					Process Input									Allowable pressure drop:	psi	3	5	5	3				Fouling resistance:	h F/BTU	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005				Calculated Results									Pressure drop:	psi			1,49	0,4			
	Hotside		Coldside		Most recent run		Previous run																																																																																																																																																											
Calculation mode	Rating / Checking																																																																																																																																																																	
Process Conditions																																																																																																																																																																		
Mass flowrate:	lb/h	15873	10612	15873	10612																																																																																																																																																													
Inlet pressure:	psi	48,6	31,18	32,2	34,7																																																																																																																																																													
Outlet pressure:	psi	45,6	26,18	30,71	34,3																																																																																																																																																													
Inlet temperature:	°F	176	50	176	50																																																																																																																																																													
Outlet temperature:	°F	140	104	142,94	99,38																																																																																																																																																													
Inlet vapor fraction:				0	0																																																																																																																																																													
Outlet vapor fraction:				0	0																																																																																																																																																													
Heat load:	BTU/h	571602	NA	524696																																																																																																																																																														
Initial Heat load:	BTU/h	NA	NA	571438																																																																																																																																																														
Process Input																																																																																																																																																																		
Allowable pressure drop:	psi	3	5	5	3																																																																																																																																																													
Fouling resistance:	h F/BTU	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005																																																																																																																																																													
Calculated Results																																																																																																																																																																		
Pressure drop:	psi			1,49	0,4																																																																																																																																																													
<p>Diseño geométrico de los tubos.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Baffle</th> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Type</td> <td>single seg</td> <td>single seg</td> </tr> <tr> <td>Cut</td> <td>horizontal</td> <td>horizontal</td> </tr> <tr> <td>Cut to centre (in)</td> <td>3,608</td> <td>-3,608</td> </tr> <tr> <td>Outer diameter (in)</td> <td>9,875</td> <td>9,875</td> </tr> <tr> <td>Percentage cut</td> <td>13,921</td> <td>13,921</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Baffle	1	2	Type	single seg	single seg	Cut	horizontal	horizontal	Cut to centre (in)	3,608	-3,608	Outer diameter (in)	9,875	9,875	Percentage cut	13,921	13,921																																																																																																																																															
Baffle	1	2																																																																																																																																																																
Type	single seg	single seg																																																																																																																																																																
Cut	horizontal	horizontal																																																																																																																																																																
Cut to centre (in)	3,608	-3,608																																																																																																																																																																
Outer diameter (in)	9,875	9,875																																																																																																																																																																
Percentage cut	13,921	13,921																																																																																																																																																																

Procedimiento	Evidencia del Procedimiento																														
Coraza y cabezales.	<p> <input checked="" type="checkbox"/> Shell/Heads <input checked="" type="checkbox"/> Covers <input checked="" type="checkbox"/> Tubesheets <input checked="" type="checkbox"/> Flanges </p>  <p> Tipo de cabezal frontal: A - channel & removable cover Tipo de carcasa: E - one pass shell Tipo de cabezal atrás: S - floating head with backing device Posición del intercambiador: Horizontal Location of front head for vertical units: Set default 'E' shell flow direction (inlet nozzle location): Near rear head Double pipe or hairpin unit shell pitch: in Tubeside inlet at front head: Yes Flow within multi-tube hairpin (M-shell): Set default Overall flow for multiple shells: Set default </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>ID</th> <th>OD</th> <th>Espesor</th> <th>Serie</th> <th>Paralelo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shell(s)</td> <td>in 10</td> <td>10,375</td> <td>0,1875</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Cabezal</td> <td>in 10</td> <td></td> <td>0,1875</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rear head</td> <td>in 8,75</td> <td></td> <td>0,1875</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Kettle</td> <td>in</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		ID	OD	Espesor	Serie	Paralelo	Shell(s)	in 10	10,375	0,1875	1	1	Cabezal	in 10		0,1875			Rear head	in 8,75		0,1875			Kettle	in				
	ID	OD	Espesor	Serie	Paralelo																										
Shell(s)	in 10	10,375	0,1875	1	1																										
Cabezal	in 10		0,1875																												
Rear head	in 8,75		0,1875																												
Kettle	in																														
Tipos de tapas y su ubicación.	<p> Tipo de tapa frontal: Flat bolted Front cover welded to a cylinder: No Tipo de tapa atrás: Elipsoidal (M,P,S,T,W typ) Rear cover welded to a cylinder: Yes Tipo de tapa de carcasa: Elipsoidal Distance from U-bend center to shell cover: in </p> 																														
Espejos	<p> Tipo de placa de tubos: Normal Espesor de la placa de tubos frontal: 1,125 in Espesor de la placa de tubos de atrás: 1,125 in Tipo de junta tubos-placa: Expanded only (no groove)[App.A 'k'] Tube projection from front tubesheet: 0,125 in Tube projection from rear tubesheet: 0,125 in Incluir junta de expansión: None </p> 																														

Procedimiento	Evidencia del Procedimiento
Bridas	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Tipo de brida - lado caliente <input type="text" value="Hub"/></p> <p>Tipo de brida - lado frío <input type="text" value="Hub"/></p> </div> <div style="width: 50%;">   </div> </div>
Tubos y distribución de los tubos.	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>Number of tubes (total) <input type="text" value="62"/></p> <p>Number of tubes plugged <input type="text" value="0"/></p> <p>Longitud tubos <input type="text" value="3,18"/> <input type="text" value="ft"/></p> <p>Tipo de tubo <input type="text" value="Plain"/></p> <p>Diámetro Externo de Tubos <input type="text" value="0,625"/> <input type="text" value="in"/></p> <p>Espesor pared tubos <input type="text" value="0,065"/> <input type="text" value="in"/></p> <p>Wall specification <input type="text" value="Average"/></p> <p>Distancia entre tubos <input type="text" value="0,8125"/> <input type="text" value="in"/></p> <p>Trazado tubos <input type="text" value="30-Triangular"/></p> <p>Material de tubos <input type="text" value="User defined propertie"/> <input type="text" value="41"/></p> <p>Tube surface <input type="text" value="Smooth"/></p> <p>Tubewall Roughness <input type="text" value=""/></p> <p>Tube cut angle (degrees) <input type="text" value=""/></p> </div> <div style="width: 35%;">  </div> </div>
Configuración del diseño de las cámaras para el agua lado tubo y los cuatro pasos.	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>Tube layout option <input type="text" value="Use existing layout"/></p> <p>Number of tubes (total) <input type="text" value="62"/></p> <p>Main input / Tube layout inconsistencies <input type="text" value="Use Layout value"/></p> <p>Full or normal bundle <input type="text" value="Normal bundle"/></p> <p>Trazado tubos <input type="text" value="30-Triangular"/></p> <p>Distancia entre tubos <input type="text" value="0,8125"/> <input type="text" value="in"/></p> <p>Pasos tubos <input type="text" value="4"/></p> <p>Trazado de tubos <input type="text" value="mezclado"/></p> <p>Pass layout orientation <input type="text" value="Horizontal"/></p> <p>Tube layout symmetry <input type="text" value="Standard symmetry"/></p> <p>Bundle limit symmetry <input type="text" value="Limits may be unequal"/></p> <p>Número de pares de tiras selladoras <input type="text" value="3"/></p> <p>Sealing strip orientation <input type="text" value="Transvers"/></p> <p>Orientation of U-bends <input type="text" value="Undefinec"/></p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>Tubes in layout <input type="text" value="71"/></p>   </div> </div>

Procedimiento	Evidencia del Procedimiento								
Hoja de especificación del intercambiador o TEMA	6	Tamaño	10 - 38,16	in	Tipo AES	hor	Conectado en	1 Paralelo	1 Serie
	7	Area/Unid(ef)	26	ft²	asas/unidad	1	Area/Carc.(ef)	26	ft²
	8	Cumplimiento una unidad							
	9	Localización fluido	Carcasa			Lado-Tubos			
	10	Nombre de fluido	COLD WATER			HOT WATER			
	11	Cantidad total de fluido	lb/h	10612			15873		
	12	Vapor (Ent/Sal)	lb/h	0		0	0	0	0
	13	Líquido	lb/h	10612		10612	15873	15873	
	14	nocondensable	lb/h	0		0	0	0	
	15								
	16	Temperatura (Ent/Sal)	*F	50		99,38	176	142,94	
	17	Pt.Cond./Evapor.	*F						
	18	Densidad Vapor/Liquid	lb/ft³	/ 62,352		/ 62,139	/ 60,798	/ 61,478	
	19	Viscosidad	cp	/ 1,3363		/ 0,6859	/ 0,3553	/ 0,4633	
	20	Peso molecular, Vap							
	21	Peso molecular, NC							
	22	Calor espec.	BTU/(lb F)	/ 1,0026		/ 1,0004	/ 1	/ 0,9997	
	23	Conductividad térmica	BTU/(R h F)	/ 0,335		/ 0,356	/ 0,383	/ 0,373	
	24	Calor latente	BTU/lb						
	25	Presión	psi	34,7		34,3	32,2	30,71	
	26	Velocidad	ft/s		1,03			3,5	
	27	Caída de Presión, perm/calc	psi	3		0,4	5	1,49	
	28	Resistencia ensuciamiento (min)	ft² h F/BTU		0,0005		0,0005	0,0006 Ao based	
	29	Calor intercambiado	BTU/h	524696			MTD corregido	81,08	*F
	30	Coficiente		249,15	Sucio	249,19	Limpio	347,03	BTU/(h ft² F)
	31	Construcción de carcasa				Dibujo			
	32			Carcasa		Lado-Tubos			
	33	Design/vac/test pressure:g	psi	50/	/	50/	/		
	34	Temperatura de Diseño	*F	170		240			
	35	Número de pasos en		1		4			
	36	Mrgen de Corrosion	in	0,125		0,125			
	37	Conexiones	Adentro	in	1 1,25/ -	1 1,25/ -			
	38	Tamaño/Compr.	Afuera	1	1,25/ -	1 1,25/ -			
	39	Nominal	Intermedio	/	-	/	-		
	40	Núm.tubo:	62 Us	OD 0,625	sp.-prcpro 0,065	in .ongitud 3,18	ft trazado 0,7812	in	
	41	Tipo de	Plain	#/in	Material	User specified	Trazado tubos	30	
	42	Carcas	User specified	DI 10	DE 10,375	in	Fondo de carcasa	User specified	
	43	Canal or bonnet	User specified				Cubierta canal	User specified	
	44	Placa tubular estaciona	User specified	-			Cabezal flotante	User specified	
	45	Cubierta cabezal flotant	User specified				Placa choque	None	
	46	Deflector-cruzani	User specified	Tipo	Single segmental	Corte(%d) 13,92	H Espacio: c/c 2,5	in	
	47	Deflector-long	-	Tipo sello			entrada 5,3615	in	
	48	Soportes-tubos		Vuelta-U	0	Tipo			
	49	Sello bypass		Junta tubos-placa		Exp.			
	50	Junta de expansión	-	Tipo	None				
	51	RhoV2-Boquilla entrada	1292	Entrada haz	8	Salida haz	8	lb/(ft s²)	
	52	Empaque-carcasa	Flat Metal Jacket Fibe	Lado-Tubos		Flat Metal Jacket Fibe			
	53	Cabezal flotante	Flat Metal Jacket Fibe						
	54	Requerimientos	ASME Code Sec.VIII Div 1			Clase TEMA	R - refinerv service		
	55	Peso/Carcasa	545,8	Lleno de agua	700,4	Haz/atado	157,3	lb	



Procedimiento	Evidencia del Procedimiento																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Resumen general	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>Tamaño</td> <td>10</td> <td>x</td> <td>38,16</td> <td>in</td> <td>Tipo</td> <td>AES</td> <td>hor</td> <td></td> <td>Conectado en</td> <td>1</td> <td>Paralelo</td> <td>1</td> <td>Serie</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Surf./Unit (gross/eff/finned)</td> <td>32,3</td> <td>/</td> <td>26</td> <td>/</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Carcasas/un</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Surf./Shell (gross/eff/finned)</td> <td>32,3</td> <td>/</td> <td>26</td> <td>/</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Simulation</td> <td colspan="13">Cumplimiento una unidad</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td></td> <td colspan="4">Carcasa</td> <td colspan="4">Lado-Tubos</td> <td colspan="4">Heat Transfer Parameters</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Datos de proceso</td> <td></td> <td>Adentro</td> <td>Afuera</td> <td>Adentro</td> <td>Afuera</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Carga térmica total</td> <td>BTU/h</td> <td></td> <td></td> <td>524696</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Flujo total</td> <td>lb/h</td> <td>10612</td> <td></td> <td>15873</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Eff. MTD/ 1 pass MTD</td> <td>°F</td> <td></td> <td></td> <td>81,08 / 84,53</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Vapor</td> <td>lb/h</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Actual/Reqd area ratio - fouled/clean</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1 / 1,39</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>Líquido</td> <td>lb/h</td> <td>10612</td> <td>10612</td> <td>15873</td> <td>15873</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>nocondensable</td> <td>lb/h</td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Coef./Resist.</td> <td>BTU/(h ft² F)</td> <td>ft² h F/BTU</td> <td>%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>Cond./E.vap.</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Overall fouled</td> <td>249,19</td> <td>0,004</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>Temperatura</td> <td>°F</td> <td>50</td> <td>99,38</td> <td>176</td> <td>142,94</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Overall clean</td> <td>347,03</td> <td>0,0029</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>Pt.Cond./E.vapor.</td> <td>°F</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube side film</td> <td>933,31</td> <td>0,0011</td> <td>26,7</td> <td></td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>Quality</td> <td></td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube side fouling</td> <td>1583,93</td> <td>0,0006</td> <td>15,73</td> <td></td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>Presión</td> <td>psi</td> <td>34,7</td> <td>34,3</td> <td>32,2</td> <td>30,71</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube wall</td> <td>4856,76</td> <td>0,0002</td> <td>5,13</td> <td></td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>DeltaP allow/cal</td> <td>psi</td> <td>3</td> <td>0,4</td> <td>5</td> <td>1,49</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Outside fouling</td> <td>1999,91</td> <td>0,0005</td> <td>12,46</td> <td></td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>Velocidad</td> <td>ft/s</td> <td>0,86</td> <td>0,86</td> <td>3,5</td> <td>3,46</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Outside film</td> <td>623,34</td> <td>0,0016</td> <td>39,98</td> <td></td> </tr> <tr> <td>19</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>Propiedades líquido</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell Side Pressure Drop</td> <td>psi</td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>Densidad</td> <td>lb/ft³</td> <td>62,352</td> <td>62,139</td> <td>60,798</td> <td>61,478</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Boquilla entrada</td> <td>0,15</td> <td>36,52</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>Viscosidad</td> <td>cp</td> <td>1,3363</td> <td>0,6859</td> <td>0,3553</td> <td>0,4633</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Inlet space X/flow</td> <td>0,02</td> <td>5,05</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>Calor espec.</td> <td>BTU/(lb F)</td> <td>1,0026</td> <td>1,0004</td> <td>1</td> <td>0,9997</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Baffle X/flow</td> <td>0,1</td> <td>24,07</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>Cond.térmica</td> <td>BTU/(ft h F)</td> <td>0,335</td> <td>0,356</td> <td>0,383</td> <td>0,373</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Baffle window</td> <td>0,01</td> <td>3,74</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>Tensión Superf.</td> <td>lbf/ft</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Outlet space X/flow</td> <td>0,02</td> <td>4,97</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>Peso molecular</td> <td></td> <td>18,01</td> <td>18,01</td> <td>18,01</td> <td>18,01</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Boquilla salida</td> <td>0,1</td> <td>25,65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>Propiedades vapor</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Intermediate nozzle</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>Densidad</td> <td>lb/ft³</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube Side Pressure Drop</td> <td>psi</td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>29</td> <td>Viscosidad</td> <td>cp</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Boquilla entrada</td> <td>0,33</td> <td>22,23</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>Calor espec.</td> <td>BTU/(lb F)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Entrando al Atado</td> <td>0,16</td> <td>10,88</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>Cond.térmica</td> <td>BTU/(ft h F)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Inside tubes</td> <td>0,6</td> <td>40,21</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>Peso molecular</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Saliendo del Atado</td> <td>0,25</td> <td>16,43</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>33</td> <td>Two-Phase Properties</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Boquilla salida</td> <td>0,15</td> <td>10,26</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>34</td> <td>Calor latente</td> <td>BTU/lb</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Intermediate nozzle</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>35</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>Heat Transfer Parameters</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Velocidad/ Rho*V2</td> <td>ft/s</td> <td>lb/(ft²)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>37</td> <td>Reynolds No. vapor</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell nozzle inlet</td> <td>4,55</td> <td>1292</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>Reynolds No. liquid</td> <td></td> <td>3113,32</td> <td>6065,17</td> <td>36773,89</td> <td>28205,76</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell bundle X/flow</td> <td>0,86</td> <td>0,86</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>39</td> <td>Prandtl No. vapor</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell baffle window</td> <td>1,03</td> <td>1,03</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>Prandtl No. liquid</td> <td></td> <td>9,67</td> <td>4,66</td> <td>2,24</td> <td>3,01</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell nozzle outlet</td> <td>4,57</td> <td>1296</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>41</td> <td>Carga térmica</td> <td>BTU/h</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Shell nozzle intern</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>42</td> <td>Vapor only</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>43</td> <td>2-Phase vapor</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube nozzle inlet</td> <td>6,98</td> <td>2964</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>44</td> <td>Calor latente</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tubos</td> <td>3,5</td> <td>3,46</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>2-Phase liquid</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube nozzle outlet</td> <td>6,9</td> <td>2931</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>46</td> <td>Liquid only</td> <td></td> <td>524696</td> <td></td> <td>524696</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tube nozzle intern</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>47</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>48</td> <td>Tubos</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Deflectores</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>49</td> <td>Tipo</td> <td></td> <td>Plain</td> <td></td> <td>Single segmental</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Nozzles: (No./OD)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>ID./OD</td> <td>in</td> <td>0,495 / 0,625</td> <td></td> <td>Número</td> <td>9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>entrada</td> <td>in</td> <td>1 / 1,66</td> <td>1 / 1,66</td> <td></td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>Length act/eff</td> <td>ft</td> <td>3,18 / 2,5602</td> <td></td> <td>Corte(%d)</td> <td>13,92</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>salida</td> <td>1 / 1,66</td> <td>1 / 1,66</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>52</td> <td>Pasos tubos</td> <td></td> <td>4</td> <td></td> <td>Cut orientation</td> <td>H</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>otro</td> <td>/</td> <td>/</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>53</td> <td>Núm.tubos</td> <td></td> <td>62</td> <td></td> <td>Espacio: c/c</td> <td>in</td> <td>2,5</td> <td></td> <td></td> <td>Placa choque</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>54</td> <td>Trazado tubos</td> <td></td> <td>30</td> <td></td> <td>Spacing at inlet</td> <td>in</td> <td>5,3615</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>55</td> <td>Tube pitch</td> <td>in</td> <td>0,7812</td> <td></td> <td>Spacing at outlet</td> <td>in</td> <td>5,3615</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>56</td> <td>Insertar</td> <td></td> <td>None</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>57</td> <td>Vibration problem</td> <td></td> <td>No / No</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>RhoV2 violation</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>no</td> </tr> </table>	1	Tamaño	10	x	38,16	in	Tipo	AES	hor		Conectado en	1	Paralelo	1	Serie	2	Surf./Unit (gross/eff/finned)	32,3	/	26	/					Carcasas/un	1				3	Surf./Shell (gross/eff/finned)	32,3	/	26	/										4															5	Simulation	Cumplimiento una unidad													6		Carcasa				Lado-Tubos				Heat Transfer Parameters				7	Datos de proceso		Adentro	Afuera	Adentro	Afuera				Carga térmica total	BTU/h			524696	8	Flujo total	lb/h	10612		15873					Eff. MTD/ 1 pass MTD	°F			81,08 / 84,53	9	Vapor	lb/h	0	0	0	0				Actual/Reqd area ratio - fouled/clean				1 / 1,39	10	Líquido	lb/h	10612	10612	15873	15873									11	nocondensable	lb/h	0		0					Coef./Resist.	BTU/(h ft² F)	ft² h F/BTU	%		12	Cond./E.vap.		0		0					Overall fouled	249,19	0,004			13	Temperatura	°F	50	99,38	176	142,94				Overall clean	347,03	0,0029			14	Pt.Cond./E.vapor.	°F								Tube side film	933,31	0,0011	26,7		15	Quality		0	0	0	0				Tube side fouling	1583,93	0,0006	15,73		16	Presión	psi	34,7	34,3	32,2	30,71				Tube wall	4856,76	0,0002	5,13		17	DeltaP allow/cal	psi	3	0,4	5	1,49				Outside fouling	1999,91	0,0005	12,46		18	Velocidad	ft/s	0,86	0,86	3,5	3,46				Outside film	623,34	0,0016	39,98		19															20	Propiedades líquido									Shell Side Pressure Drop	psi	%			21	Densidad	lb/ft³	62,352	62,139	60,798	61,478				Boquilla entrada	0,15	36,52			22	Viscosidad	cp	1,3363	0,6859	0,3553	0,4633				Inlet space X/flow	0,02	5,05			23	Calor espec.	BTU/(lb F)	1,0026	1,0004	1	0,9997				Baffle X/flow	0,1	24,07			24	Cond.térmica	BTU/(ft h F)	0,335	0,356	0,383	0,373				Baffle window	0,01	3,74			25	Tensión Superf.	lbf/ft								Outlet space X/flow	0,02	4,97			26	Peso molecular		18,01	18,01	18,01	18,01				Boquilla salida	0,1	25,65			27	Propiedades vapor									Intermediate nozzle					28	Densidad	lb/ft³								Tube Side Pressure Drop	psi	%			29	Viscosidad	cp								Boquilla entrada	0,33	22,23			30	Calor espec.	BTU/(lb F)								Entrando al Atado	0,16	10,88			31	Cond.térmica	BTU/(ft h F)								Inside tubes	0,6	40,21			32	Peso molecular									Saliendo del Atado	0,25	16,43			33	Two-Phase Properties									Boquilla salida	0,15	10,26			34	Calor latente	BTU/lb								Intermediate nozzle					35															36	Heat Transfer Parameters									Velocidad/ Rho*V2	ft/s	lb/(ft²)			37	Reynolds No. vapor									Shell nozzle inlet	4,55	1292			38	Reynolds No. liquid		3113,32	6065,17	36773,89	28205,76				Shell bundle X/flow	0,86	0,86			39	Prandtl No. vapor									Shell baffle window	1,03	1,03			40	Prandtl No. liquid		9,67	4,66	2,24	3,01				Shell nozzle outlet	4,57	1296			41	Carga térmica	BTU/h								Shell nozzle intern					42	Vapor only		0		0										43	2-Phase vapor		0		0					Tube nozzle inlet	6,98	2964			44	Calor latente		0		0					Tubos	3,5	3,46			45	2-Phase liquid		0		0					Tube nozzle outlet	6,9	2931			46	Liquid only		524696		524696					Tube nozzle intern					47															48	Tubos									Deflectores					49	Tipo		Plain		Single segmental					Nozzles: (No./OD)					50	ID./OD	in	0,495 / 0,625		Número	9				entrada	in	1 / 1,66	1 / 1,66		51	Length act/eff	ft	3,18 / 2,5602		Corte(%d)	13,92				salida	1 / 1,66	1 / 1,66			52	Pasos tubos		4		Cut orientation	H				otro	/	/			53	Núm.tubos		62		Espacio: c/c	in	2,5			Placa choque				None	54	Trazado tubos		30		Spacing at inlet	in	5,3615								55	Tube pitch	in	0,7812		Spacing at outlet	in	5,3615								56	Insertar		None												57	Vibration problem		No / No							RhoV2 violation				no
	1	Tamaño	10	x	38,16	in	Tipo	AES	hor		Conectado en	1	Paralelo	1	Serie																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	2	Surf./Unit (gross/eff/finned)	32,3	/	26	/					Carcasas/un	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	3	Surf./Shell (gross/eff/finned)	32,3	/	26	/																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	5	Simulation	Cumplimiento una unidad																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	6		Carcasa				Lado-Tubos				Heat Transfer Parameters																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	7	Datos de proceso		Adentro	Afuera	Adentro	Afuera				Carga térmica total	BTU/h			524696																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	8	Flujo total	lb/h	10612		15873					Eff. MTD/ 1 pass MTD	°F			81,08 / 84,53																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	9	Vapor	lb/h	0	0	0	0				Actual/Reqd area ratio - fouled/clean				1 / 1,39																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	10	Líquido	lb/h	10612	10612	15873	15873																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	11	nocondensable	lb/h	0		0					Coef./Resist.	BTU/(h ft² F)	ft² h F/BTU	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	12	Cond./E.vap.		0		0					Overall fouled	249,19	0,004																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	13	Temperatura	°F	50	99,38	176	142,94				Overall clean	347,03	0,0029																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	14	Pt.Cond./E.vapor.	°F								Tube side film	933,31	0,0011	26,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	15	Quality		0	0	0	0				Tube side fouling	1583,93	0,0006	15,73																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	16	Presión	psi	34,7	34,3	32,2	30,71				Tube wall	4856,76	0,0002	5,13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	17	DeltaP allow/cal	psi	3	0,4	5	1,49				Outside fouling	1999,91	0,0005	12,46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	18	Velocidad	ft/s	0,86	0,86	3,5	3,46				Outside film	623,34	0,0016	39,98																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	20	Propiedades líquido									Shell Side Pressure Drop	psi	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	21	Densidad	lb/ft³	62,352	62,139	60,798	61,478				Boquilla entrada	0,15	36,52																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	22	Viscosidad	cp	1,3363	0,6859	0,3553	0,4633				Inlet space X/flow	0,02	5,05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	23	Calor espec.	BTU/(lb F)	1,0026	1,0004	1	0,9997				Baffle X/flow	0,1	24,07																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	24	Cond.térmica	BTU/(ft h F)	0,335	0,356	0,383	0,373				Baffle window	0,01	3,74																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	25	Tensión Superf.	lbf/ft								Outlet space X/flow	0,02	4,97																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	26	Peso molecular		18,01	18,01	18,01	18,01				Boquilla salida	0,1	25,65																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	27	Propiedades vapor									Intermediate nozzle																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	28	Densidad	lb/ft³								Tube Side Pressure Drop	psi	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	29	Viscosidad	cp								Boquilla entrada	0,33	22,23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	30	Calor espec.	BTU/(lb F)								Entrando al Atado	0,16	10,88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	31	Cond.térmica	BTU/(ft h F)								Inside tubes	0,6	40,21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	32	Peso molecular									Saliendo del Atado	0,25	16,43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	33	Two-Phase Properties									Boquilla salida	0,15	10,26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	34	Calor latente	BTU/lb								Intermediate nozzle																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
36	Heat Transfer Parameters									Velocidad/ Rho*V2	ft/s	lb/(ft²)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
37	Reynolds No. vapor									Shell nozzle inlet	4,55	1292																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
38	Reynolds No. liquid		3113,32	6065,17	36773,89	28205,76				Shell bundle X/flow	0,86	0,86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
39	Prandtl No. vapor									Shell baffle window	1,03	1,03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
40	Prandtl No. liquid		9,67	4,66	2,24	3,01				Shell nozzle outlet	4,57	1296																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
41	Carga térmica	BTU/h								Shell nozzle intern																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
42	Vapor only		0		0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
43	2-Phase vapor		0		0					Tube nozzle inlet	6,98	2964																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
44	Calor latente		0		0					Tubos	3,5	3,46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
45	2-Phase liquid		0		0					Tube nozzle outlet	6,9	2931																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
46	Liquid only		524696		524696					Tube nozzle intern																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
48	Tubos									Deflectores																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
49	Tipo		Plain		Single segmental					Nozzles: (No./OD)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
50	ID./OD	in	0,495 / 0,625		Número	9				entrada	in	1 / 1,66	1 / 1,66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
51	Length act/eff	ft	3,18 / 2,5602		Corte(%d)	13,92				salida	1 / 1,66	1 / 1,66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
52	Pasos tubos		4		Cut orientation	H				otro	/	/																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
53	Núm.tubos		62		Espacio: c/c	in	2,5			Placa choque				None																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
54	Trazado tubos		30		Spacing at inlet	in	5,3615																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
55	Tube pitch	in	0,7812		Spacing at outlet	in	5,3615																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
56	Insertar		None																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
57	Vibration problem		No / No							RhoV2 violation				no																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

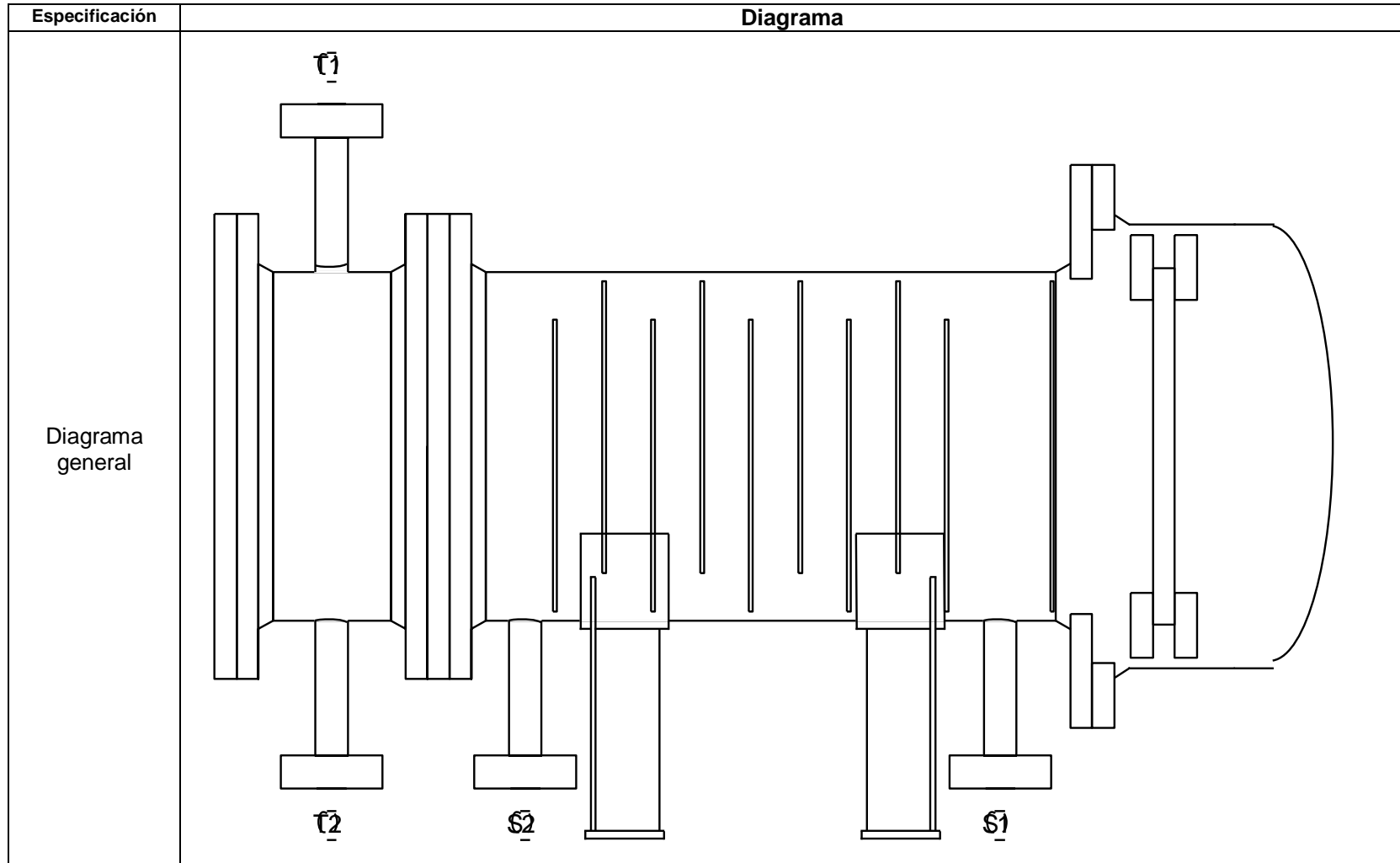
Procedimiento	Evidencia del Procedimiento																												
<p>Caída Temperatura lado coraza</p>	<p style="text-align: center;">Shellside Temperatures</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for Shellside Temperatures</caption> <thead> <tr> <th>Distance from End (in)</th> <th>SS Bulk Temp. (F)</th> <th>SS Fouling Surface Temp (F)</th> <th>Tube Metal Temp (F)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>100</td><td>128</td><td>135</td></tr> <tr><td>5</td><td>95</td><td>118</td><td>128</td></tr> <tr><td>10</td><td>88</td><td>112</td><td>125</td></tr> <tr><td>15</td><td>82</td><td>108</td><td>122</td></tr> <tr><td>20</td><td>75</td><td>102</td><td>118</td></tr> <tr><td>25</td><td>68</td><td>98</td><td>115</td></tr> </tbody> </table>	Distance from End (in)	SS Bulk Temp. (F)	SS Fouling Surface Temp (F)	Tube Metal Temp (F)	0	100	128	135	5	95	118	128	10	88	112	125	15	82	108	122	20	75	102	118	25	68	98	115
Distance from End (in)	SS Bulk Temp. (F)	SS Fouling Surface Temp (F)	Tube Metal Temp (F)																										
0	100	128	135																										
5	95	118	128																										
10	88	112	125																										
15	82	108	122																										
20	75	102	118																										
25	68	98	115																										
<p>Caída de presión en la coraza</p>	<p style="text-align: center;">Pressure Change</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for Pressure Change</caption> <thead> <tr> <th>Distance from End (in)</th> <th>Pressure Change</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>-0.29</td></tr> <tr><td>5</td><td>-0.26</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.23</td></tr> <tr><td>15</td><td>-0.20</td></tr> <tr><td>20</td><td>-0.17</td></tr> <tr><td>25</td><td>-0.14</td></tr> <tr><td>30</td><td>-0.11</td></tr> </tbody> </table>	Distance from End (in)	Pressure Change	0	-0.29	5	-0.26	10	-0.23	15	-0.20	20	-0.17	25	-0.14	30	-0.11												
Distance from End (in)	Pressure Change																												
0	-0.29																												
5	-0.26																												
10	-0.23																												
15	-0.20																												
20	-0.17																												
25	-0.14																												
30	-0.11																												

Procedimiento	Evidencia del Procedimiento
Caída temperatura lado tubo	
Caída de presión en los tubos	

Fuente: Imágenes tomada del proceso realizado por el software ASPEN ONE.

El software, además, arrojó los siguientes diagramas de diseño:

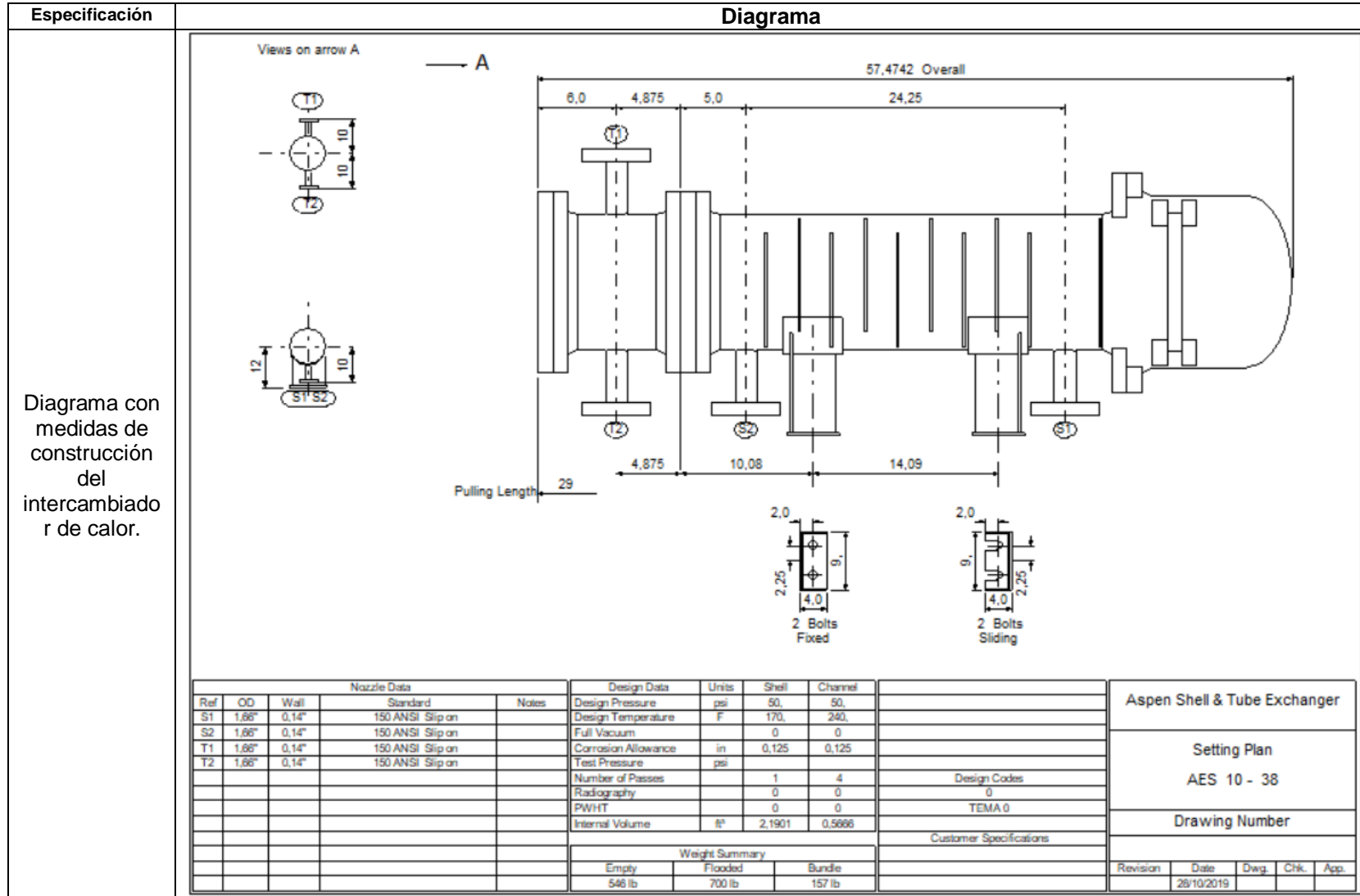
Tabla 14. Diagramas de diseño generado por ASPEN ONE



ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

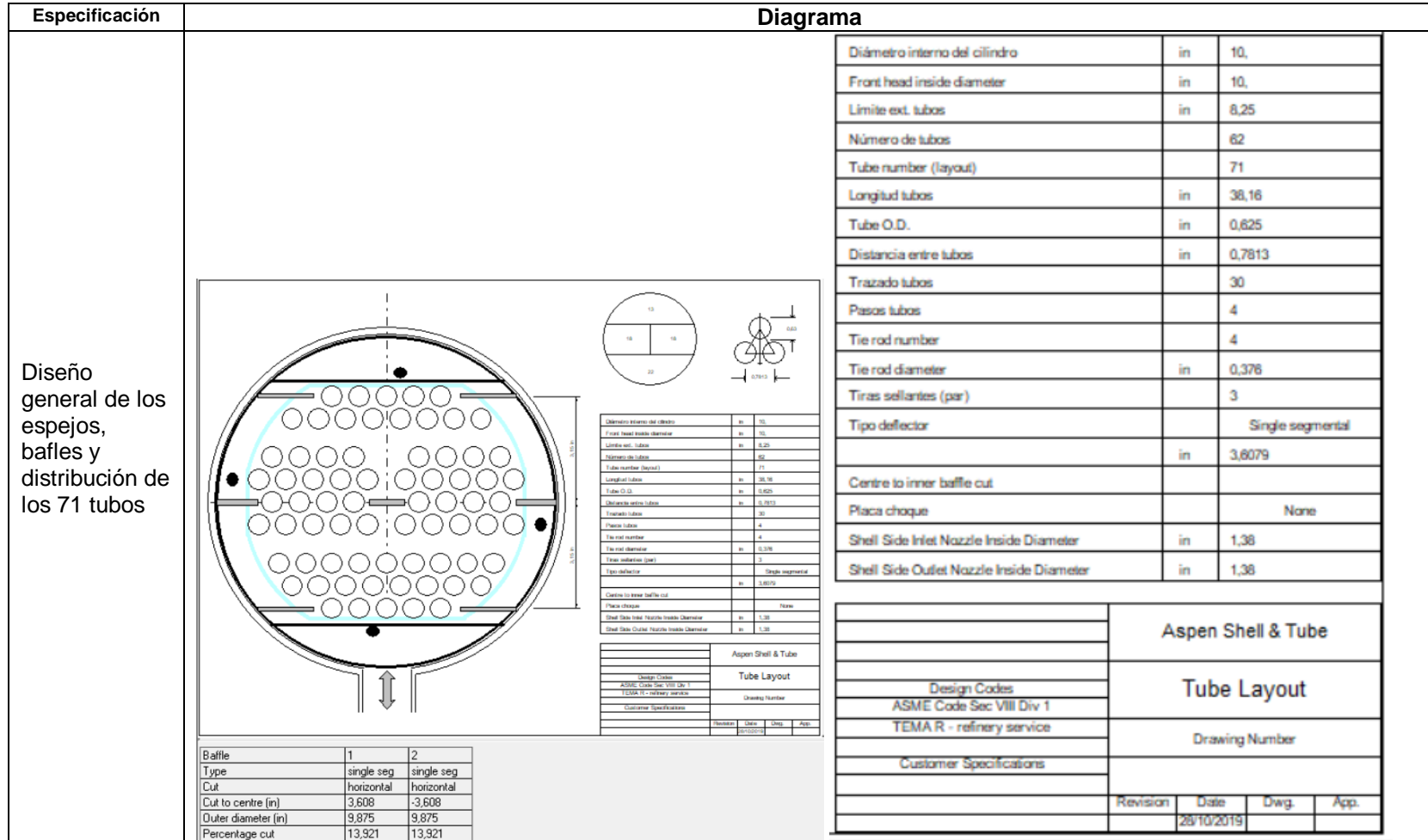
APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:



Fuente: Fuente: Imágenes tomada del proceso realizado por el software ASPEN ONE.

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

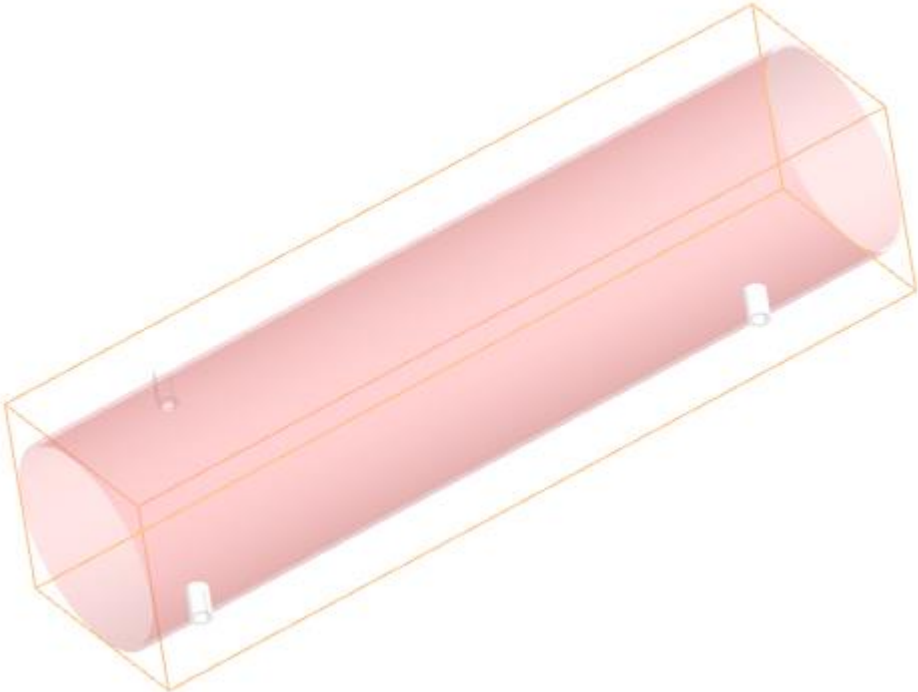

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

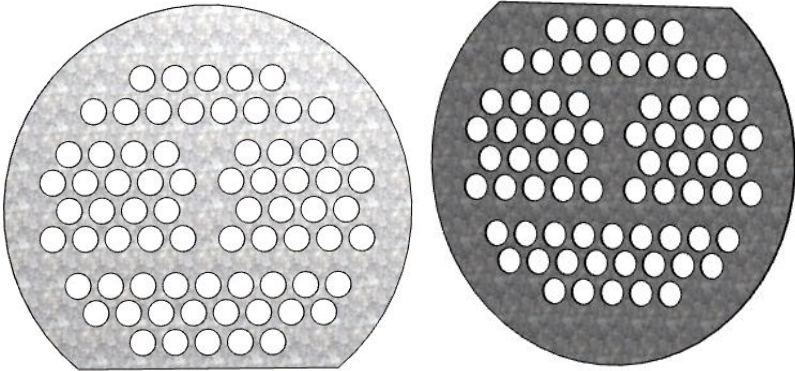
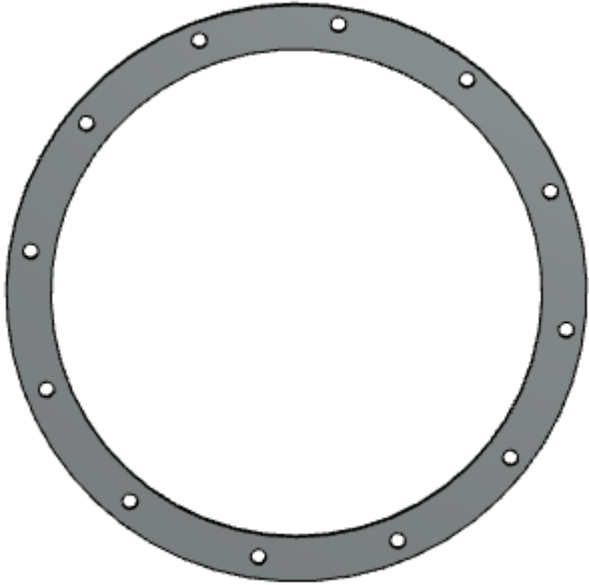
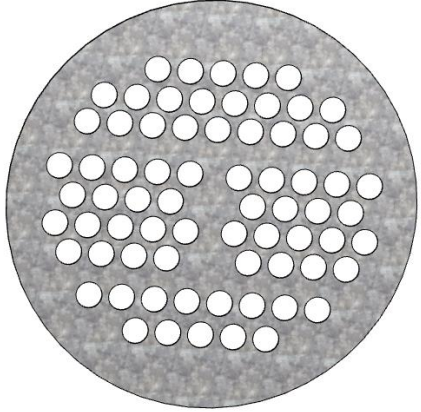
APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

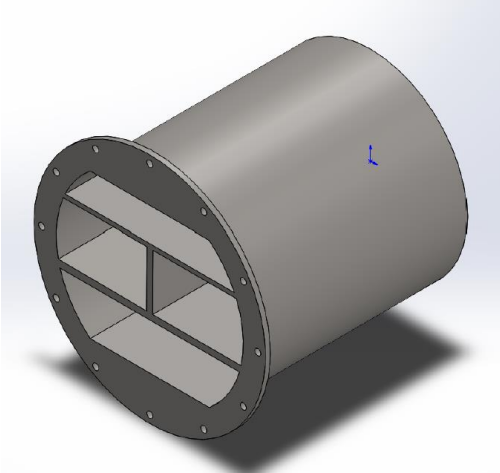
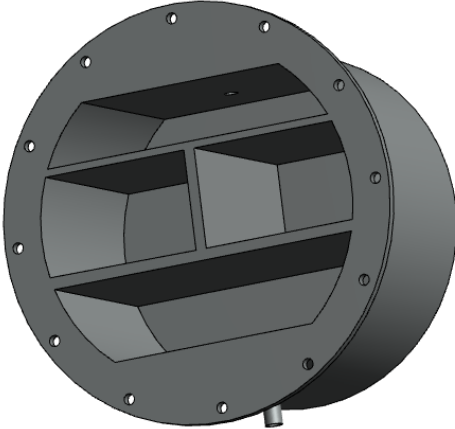

4.3. RESULTADOS DEL SOFTWARE CAD SOLIDWORKS

Usando este software, utilizando las medidas de construcción reales, se realizó el modelamiento de las respectivas piezas del intercambiador de calor, obteniéndose lo mostrado en la Tabla 15:

Tabla 15. Piezas modeladas en CAD SOLIDWORKS

Pieza	Imagen
Coraza	
Tubo	

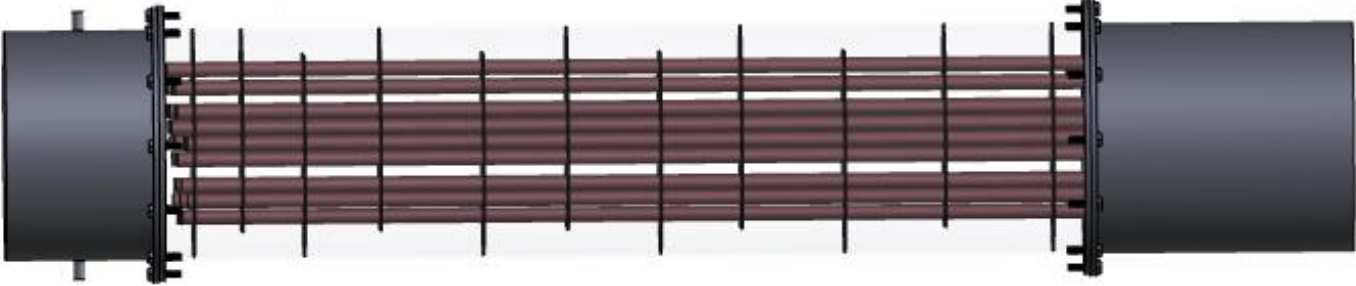
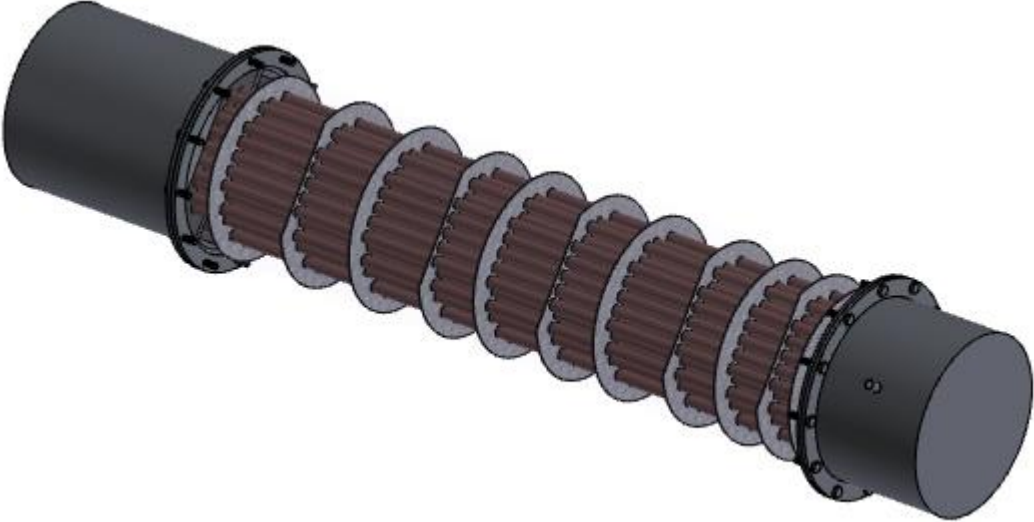
Pieza	Imagen
Baffles	
Bridas	
Espejos	

Pieza	Imagen
Cabezal 1	
Cabezal 2	
Espárrago	

Fuente: Imágenes tomadas de los archivos PDF generados por el software CAD SOLIDWORKS

Al realizar el respectivo ensamble de las piezas anteriores, se obtuvieron las siguientes imágenes, tomadas desde el software, organizadas en la

Tabla 16. Ensamblaje del intercambiador en CAD SOLIDWORK

Vista	Imagen
Horizontal	
Oblicua	

Fuente: Fuente: Imágenes tomadas de los archivos PDF generados por el software CAD SOLIDWORKS

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
 FECHA APROBACION:

4.4. CONSTRUCCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

En la Tabla 17, se presenta un comparativo entre los diseños obtenidos mediante los distintos métodos utilizados y el real.

Tabla 17. Comparación entre los diseños obtenidos y la construcción del intercambiador

ÍTEM	CÁLCULOS USANDO EL MÉTODO LMTD	DISEÑO ARROJADO POR ASPEN ONE	CONSTRUCCIÓN REAL
Carcasa	Acero al carbono 10" de diámetro, de espesor 9,27 mm.	Acero al carbono 10" de diámetro.	Tubo en acrílico transparente de 10" de diámetro, calibre 5mm, debido al uso pedagógico para el que está destinado. Este tubo fue importado, pues no se encontraba en el país, de forma que fuese entero.
Tubería	62 tubos de 3.18 ft de longitud, de cobre de 5/8" de diámetro, cédula 12, espesor de 5,5372 mm.	71 tubos de 3.18 ft de longitud, de cobre de 5/8", cédula 12.	71 tubos de 1m de longitud, de cobre de 5/8" de diámetro, cédula 12, espeso 5,5372 mm, para seguir el diseño arrojado por el software ASPEN ONE.
Configuración de la tubería.	Triangular.	Triangular.	Triangular.
Pitch para la tubería.	4/5 in	4/5 in	35/254 in, debido al desperdicio de material al realizar la construcción.
Baffles	Acero al carbón.	Acero al carbón de 11,91 mm de espesor.	Acero galvanizado calibre 16 (1,5 mm), debido a la facilidad de obtención en el mercado local, así como a la disminución de la masa total del equipo, teniendo en cuenta la delicadeza del acrílico.


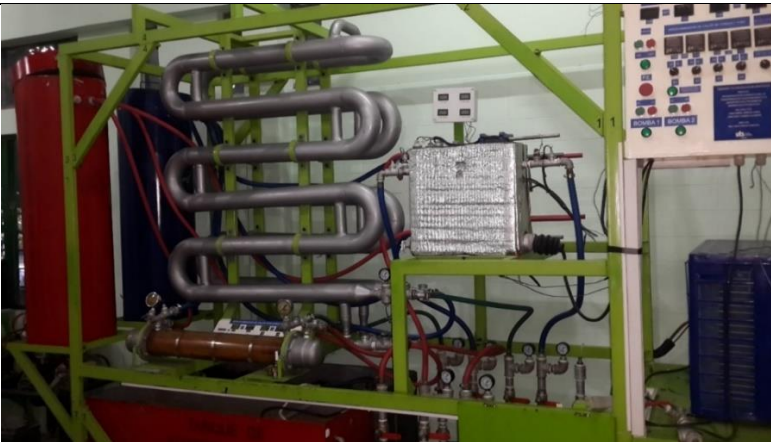

ÍTEM	CÁLCULOS USANDO EL MÉTODO LMTD	DISEÑO ARROJADO POR ASPEN ONE	CONSTRUCCIÓN REAL
Cabezales	Acero al carbón con espesor de 0,94 mm.	Cabezal tipo bonete y cabezal removible.	Acero al carbón de 1,5 mm de espesor. Ambos cabezales removibles, por facilidad de construcción y de mantenimiento.
Espejos	Acero al carbono de un espesor de 11,91 mm con un diámetro de 12 in.	Acero al carbono de un espesor de 11,91 mm con un diámetro de 12 in.	Acero galvanizado calibre 16 (1,5 mm), disminuyendo la masa de la máquina.
Acoples o Bridas	Acero al carbono con las especificaciones dadas en la parte inferior de la Imagen 27. Dimensiones brida Lap Joint / Lapped (loca) 300 lb ANSI B16.5, de 12 pulgadas de diámetro.	No se consideró.	Acero galvanizado calibre 16 (1,5 mm), disminuyendo la masa de la máquina, de 12 pulgadas de diámetro. Se siguió la construcción dada por el cálculo LMTD.
Soportes	No se consideró.	No se consideró.	Acero al carbón calibre 16 (1,5 mm), contruidos de manera adecuada al espacio disponible en el Banco Global de Transferencia.
Boquillas	Boquillas radiales.	Boquillas radiales.	Acero galvanizado de ½ in, ubicadas de forma radial, teniendo en cuenta las características del Banco Global.
Venteo	No se consideró.	No se consideró.	Acero galvanizado de 3/8 in, y válvula 1/8 in.
Impermeabilización	No se consideró	No se consideró.	Resina epóxica y fibra de vidrio.
Pintura base.	No se consideró.	No se consideró.	Cromato de zinc (513) color verde oliva.




ÍTEM	CÁLCULOS USANDO EL MÉTODO LMTD	DISEÑO ARROJADO POR ASPEN ONE	CONSTRUCCIÓN REAL
Pintura acabado.	No se consideró.	No se consideró.	Esmalte sintético (verde máquina).
Espárragos	No se consideró.	No se consideró.	12 espárragos en cada lado, de 30 mm de largo y 5/16 in.

Fuente: Autoras.

A continuación, en la Tabla 18, se presenta la evidencia fotográfica del proceso de construcción:

Tabla 18. Evidencia fotográfica de la construcción del intercambiador de calor.

Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Recepción del intercambiador de Calor de Coraza y Tubo del Banco Global de Transferencia de Calor: corresponde al intercambiador que estaba en el Banco, fuera de servicio y que fue reemplazado.</p>	
<p>Banco inicial: se evidencia el estado inicial del Banco, junto con el tamaño del intercambiador inicial.</p>	
<p>Espejos y baffles: se inicia la construcción de las partes del intercambiador de calor.</p>	

Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Ensamble de tubería y baffles: se realiza la inserción de los 71 tubos de cobre en los baffles, configurándolos</p>	
<p>Espejos y coraza: ensamble de las partes externas del intercambiador de calor.</p>	
<p>Acomodación del haz de tubos en la coraza: se introdujo el haz de tubos en el tubo de acrílico que hará las veces de coraza o carcasa del intercambiador de calor.</p>	


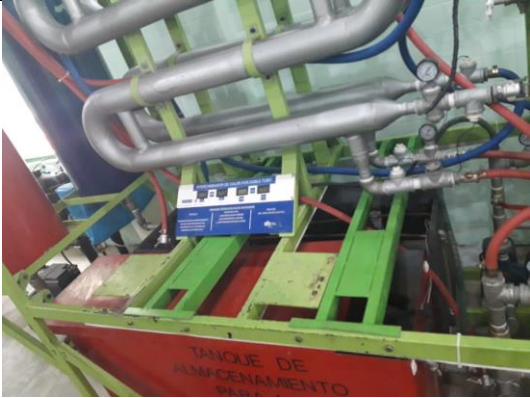
Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Sellado de fugas en los espejos: se sellan los espejos para evitar que el agua caliente se mezcle con el agua fría.</p>	
<p>Construcción de los cabezales: se construyen los cabezales tipo removibles, con las cámaras conductoras del flujo de agua caliente a través de los cuatro pasos.</p>	
<p>Pegado, sellado y pintura de los cabezales removibles y sus respectivas tapas.</p>	



Fuente: Autoras.


Adicional a lo anterior, el Banco Global de Transferencia de Calor debió intervenir en su estructura para poder realizar la respectiva instalación como se puede

evidenciar en la Tabla 19. Dicha intervención consistió en crear e instalar bases para que soporten el nuevo equipo, dado que el anterior se removió y las medidas no se correspondían. Además, se construyeron, en acero al carbón las bases del intercambiador de calor.

Tabla 19. Instalación del Intercambiador de Calor.

Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Traslado y ubicación del intercambiador construido (Intercambiador nuevo vs intercambiador antiguo).</p>	
<p>Instalación de las nuevas bases para el soporte del intercambiador: se identifican por el color verde oliva.</p>	

Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Instalación de los soportes del intercambiador de calor sobre los nuevos soportes en el Banco Global.</p>	
<p>Válvula de venteo: inicialmente no se tenía proyectada su construcción, pero al momento de la instalación se vio la necesidad y se procedió a instalarla.</p>	

Proceso y descripción	Evidencia fotográfica
<p>Instalación definitiva del intercambiador de color, con sus respectivos soportes y vinculación a los manómetros y sistema de mangueras del Banco Global.</p>	

Fuente: Autoras.

5. CONCLUSIONES

- Se determinó el estado del banco global de transferencia para pruebas de laboratorio de transferencia de calor, ubicado en la Regional Barrancabermeja, obteniendo de allí los parámetros iniciales para proceder a aplicar el método LMTD en el diseño del intercambiador de coraza.
- Se realizó el diseño térmico, hidráulico y mecánico del intercambiador de calor atendiendo las normas TEMA y ASME dispuestas para esto y siguiendo el método LMTD.
- Se hizo uso del software ASPEN ONE para realizar el modelamiento del intercambiador de calor, a partir de la parametrización obtenida del Banco Global. Los cálculos hechos siguiendo el método LMTD y los arrojados por el software no variaron significativamente.
- Se usó el software CAD SOLIDWORKS para crear las piezas que conforman el intercambiador de calor.
- Se realizó la construcción del intercambiador de calor, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los cálculos del método LMTD y lo arrojado por el software ASPEN ONE.
- Se realizó el cambio del intercambiador de calor de tubo y coraza del banco global de transferencia, por el construido en el desarrollo de este proyecto.

6. RECOMENDACIONES

Para completar la implementación del equipo instalado se recomienda:

1. Realizar mantenimiento general del Banco Global de Transferencia, limpiando los residuos acumulados en tanques de almacenamiento, tuberías, bombas y demás elementos que lo conforman. Se sugiere el uso de aire y agua, o vapor.
2. Aplicar anticorrosivo a los cuatro tanques para almacenamiento de agua, antes de proceder a llenarlos para realizar las pruebas a las que haya lugar.
3. Realizar las adecuaciones eléctricas pertinentes y punto de toma cercano al Banco Global.
4. Hacer el mantenimiento respectivo y realizar prueba de las resistencias eléctricas del tanque de calentamiento de agua.
5. Realizar las pruebas de funcionamiento del intercambiador de calor instalado, para verificar su efectividad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME. (2001). *American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code*. New York: ASME.
- Burbano, S. (2014). *Diseño Térmico Y Mecánico De Un Intercambiador De Coraza Y Tubos*. Riobamba, Ecuador.: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- Burbano, S. (2014). *DISEÑO TÉRMICO Y MECÁNICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CORAZA Y TUBOS*. Riobamba, Ecuador.: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- Caballero Tapias, L. O., Pardo Gómez, C. A., & Sánchez Tobón, Á. J. (2017). *Implementación de un intercambiador de calor de coraza y tubos conformando un banco global de transferencia para pruebas de laboratorio en las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja*. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- Caballero, L., Pardo, C., & Sánchez, Á. (2016). *Implementación de un intercambiador de calor de coraza y tubos conformando un banco global de transferencia para pruebas de laboratorio en las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja*. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- Calahorrano Bangarroto, C. R. (2012). *Diseño de un intercambiador de calor para el circuito flushing en la unidad de FCC en Refinería esmeralda*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Carrero, J. (2008). *Equipos De Transferencia De Calor: Una Guía De Estudio*. Bogotá, Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL.
- Cuadrado, K. (2010). *Diseño, construcción y pruebas de intercambiadores de carcasa y tubos para laboratorio de técnicas de la facultad de mecánica*. Riobamba, Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- Cuadrado, K. (2010). *Diseño, Construcción Y Pruebas De Intercambiadores De Carcasa Y Tubos Para Laboratorio De Termicas De La Facultad De Mecánica*. Riobamba, Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- DNBrida. (s.f.). *DNBrida*. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de <http://www.dnbrida.com/brida-ansi-asme-b16.5-lap-joint-loca-class-300.php>
- Flores González, R. (2007). *Fabricación y validación experimental de un intercambiador de tubo y coraza*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Fonseca Picón, L. A., & Riveros Vargas, L. (2009). *Diseño Térmico y Mecánico de Intercambiadores de Calor de Casco y Tubo*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Gonzalez Mendizabal, D. (2002). *Intercambiadores de calor: Tipos generales y aplicaciones*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.
- Gonzalez, M. A. (s.f). *Intercambiadores de calor*. Falcon: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). *FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. Mexico: Prentice Hall.
- Jaramillo, O. (20 de 11 de 2007). <http://www.cie.unam.mx>. Obtenido de Intercambiadores de calor: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/node8.html>

- Jaramillo, O. A. (2007). *Intercambiadores de calor*. (U. A. México, Ed.) Recuperado el 24 de 04 de 2018, de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/>
- Jouglard, M., & Perez, A. (2004). Determinacion Del Numero De Nusselt Para Tuberias Triangulares. Buenos aires, Argentina.: UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.
- Kern, D. (1965). Process Heat Transfer. En K. Donald, *Process Heat Transfer* (pág. 840). USA: MCGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY.
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Compañía Editorial Continental.
- Llangarí Lliguín, V., & Solís Sánchez, G. E. (2012). *Diseño térmico e hidráulico de un intercambiador de Coraza y Tubos*. Riobana: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Llangari, V., & Solis, G. (2012). *Diseño Termico E Hidraulico De Un Intercambiador De Coraza Y Tubos*. Riobamba, Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- LLangari, V., & Solis, G. (2012). *Diseño Termico E Hidraulico De Un Intercambiador De Coraza Y Tubos*. Riobamba, Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- Marquez, M. (2005). Combustion Y Quemadores. España: MARCOMBO S.A.,
- Martínez Rodríguez , E. (2009). *Estudio para la Selección de un Sistema de Enfriamiento de Aire Proveniente de una Batería de Sopladores de la Planta de Efluentes del Complejo Petroquímica Morelos*. Veracruz: Coatzacoalcos.
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). *Reglamento Técnico de Calderas en discusión*. Obtenido de <https://www.minminas.gov.co/blogs1?idBlog=552153>
- MINISTERIO DEL TRABAJO Y DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA. (2018). www.minambiente.gov.co. Recuperado el 10 de 10 de 2019, de <http://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59676/PROYECTO+DE+RESOLUCION+POR+LA+CUAL+SE+EXPIDE+EL+REGLAMENTO+TECNICO+DE+CALDERAS.pdf/1a7449ce-9575-7c61-2173-499a99f3ad4a>
- Naranjo, J., Portilla, J., & John, R. (2014). *IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO EN LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER*. Bucaramanga: Unidades Tecnológicas de Santander.
- Pérez Moreno, J. A. (2012). *Verificación del Diseño Mecánico y Análisis Financiero de los Intercambiadores de Calor Programados para la Reposición del 2012 en la Refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Reyes, H. (s.f.). Caracterizacion De Los Bancos De Prueba De Intercambio De Calor De Tubo Concentrico Y De Regimen Turbulento Del Laboratorio De Termicas De La UAC. Brranquilla, Colombia: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE.
- Toro, L. (2013). *Metodos Matematicos Aanzados Para La Modelacion Y Simulacion De Equipos Para Procesos Quimicos Y Biotecnologicos*. Mnizales, Colombia.: UNIVERSIDAD NACIONAL.
- Tubular Exchanger Manufacturers Association. (1999). *Standars of The Tubular Exchanger Manufacturers Association*. New York: TEMA.

- Tubular Exchanger Manufacturers Association. (1999). *Standars of The Tubular Exchanger Manufacturers Association*. New york: Tubular Exchanger Manufacturers Association.
- UTS. (26 de Marzo de 2018). *UTS*. Obtenido de <http://uts.edu.co/portal/views/prgdetalle.php?id=36&cat=2&key=ad179419f9339a7c94fb3903593e61ea>
- Villalobos, E., Lopez, P., & Gómez, F. (2017). *Diseño y modelamiento de un intercambiador de calor de tubo y carcasa bajo la normativa TEMA y ASME*. Barrancabermeja: Unidades Tecnologicas de Santander.

8. ANEXOS

ANEXO A

C / 730 APPENDIX

Table C.2 Tube Counts for 3/4-in. OD Tubes on 15/16-in. Triangular Pitch

Shell ID (in.)	TEMA L or M				TEMA P or S				TEMA U		
	Number of passes				Number of passes				Number of passes		
	1	2	4	6	1	2	4	6	2	4	6
8	64	48	34	24	34	32	16	18	32	24	24
10	85	72	52	50	60	62	52	44	64	52	52
12	122	114	94	96	109	98	78	68	98	88	78
13.25	151	142	124	112	126	120	106	100	126	116	108
15.25	204	192	166	168	183	168	146	136	180	160	148
17.25	264	254	228	220	237	228	202	192	238	224	204
19.25	332	326	290	280	297	286	258	248	298	280	262
21.25	417	396	364	348	372	356	324	316	370	352	334
23.25	495	478	430	420	450	430	392	376	456	428	408
25	579	554	512	488	518	498	456	444	534	500	474
27	676	648	602	584	618	602	548	532	628	600	570
29	785	762	704	688	729	708	650	624	736	696	668
31	909	878	814	792	843	812	744	732	846	812	780
33	1035	1002	944	920	962	934	868	840	978	928	904
35	1164	1132	1062	1036	1090	1064	990	972	1100	1060	1008
37	1304	1270	1200	1168	1233	1196	1132	1100	1238	1200	1152
39	1460	1422	1338	1320	1365	1346	1266	1244	1390	1336	1290
42	1703	1664	1578	1552	1611	1580	1498	1464	1632	1568	1524
45	1960	1918	1830	1800	1875	1834	1736	1708	1882	1820	1770
48	2242	2196	2106	2060	2132	2100	1998	1964	2152	2092	2044
54	2861	2804	2682	2660	2730	2684	2574	2536	2748	2680	2628
60	3527	3476	3360	3300	3395	3346	3228	3196	3420	3340	3286
66	4292	4228	4088	4044							
72	5116	5044	4902	4868							
78	6034	5964	5786	5740							
84	7005	6934	6766	6680							
90	8093	7998	7832	7708							
96	9203	9114	8896	8844							
108	11696	11618	11336	11268							
120	14459	14378	14080	13984							

Tabla 20. Número de pasos por la carcasa según el tipo de intercambiador de calor y la selección del diámetro de la carcasa

ANEXO B

Table 5.2 *Standard Values (Inches) for Baffle Thickness in Class R Heat Exchangers**

Shell ID, inches	Baffle spacing, inches				
	≤24	24–36	36–48	48–60	>60
8–14	0.125	0.1875	0.250	0.375	0.375
15–28	0.1875	0.250	0.375	0.375	0.500
29–38	0.250	0.3125	0.375	0.500	0.625
39–60	0.250	0.375	0.500	0.625	0.625
61–100	0.375	0.500	0.625	0.750	0.750

* Class R exchangers are for the generally severe requirements of petroleum and related processing applications.

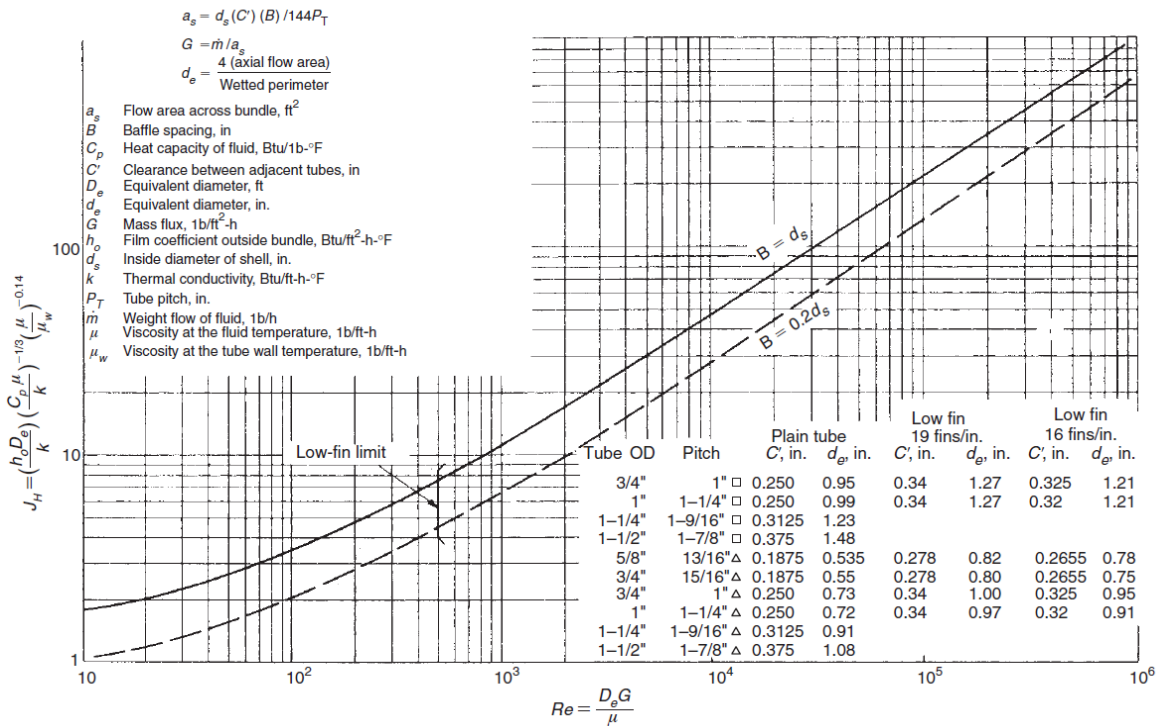
Source: HEXTRAN and TEAMS computer programs.

Tabla 21. Valores estándar (pulgadas) para el espesor del deflector en intercambiadores de calor de clase R *

Fuente: tomado de Process Heat Transfer de R.W. Serth, pág. 200

ANEXO C

Imagen 28. Correlación para el coeficiente de transferencia de calor del lado de la carcasa.



Fuente: tomado de Process Heat Transfer de R.W. Serth, pág. 110

Table 5.3 Guidelines for Sizing Nozzles

Shell size, inches	Nominal nozzle diameter, inches
4-10	2
12-17.25	3
19.25-21.25	4
23-29	6
31-37	8
39-42	10

ANEXO D

Imagen 29. Factor de transferencia de calor, lado carcaza

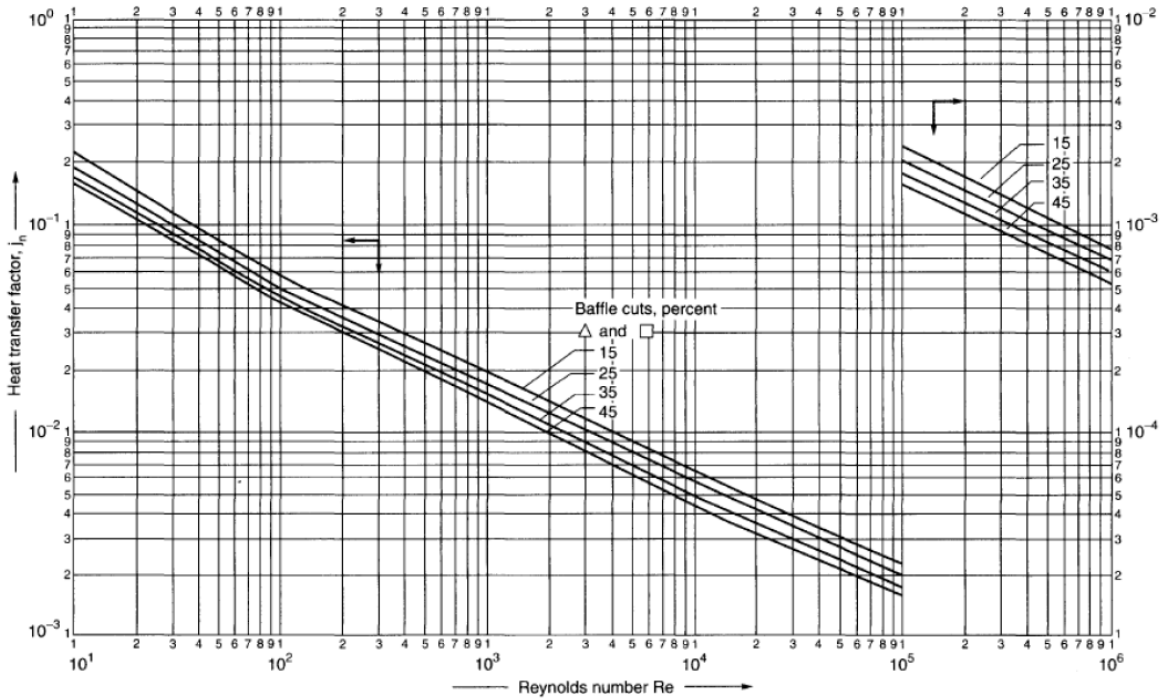


Figure 12.29. Shell-side heat-transfer factors, segmental baffles

Fuente: tomado de Process Heat Transfer de R.W. Serth

ANEXO E

Tabla 22. Espesores tubería acero al carbono Diámetros nominales 8 in a 24 in

Tamaño		Diam. exter.	SCH 5	SCH 10	SCH 20	SCH 30	STD	SCH 40	XS
NPS	DN	in	in	in	in	in	in	in	in
in	mm	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
8	200	8.625 (219.08)	0.109 (2.77)	0.148 (3.76)	0.25 (6.35)	0.277 (7.04)	0.322 (8.18)	0.322 (8.18)	0.5 (12.7)
10	250	10.75 (273.05)	0.134 (3.4)	0.134 (3.4)	0.25 (6.35)	0.307 (7.8)	0.365 (9.27)	0.365 (9.27)	0.5 (12.7)
12	300	12.75 (323.85)	0.156 (3.96)	0.156 (3.96)	0.25 (6.35)	0.33 (8.38)	0.375 (9.53)	0.406 (10.31)	0.5 (12.7)
14	350	14 (355.6)	0.156 (3.96)	0.156 (3.96)	0.312 (7.92)	0.375 (9.53)	0.375 (9.53)	0.438 (11.13)	0.5 (12.7)
16	400	16 (406.4)	0.165 (4.19)	0.165 (4.19)	0.312 (7.92)	0.375 (9.53)	0.375 (9.53)	0.5 (12.7)	0.5 (12.7)
18	450	18 (457.2)	0.165 (4.19)	0.165 (4.19)	0.312 (7.92)	0.438 (11.13)	0.375 (9.53)	0.562 (14.27)	0.5 (12.7)
20	500	20 (508)	0.188 (4.78)	0.188 (4.78)	0.375 (9.53)	0.5 (12.7)	0.375 (9.53)	0.594 (15.09)	0.5 (12.7)
22	550	22 (558.8)	0.188 (4.78)	0.188 (4.78)	0.375 (9.53)	0.5 (12.7)	0.375 (9.53)	... (...)	0.5 (12.7)
24	600	24 (609.6)	0.218 (5.54)	0.218 (5.54)	0.375 (9.53)	0.562 (14.27)	0.375 (9.53)	0.688 (17.48)	0.5 (12.7)

Fuente: ASME B36.10M

ANEXO F

Tabla A-1 Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales¹ (cont.)

Los números en paréntesis se refieren a las notas para las Tablas del apéndice A; las especificaciones son ASTM a menos que se especifique de otra forma.

Esfuerzo permitido básico, S, ksi (1), a temperatura de metal, °F														Grado	No. espec.
Temp. mín. a 100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700			
														Cobre y aleación de Cobre Tuberías y tubos (2)	
6,0	5,1	4,9	4,8	4,7	4,0	3,0	2,3	1,7	...	...	...	...	C10200, C12000, C12200	B 42
6,0	5,1	4,9	4,8	4,7	4,0	3,0	2,3	1,7	...	...	...	...	C10200, C12000, C12200	B 75
6,0	5,1	4,9	4,8	4,7	4,0	3,0	2,3	1,7	...	...	...	...	C12200	B 68
6,0	5,1	4,9	4,8	4,7	4,0	3,0	2,3	1,7	...	...	...	...	C12200	B 88
6,0	5,1	4,9	4,8	4,7	4,0	3,0	2,3	1,7	...	...	...	...	C12200	B 280
8,0	7,9	7,9	7,9	7,9	7,0	5,0	2,0	...	...	...	...	...	C23000	B 43
8,7	8,4	8,2	8,0	7,8	7,7	7,5	7,4	7,3	7,0	6,0	...	...	C70600	B 467
8,7	8,4	8,2	8,0	7,8	7,7	7,5	7,4	7,3	7,0	6,0	...	...	C70600	B 466
10,0	9,7	9,5	9,3	9,1	8,9	8,7	8,5	8,0	7,0	6,0	...	...	C70600	B 467
10,0	9,6	9,4	9,2	9,0	8,8	8,6	8,4	8,2	8,1	8,0	7,9	7,8	C71500	B 467	
10,7	10,6	10,5	10,4	10,2	10,1	9,9	9,6	9,3	8,9	8,4	7,7	7,0	C71000	B 466	
12,0	11,6	10,9	10,4	10,0	9,8	9,5	...	...	...	...	...	...	C10200, C12000, C12200	B 42
12,0	11,6	10,9	10,4	10,0	9,8	9,5	...	...	...	...	...	...	C10200, C12000, C12200	B 75
12,0	11,6	10,9	10,4	10,0	9,8	9,5	...	...	...	...	...	...	C12200	B 88

ANEXO G

2010 SECTION II, PART D (CUSTOMARY)

TABLE 1A
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3; * SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
16	Carbon steel	Wld. pipe	SA-53	E/A		K02504	...	...	1 1
17	Carbon steel	Wld. pipe	SA-53	E/A		K02504	...	...	1 1
18	Carbon steel	Wld. pipe	SA-53	E/A		K02504	...	...	1 1
19	Carbon steel	Wld. pipe	SA-53	F/A		...	...	...	1 1
20	Carbon steel	Smls. pipe	SA-53	S/A		K02504	...	...	1 1
21	Carbon steel	Smls. pipe	SA-53	S/A		K02504	...	...	1 1
22	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	A		K02501	...	...	1 1
23	Carbon steel	Wld. pipe	SA-135	A		...	...	...	1 1
24	Carbon steel	Forged pipe	SA-369	FPA		K02501	...	...	1 1
25	Carbon steel	Wld. pipe	SA-587	...		K11500	...	...	1 1
26	Carbon steel	Wld. pipe	SA-587	...		K11500	...	...	1 1

TABLE 1A
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3; * SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
16	11.7	...	11.7	...	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	10.6	9.1	7.7	6.1	4.3
17	13.7	...	13.7	...	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.0	7.1	5.0
18	11.7	11.7	11.7	...	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	10.6	9.1	7.9	6.7	5.5
19	8.2	...	8.2	...	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	7.5	6.4	...	...	...
20	13.7	...	13.7	...	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.0	7.1	5.0
21	13.7	13.7	13.7	...	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.3	7.9	6.5
22	13.7	13.7	13.7	...	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.3	7.9	6.5
23	11.7	11.7	11.7	...	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	10.6	9.1	7.9	6.7	5.5
24	13.7	...	13.7	...	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	12.5	10.7	9.0	7.1	5.0
25	13.7	...	13.7	...	13.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26	11.7	11.7	11.7	...	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	10.6	9.1	7.9	6.7	...

ANEXO H

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3;* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...	2.4 < t ≤ 4	1	1
2	Carbon steel	Plate	SA/GB 6654	16MnR	...	...	1.5 < t ≤ 2.4	1	1
3	Carbon steel	Plate	SA-455	...	K03300	...	0.58 < t ≤ 3/4	1	2
4	Carbon steel	Bar	SA-675	70	...	...	...	1	2
5	Carbon steel	Forgings	SA-105	...	K03504	...	...	1	2
6	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	70	...	1	2
7	Carbon steel	Castings	SA-216	WCB	J03002	...	...	1	2
8	Carbon steel	Forgings	SA-266	2	K03506	...	...	1	2
9	Carbon steel	Forgings	SA-266	4	K03017	...	...	1	2
10	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	1	...	1	2
11	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF2	K03011	2	...	1	2
12	Carbon steel	Forgings	SA-508	1	K13502	...	...	1	2
13	Carbon steel	Forgings	SA-508	1A	K13502	...	...	1	2
14	Carbon steel	Forgings	SA-541	1	K03506	...	...	1	2
15	Carbon steel	Forgings	SA-541	1A	K03020	...	...	1	2
16	Carbon steel	Cast pipe	SA-660	WCB	J03003	...	...	1	2
17	Carbon steel	Forgings	SA-765	II	K03047	...	...	1	2
18	Carbon steel	Plate	SA-515	70	K03101	...	...	1	2
19	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K02700	...	...	1	2
20	Carbon steel	Plate	SA/JIS G3118	SGV480	...	...	...	1	2

TABLE 1A (CONT'D)
SECTION I; SECTION III, CLASSES 2 AND 3;* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	...	...	...	...	...	...	...
2	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	...	...	...	...	...	...	...
3	20.0	20.0	20.0	...	20.0	19.9	19.0	17.9	17.3	...	...	...	...	...
4	20.0	20.0	20.0	...	20.0	19.9	19.0	17.9	17.3	16.7	14.8	12.0	9.3	6.7
5	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
6	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
7	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
8	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
9	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
10	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
11	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
12	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
13	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
14	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
15	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
16	20.0	...	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
17	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	19.6	18.4	17.8	17.2	14.8	12.0	9.3	6.7
18	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7
19	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	6.7
20	20.0	20.0	20.0	...	20.0	20.0	20.0	19.4	18.8	18.1	14.8	12.0	9.3	...

ANEXO I

Dimensiones en pulgadas y (milímetros)

Tamaño Nominal Tubería	Ø exterior O	Mínimo espesor tf	Ø Hub X	Longitud con Hub Y	Ø Mínimo agujero B	Ø Radio R	Taladros			Ø Tornillo
							Ø K centro tal.	Nº tal	Ø tal. L	
1/2 (DN15)	3.75 (95)	0.56 (14.3)	1.5 (38)	0.88 (22)	0.9 (22.9)	0.12 (3)	2.62 (66.7)	4	5/8 (15.875)	1/2 (12.7)
3/4 (DN20)	4.62 (115)	0.62 (15.9)	1.88 (48)	1 (25)	1.11 (28.2)	0.12 (3)	3.25 (82.6)	4	3/4 (19.05)	5/8 (15.875)
1 (DN25)	4.88 (125)	0.69 (17.5)	2.12 (54)	1.06 (27)	1.38 (34.9)	0.12 (3)	3.5 (88.9)	4	3/4 (19.05)	5/8 (15.875)
1 1/4 (DN32)	5.25 (135)	0.75 (19.1)	2.5 (64)	1.06 (27)	1.72 (43.7)	0.19 (5)	3.88 (98.4)	4	3/4 (19.05)	5/8 (15.875)
1 1/2 (DN40)	6.12 (155)	0.81 (20.7)	2.75 (70)	1.19 (30)	1.97 (50)	0.25 (6)	4.5 (114.3)	4	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
2 (DN50)	6.5 (165)	0.88 (22.3)	3.31 (84)	1.31 (33)	2.46 (62.5)	0.31 (8)	5 (127)	8	3/4 (19.05)	5/8 (15.875)
2 1/2 (DN65)	7.5 (190)	1 (25.4)	3.94 (100)	1.5 (38)	2.97 (75.4)	0.31 (8)	5.88 (149.2)	8	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
3 (DN80)	8.25 (210)	1.12 (28.6)	4.62 (117)	1.69 (43)	3.6 (91.4)	0.38 (10)	6.62 (168.3)	8	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
3 1/2 (DN90)	9 (230)	1.19 (30.2)	5.25 (133)	1.75 (44)	4.1 (104.1)	0.38 (10)	7.25 (184.2)	8	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
4 (DN100)	10 (255)	1.25 (31.8)	5.75 (146)	1.88 (48)	4.6 (116.8)	0.44 (11)	7.88 (200)	8	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
5 (DN125)	11 (280)	1.38 (35)	7 (178)	2 (51)	5.69 (144.4)	0.44 (11)	9.25 (235)	8	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
6 (DN150)	12.5 (320)	1.44 (36.6)	8.12 (206)	2.06 (52)	6.75 (171.4)	0.5 (13)	10.62 (269.9)	12	7/8 (22.225)	3/4 (19.05)
8 (DN200)	15 (380)	1.62 (41.3)	10.25 (260)	2.44 (62)	8.75 (222.2)	0.5 (13)	13 (330.2)	12	1 (25.4)	7/8 (22.225)
10 (DN250)	17.5 (445)	1.88 (47.7)	12.62 (321)	3.75 (95)	10.92 (277.4)	0.5 (13)	15.25 (387.4)	16	1 1/8 (28.575)	1 (25.4)
12 (DN300)	20.5 (520)	2 (50.8)	14.75 (375)	4 (102)	12.92 (328.2)	0.5 (13)	17.75 (450.8)	16	1 1/4 (31.75)	1 1/8 (28.575)
14 (DN350)	23 (585)	2.12 (54)	16.75 (425)	4.38 (111)	14.18 (360.2)	0.5 (13)	20.25 (514.4)	20	1 1/4 (31.75)	1 1/8 (28.575)
16 (DN400)	25.5 (650)	2.25 (57.2)	19 (483)	4.75 (121)	16.19 (411.2)	0.5 (13)	22.5 (571.5)	20	1 3/8 (34.925)	1 1/4 (31.75)
18 (DN450)	28 (710)	2.38 (60.4)	21 (533)	5.12 (130)	18.2 (462.3)	0.5 (13)	24.75 (628.6)	24	1 3/8 (34.925)	1 1/4 (31.75)
20 (DN500)	30.5 (775)	2.5 (63.5)	23.12 (587)	5.5 (140)	20.25 (514.4)	0.5 (13)	27 (685.8)	24	1 3/8 (34.925)	1 1/4 (31.75)
24 (DN600)	36 (915)	2.75 (69.9)	27.62 (702)	6 (152)	24.25 (616)	0.5 (13)	32 (812.8)	24	1 5/8 (41.275)	1 1/2 (38.1)

Fuente: (DNBrida, s.f.)