



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INGENIERÍA QUÍMICA

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

TEMA:

**DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CORAZA
PARA UN SISTEMA NO CORROSIVO.**

LUGAR DE REALIZACIÓN:

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

ASESOR:

M.B. ROBERTO DAVID VÁZQUEZ SÓLIS

PRESENTA:

JESÚS IVÁN BALBOA LÓPEZ

No DE CONTROL:

17270588

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

ENERO / 2022

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Al supremo creador del universo por haberme permitido llegar a esta parte de mi vida logrando uno de los objetivos de mi vida profesional, por mantenerme con salud, por dejar compartir este logro con personas que admiro y estimo mucho, y por darme la fuerza necesaria para no rendirme en los momentos difíciles, que en ocasiones sirven para que te hagas más fuerte.

A mis padres y hermanos:

Agradezco infinitamente a Mario Manuel Balboa Vázquez y Teresa López Morales, los pilares de mi vida, por apoyarme en todo momento en mi proceso de formación profesional, ya que siempre estuvieron ahí cuando más los necesité sin poner peros ni contras, procurando que siempre estuviera bien tanto en salud como económicamente, padres excelentes que todos los días de mi estancia en la universidad nunca perdieron la fe de que llegaría este momento. También agradezco a mis hermanos Carlos Balboa López y Marcos Balboa López quienes me daban sus motivaciones para seguir adelante y permanecer constante en mi vida universitaria.

A mis familiares y amigos:

A mis familiares que siempre estuvieron ahí ayudándome de alguna manera en especial a mis tíos Josefa López Vázquez y Francisco Gonzales Gutiérrez quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional, también agradezco a mis amigos más cercanos con los cuales compartí momentos que jamás se olvidaran y aquellos que no veo tan seguido pero que siempre creyeron mí.

A mis profesores:

A todos y cada uno de mis maestros los cuales me aportaron sus conocimientos para poder llegar hasta donde estoy, en especial agradezco al maestro Roberto David Vázquez Solís, por haber compartido con él tres semestres de clases y haberme permitido ser su residente en este proyecto.

RESUMEN

La residencia profesional se considera como una de las últimas actividades de la preparación de cualquier ingeniería, en esta parte protocolaria para la obtención de la titulación el alumno debe ejercer todas las habilidades adquiridas durante su preparación durante el curso de la carrera y emplearlas en un proyecto.

Es por ello que como parte de la carrera de Ingeniería Química se pretende realizar un proyecto que incluya las habilidades desde las materias básicas, hasta aquellas que son primordiales en la transformación de cualquier proceso químico, como procesos de separación, fenómenos de transporte entre otras.

Este proyecto comprende el diseño termodinámico y mecánico de un intercambiador de calor de tubos y coraza para un sistema no corrosivo, en el cual lo primero que se tendrá que realizar es establecer las bases de diseño del intercambiador de calor contemplando primeramente las propiedades fisicoquímicas de las sustancias que se van a utilizar, una vez determinado los fluidos que se usaran y sus propiedades que se hayan tomado en cuenta se procederá a realizar el diseño termodinámico del equipo en el cual se aplicará el método de Kern.

Una vez que se haya logrado tener el diseño termodinámico del equipo por el método establecido se tendrá que llevar a cabo su simulación utilizando como software de apoyo el programa de Solidwork, seguidamente se realizará el diseño mecánico de dicho equipo basándose en las normas TEMA y el código ASME los cuales rigen el diseño mecánico de los intercambiadores de calor.

Se realizará el cálculo de los costos del equipo tomando en cuenta el material con el cual se va a elaborar y todo lo que conlleva su diseño mecánico. Finalmente se realizará una optimización al equipo y se hará el reporte final evaluando la metodología del diseño del intercambiador de tubos y coraza para un sistema no corrosivo.

TABLA DE CONTENIDO

I. Índice de tablas.....	8
II. Índice de figuras.....	9
1. Introducción.....	10
2. Descripción de la empresa.....	11
3. Problemas a resolver.....	13
4. Objetivos.....	13
4.1 Objetivo general.....	13
4.2 Objetivos específicos.....	13
5. Justificación.....	14
6. Fundamentos teóricos.....	15
6.1 Conceptos generales.....	15
6.2 Fundamentos de la transferencia de calor.....	17
6.2.1 Termodinámica.....	17
6.2.2 Transferencia de calor.....	17
6.2.3 Teorías del calor.....	18
6.2.4 Mecanismos de transferencia de calor.....	18
6.2.5 Procesos de transferencia de calor.....	19
6.3 Intercambiadores de calor.....	20
6.3.1 Funcionamiento de los intercambiadores de calor.....	20
6.3.2 Tipos de intercambiadores de calor.....	21
6.3.3 Intercambiadores de calor según la trayectoria del fluido.....	21
6.3.3.1 Flujo en paralelo.....	21
6.3.3.2 Flujo en contracorriente.....	21
6.3.3.3 Flujo cruzado.....	25
6.3.3.4 Paso simple y múltiples pasos.....	25
6.3.4 Intercambiadores de calor según sus características de construcción.....	24
6.3.4.1 Intercambiador de calor tubular.....	24

6.3.4.2 Intercambiador de calor de placas.....	24
6.3.4.3 Intercambiador de calor de carcasa y tubos.....	25
6.3.4.4 Intercambiador de calor de tubo en espiral.....	25
6.3.5 Intercambiadores de calor según su función.....	26
6.3.5.1 Intercambiador de calor regenerativo.....	26
6.3.5.2 Intercambiador de calor no regenerativo.....	26
6.4 Intercambiador de calor de tubos y coraza.....	27
6.4.1 El elemento tubular.....	28
6.4.2 Tubos para intercambiadores de calor.....	29
6.4.3 Espaciado de los tubos.....	30
6.4.4 Corazas.....	30
6.4.5 Deflectores.....	31
6.4.6 Clasificación de los intercambiadores de tubos y coraza.....	33
6.4.6.1 Intercambiador de calor tipo U.....	33
6.4.6.2 Intercambiador de calor de cabezal fijo.....	33
6.4.6.3 Intercambiador de calor de cabezal flotante.....	34
6.4.7 Usos de los intercambiadores de tubos y coraza.....	35
6.5 Corrosión.....	35
6.5.1 Tipos de corrosión.....	35
6.5.2 Factores que influyen en la corrosión.....	37
6.5.2.1 Potencial eléctrico de los metales.....	37
6.5.2.2 Formación de películas.....	38
6.5.2.3 Temperatura.....	38
6.5.2.4 Velocidad.....	38
6.5.2.5 Agentes oxidantes.....	38
6.5.2.6 Acidez de la solución.....	38
6.5.3 Sistema corrosivo.....	39
6.5.4 Sistema no corrosivo.....	39
6.5.5 Principales sustancias no corrosivas.....	40

6.5.6	Materiales de diseño para fluidos no corrosivos.....	40
6.5.6.1	Acero al carbono.....	41
6.5.6.2	Acero inoxidable.....	42
6.6	Normativa de diseño.....	42
6.6.1	Código ASME.....	42
6.6.1.1	Subsección A.....	43
6.6.1.2	Subsección B.....	44
6.6.1.3	Subsección C.....	45
6.6.2	Normativa TEMA.....	45
6.6.2.1	Nomenclatura.....	46
6.6.2.2	Tolerancia de fabricación.....	46
6.6.2.3	Fabricación en general e información	46
6.6.2.4	Instalación operación y mantenimiento.....	46
6.6.2.5	Normas mecánicas del TEMA para intercambiadores de calor RCB.....	46
6.6.2.6	Vibración inducida por flujo	47
6.6.2.7	Relaciones térmicas.....	47
6.6.2.8	Propiedades físicas de fluidos.....	47
6.6.2.9	Información general.....	48
6.6.2.10	Designación de intercambiadores de coraza y tubos.....	48
6.7	Método de diseño de Kern.....	49
6.7.1	Consideraciones generales de diseño.....	49
6.8	Glicerina al 100%.....	50
6.9	Etilenglicol	53
7.	Procedimiento y descripción de las actividades realizadas.....	54
7.1	Diseño termodinámico del intercambiador de calor de tubos y coraza.....	55
7.2	Diseño mecánico del intercambiador de calor de tubos y coraza.....	77
7.3	Simulación del intercambiador de calor de tubos y coraza.....	89

7.4 Estimación de costos de inversión y operación del intercambiador.....	91
8. Resultados del proyecto.....	93
8.1 Resultados del diseño termodinámico del intercambiador de calor.....	93
8.2 Resultados del diseño mecánico del intercambiador de calor.....	93
8.3 Resultados de los planos del intercambiador de calor.....	96
8.4 Resultados de los costos del intercambiador de calor.....	96
9. Conclusiones del proyecto.....	101
10. Competencias desarrolladas y/o aplicadas.....	102
11. Fuentes de información.....	103
12. Anexos.....	104

Índice de Tablas

Tabla 1. Factor de corrección.....	59
Tabla 2. Propiedades de los fluidos a temperatura promedio.....	60
Tabla 3. UD de sustancias.....	60
Tabla 4. Factor Jh	62
Tabla 5. Factor de transferencia.....	66
Tabla 6. Viscosidades.....	68
Tabla 7. Factor de fricción.....	71
Tabla 8. Gravedad específica.....	72
Tabla 9. Perdida de progresos.....	73
Tabla 10. Factores de fricción.....	75
Tabla 11. Composición de sustancias.....	76
Tabla 12. Espesor de deflectores.....	80
Tabla 13. Diámetro de boquillas.....	86
Tabla 14. Dimensiones de bridas.....	87
Tabla 15. Costos de intercambiadores.....	91

Índice de Figuras

Figura 1. La energía como calor.....	15
Figura 2. La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma.....	17
Figura 3. Intercambiador de calor.....	20
Figura 4. Flujo paralelo.....	21
Figura 5. Flujo en contracorriente.....	22
Figura 6. Flujo cruzado.....	23
Figura 7. Paso simple y múltiples pasos.....	23
Figura 8. Intercambiador de calor tubular.....	24
Figura 9. Intercambiador de calor de placas.....	25
Figura 10. Intercambiador de calor de coraza y tubos.....	25
Figura 11. Intercambiador de tubo en espiral.....	26
Figura 12. Partes de un intercambiador de calor de tubos y coraza.....	27
Figura 13. Tubo rolado.....	28
Figura 14. Casquillos.....	29
Figura 15. Arreglos comunes de tubos para intercambiador.....	29
Figura 16. Tipos de coraza.....	31
Figura 17. Espaciador de deflectores.....	32
Figura 18. Deflector de segmento.....	32
Figura 19. Deflector de corona y disco.....	32
Figura 20. Deflector de orificio.....	32
Figura 21. Intercambiador de calor tipo U.....	32
Figura 22. Intercambiador de cabezal fijo.....	34
Figura 23. Intercambiador de cabezal flotante.....	34
Figura 24. Tubos de acero al carbón.....	41
Figura 25. Tubos de acero inoxidable.....	41
Figura 26. Ficha técnica de la glicerina.....	50
Figura 27. Glicerina.....	52
Figura 28. Ficha de seguridad del etilenglicol.....	53
Figura 29. Etilenglicol.....	53
Figura 30. Tipos de cascos.....	80

1. Introducción

Los intercambiadores de calor son equipos de proceso ampliamente utilizados en el sector industrial ya que son empleados desde las industrias que se dedican a la fabricación de alimentos como la industria energética, es por ello que es casi indispensable que los ingenieros químicos sepan cómo se lleva a cabo el diseño de un intercambiador de calor.

Este proyecto de residencia tiene como fin el diseño termodinámico y mecánico de un intercambiador de calor de tubos y coraza ya que por lo regular es el tipo de intercambiador más utilizado, se pretende demostrar en base a los cálculos que se realicen en su diseño mecánico la simulación de los planos empleando un software operativo que en este caso es Solidwork, al igual que el costo e inversión que tendrá el equipo.

Es importante mencionar que el intercambiador de calor de tubos y coraza se diseñará para sistemas no corrosivos, es decir, los fluidos empleados en este equipo por lo regular son sustancias con un potencial de hidrógeno neutro o básico como lo son las sustancias orgánicas ligeras en este caso los alcoholes y como sustancia principal el agua ya que siempre se toma como fluido base para el diseño de estos equipos.

Las sustancias que se emplearan para el diseño del equipo son glicerina al 100% y etilenglicol, sustancias con un pH casi neutro y temperaturas adecuadas para llevar a cabo el proceso, ambas sustancias tienen un índice muy bajo de corrosión, todos los datos usados como la alimentación al intercambiador, serán utilizados con base a referencias de procesos en los cuales son empleadas estas sustancias.

El material con el cual se pretende diseñar el intercambiador de calor es acero al carbón ya que es el material más empleado en procesos donde los índices de corrosión no son altos por las propiedades de las sustancias que se manejan dentro de ellos.

2. Descripción de la empresa

Escudos:



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO
campus TUXTLA GUTIÉRREZ



Nombre: Tecnológico Nacional de México Campus Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Director: Mtro. José Manuel Rosado Pérez

Subdirector académico: Mtro. José Ángel Zepeda Hernández

Jefe del departamento de Ingeniería Química y Bioquímica: Mtro. Amín Rodríguez Meneses

Coordinador de Ingeniería Química: Mtro. Geovanny de Jesús Robles Escobar

Presidente de la academia de Ingeniería Química: Mtro. René Cuesta Díaz

Asesor interno y externo del proyecto de residencia profesional: Mtro. Roberto David Vázquez Solís

Dirección: Carretera Panamericana km 1080, Col Terán. C.P. 29050, Apartado postal: 599, Tels. (961)61 504 61, (961)61 501 38, (961)61 548 08

Misión: formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.

Visión: ser una institución de Excelencia en la Educación Superior Tecnológica del Sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

Valores: El ser humano, El espíritu de servicio, El liderazgo, El trabajo en equipo, La calidad, El alto desempeño, Respeto al medio ambiente.

Oferta educativa:

- **Licenciaturas:** Ingeniería mecánica, Ingeniería en sistemas computacionales, Ingeniería industrial, Ingeniería electrónica, Ingeniería eléctrica, Ingeniería bioquímica, Ingeniería química, Ingeniería en logística, Ingeniería en gestión empresarial.
- **Maestrías:** Maestría en ciencias en ingeniería bioquímica, Maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica.
- **Doctorados:** Doctorado en ciencias de los alimentos y biotecnología, Doctorado en ciencias de la ingeniería.
- **Educación a distancia:** Ingeniería industrial, Ingeniería en sistemas computacionales.

Este proyecto de residencia profesional titulado *“Diseño de un intercambiador de tubos y coraza para un sistema no corrosivo”* será realizado en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Química en el Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Dicho instituto se encuentra ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas cuenta con una matrícula de más de 4,000 estudiantes, impartiendo actualmente 9 licenciaturas, 2 maestrías y 2 doctorados. Actualmente es la universidad líder en el ramo de las ingenierías en el estado de Chiapas colocándose también como uno de los mejores Institutos Tecnológicos del sureste mexicano según información de la Asociación Nacional de Escuelas y Facultades de Ingeniería.

Dentro de la oferta educativa que ofrece este instituto se encuentra ingeniería química, carrera que exige como requisito primordial la acreditación de la residencia profesional en el último semestre del curso. Sin embargo, la escuela cuenta con ciertos convenios con algunas empresas del sector privado en las cuales los alumnos pueden desarrollar sus habilidades o incluso dentro de la misma universidad, ya que esta cuenta con laboratorios y un polo-tecnológico preparados para desarrollar cualquier proyecto de investigación que se encuentre a su alcance.

El proyecto de residencia antes mencionado que se pretende desarrollar en esta institución se realizará en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería química pesada.

3. Problemas a resolver

El dilema que se espera resolver en el desarrollo del proyecto de residencia es el diseño del intercambiador de calor de tubos y coraza para un sistema no corrosivo, es decir, su diseño termodinámico debe establecer las bases concretas para que el funcionamiento sea preciso con los datos de temperaturas, presiones, etc. El diseño mecánico debe establecer el tipo de material adecuado para los tubos y la coraza, y finalmente al llevar a cabo la simulación del equipo debe de funcionar correctamente con los datos ya calculados y determinados mediante las normas y códigos establecidos.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Elaborar el diseño termodinámico y mecánico de un intercambiador de calor de tubos y coraza para un sistema no corrosivo, que se pueda construir y operar en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

4.2 Objetivos específicos

- ❖ Diseñar bajo los criterios termodinámicos el intercambiador de tubos y coraza para un sistema no corrosivo.
- ❖ Simular el funcionamiento del intercambiador de tubos y coraza para un sistema no corrosivo.
- ❖ Optimizar el diseño termodinámico del intercambiador de calor en función del equipo.
- ❖ Integrar el expediente técnico para la posible construcción y puesta en operación del intercambiador de calor.

5. Justificación

De acuerdo al plan de estudios vigente de la carrera de Ingeniería Química del Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez uno de los requisitos que se deben cumplir para poder alcanzar el grado de titulación de la licenciatura es la acreditación de la residencia profesional.

Sin embargo, en dicha carrera también se ofrece una amplia gama de proyectos que se encuentran enfocados en el área de transferencia de calor y masa, temas que son de gran relevancia e importancia para la aplicación de las habilidades que se adquieren durante el transcurso de la carrera.

Este proyecto tiene como fin el diseño termodinámico y mecánico de un intercambiador de calor de tubos y coraza para un sistema no corrosivo, actualmente se sabe que los intercambiadores de calor que más se emplean en las industrias, así como también en los laboratorios de experimentos pesados en las universidades son los de tubos y coraza.

Es importante mencionar que el proyecto tiene la finalidad que pueda ser puesto en marcha, es por eso que se pretende enfocar su elaboración en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Química del instituto, para que en un futuro los estudiantes y el docente asesor en turno puedan elaborarlo si así lo desean sin inconveniente alguno.

Los intercambiadores de calor son una de las bases primordiales de las industrias y procesos químicos, es por ello que los estudiantes en su proceso de formación como ingenieros químicos deben tener todos los conocimientos básicos sobre el diseño de estos equipos, quizá no de todos, pero de los más usados como lo son los intercambiadores de tubos y coraza es muy necesario.

Es muy importante tener en cuenta que para fortalecer los conocimientos de investigación teóricos es llevándolos a la práctica. Actualmente se cuenta con muchas facilidades para poder lograr la implementación de nuevos equipos en el laboratorio de ingeniería química del instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez solo es cuestión de que alumnos y maestros puedan lograrlo.

6. Fundamentos teóricos

6.1 Conceptos generales

Intercambiador de calor:

Un equipo de intercambio de calor es el que transfiere energía térmica desde una fuente o un fluido a alta temperatura hacia un fluido a baja temperatura con ambos fluidos moviéndose a través del aparato. Esta transferencia puede realizarse por contacto directo entre los fluidos o través de una pared que separa la fuente y el fluido o los fluidos (Labat, 2018).

Calor:

Se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura (ver Figura 1). Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura (Yunus A Cengel, 2012).

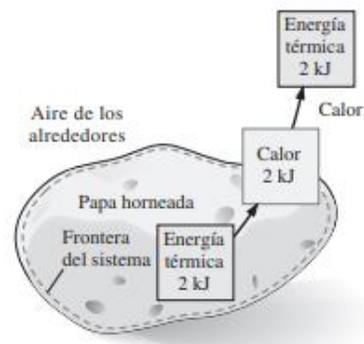


Figura 1 La energía como calor Fuente: (Yunus A Cengel, 2012)

Energía Interna:

La energía interna de una sustancia no incluye no incluye la energía que esta pueda poseer como resultado de su posición macroscópica o su movimiento. Más bien se refiere a la energía de las moléculas internas de las sustancias. Debido a su movimiento incesante, todas las moléculas poseen energía cinética de traslación y, exceptuando a las moléculas monoatómicas, también poseen energía interna de rotación y vibración interna (J. M. Smith, 2007).

Presión de operación o presión de trabajo:

Es la máxima presión manométrica permitida a una temperatura especificada del recipiente, durante la operación de éste. Esta limitada por los espesores nominales de cada elemento del recipiente, sin considerar los espesores adicionales por corrosión u otras cargas, así como los valores de los esfuerzos máximos permisibles de los materiales, conforme a las reglas y fórmulas aplicables para el diseño y construcción de estos recipientes (DOF, 1993).

Presión de diseño:

Es la presión coincidente con una temperatura especificada a las condiciones de operaciones predeterminadas más severas, para calcular el espesor de pared o las características físicas de las diferentes partes de un recipiente (DOF, 1993).

Presión de trabajo máxima permisible:

Presión máxima a la que puede ser sometido un equipo de proceso durante su funcionamiento. Para poder calcular esta presión, es necesario que el equipo se encuentre en su posición normal de operación, que haya condiciones de corrosión y que esté sometido a la temperatura de diseño (Labat, 2018).

Temperatura de operación:

Temperatura a la que el intercambiador estará expuesto habitualmente durante su funcionamiento (Labat, 2018).

Temperatura de diseño:

Es la temperatura que se utilizará durante el diseño del intercambiador (J. M. Smith, 2007).

Eficiencia de las soldaduras:

Se utiliza para comprobar si se puede confiar en las soldaduras y con qué intensidad ha sido realizado el proceso de inspección. Se mide en porcentajes (Labat, 2018).

6.2 Fundamentos de procesos de transferencia de calor

6.2.1 Termodinámica:

Se puede definir como la ciencia de la energía. Aunque todo el mundo tiene la idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios.

El término *termodinámica* proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia.

Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el **principio de conservación de la energía**. Éste expresa que, durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye. Una roca que cae de un acantilado, por ejemplo, adquiere velocidad como resultado de su energía potencial convertida en energía cinética (ver Figura 2) (Yunus A Cengel, 2012).

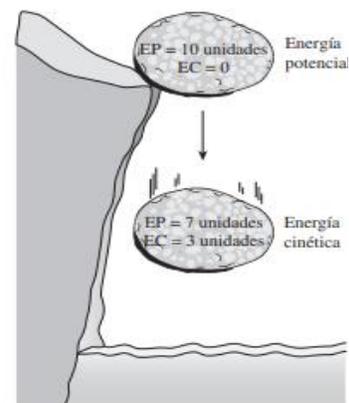


Figura 2 La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma
Fuente: (Yunus A Cengel, 2012)

6.2.2 Transferencia de calor:

La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la *transferencia de calor* está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados *fuentes* y *recibidor*. Cuando se vaporiza una libra de agua se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o recibidor independiente es, sin embargo, inherentemente muy

diferente. Generalmente, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación (Kern, 2012).

6.2.3 Teorías del calor:

El estudio de la transferencia de calor se facilitará grandemente mediante una cabal comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo, esta es una ventaja que no está fácilmente disponible para estudiantes de transferencia de calor o termodinámica, ya que se han descubierto muchas manifestaciones del calor, lo que ha impedido que una teoría simple las cubra a todas ellas. Las leyes pueden aplicarse a transiciones de masa pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y aquellas que son aplicables a las bajas temperaturas pueden no serlo a las temperaturas altas. Para propósito de ingeniería es necesario comenzar el estudio con formación básica acerca de unos cuantos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida y gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierda la rigidez. En la fase gas la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas de manera que pueden permanecer en cualquier lugar en un espacio cerrado. También se ha establecido que, dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición (Kern, 2012).

6.2.4 Mecanismos de transferencia de calor:

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación (Kern, 2012).

- **Conducción:**

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas.

- **Convección:**

Es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido.

- **Radiación:**

Es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones), la radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente o un receptor.

6.2.5 Procesos de transferencia de calor:

Se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores, tratados usualmente de manera independiente. Los *procesos de transferencia de calor* se relacionan con las razones de intercambio térmico tales como los que ocurren en los equipos de transferencia de calor, tanto en ingeniería mecánica como en los procesos químicos. Un problema típico de procesos de transferencia de calor involucra las cantidades de calor que deban transferirse, las razones a las cuales pueden transferirse debido a la naturaleza de los cuerpos, la diferencia de potencial, la extensión y arreglo de las superficies que separan la fuente y el receptor, y la cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia de calor. Puesto que la transferencia de calor considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor deberá ser igual al calor absorbido por otro *dentro de los confines del mismo sistema* (Kern, 2012).

6.3 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten la transferencia de calor entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas (ver Figura 3). Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son muy variadas y reciben diferentes nombres (Sadik Kakac, 2012):

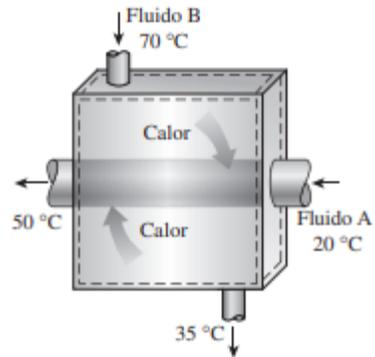


Figura 3 Un intercambiador de calor puede ser tan simple como dos tuberías concéntricas
Fuente: (Yunus A Cengel, 2012)

- **Condensador:** son enfriadores cuyo propósito es eliminar el calor latente.
- **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.
- **Enfriador:** enfría un fluido generalmente por medio de agua.
- **Calentador:** aplica calor sensible a un fluido (Sadik Kakac, 2012).

6.3.1 Funcionamiento de los intercambiadores de calor

Como hemos visto hasta ahora, la función general de un intercambiador de calor es transferir calor de un fluido a otro. Los componentes básicos de los intercambiadores se pueden ver como un tubo por donde un flujo de fluido está pasando mientras que otro fluido fluye alrededor de dicho tubo. Existen por tanto tres intercambios de calor que necesitan ser descritos (Jaramillo, 2007):

1. Transferencia de calor convectiva del fluido hacia la pared interna del tubo.
2. Transferencia de calor conductiva a través de la pared del tubo.
3. Transferencia de calor convectiva desde la pared externa del tubo hacia el fluido exterior (Jaramillo, 2007).

6.3.2 Tipos de intercambiadores de calor

Hay varias maneras de clasificar los intercambiadores de calor.

- Intercambiadores de calor según la trayectoria de los fluidos.
- Intercambiadores de calor según sus características de construcción.
- Intercambiadores de calor según su función (Sadik Kakac, 2012).

6.3.3 Intercambiadores de calor según la trayectoria de los fluidos

Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Las tres categorías son: Flujo en paralelo, Flujo en contracorriente y Flujo cruzado (Jaramillo, 2007).

6.3.3.1 Flujo en paralelo:

Como lo muestra en la Figura 4, cuando el flujo interno y externo fluyen en la misma dirección y sentido, se define flujo paralelo. Los dos fluidos entran al intercambiador de calor por el mismo extremo y 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 (Sadik Kakac, 2012).

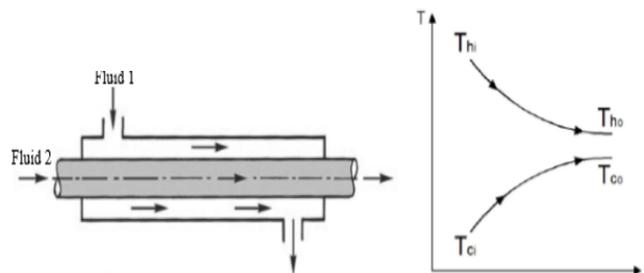


Figura 4 Flujo Paralelo Fuente: (Sadik Kakac, 2012)

6.3.3.2 Flujo en contracorriente

Se presenta contracorriente o contraflujo cuando los dos fluidos corren en sentido opuesto, como se aprecia en la Figura 5. 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 (Sadik Kakac, 2012).

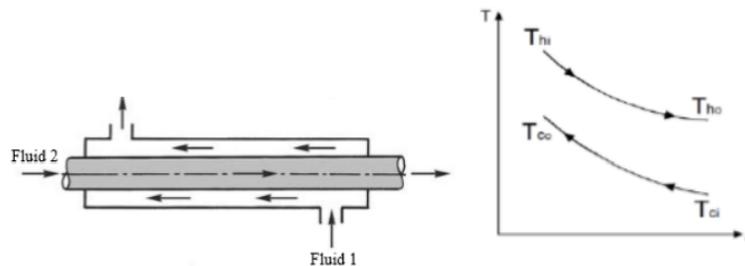


Figura 5 Flujo en contracorriente Fuente: (Sadik Kakac, 2012)

6.3.3.3 Flujo cruzado:

En la Figura 6 se muestra como en el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usado donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico. Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcaza del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y éste se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utiliza este tipo de intercambiador de calor (Sadik Kakac, 2012).

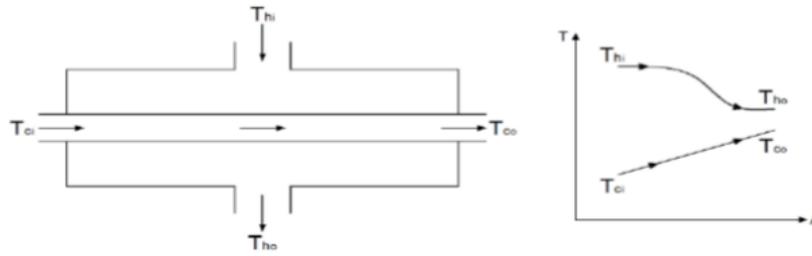


Figura 6 Flujo Cruzado Fuente: (Sadik Kakac, 2012)

6.3.3.4 Paso simple y múltiples pasos:

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 sólo intercambia calor en una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso. En la Figura 7 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, el doblez 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 baffles o platos dentro del intercambiador.

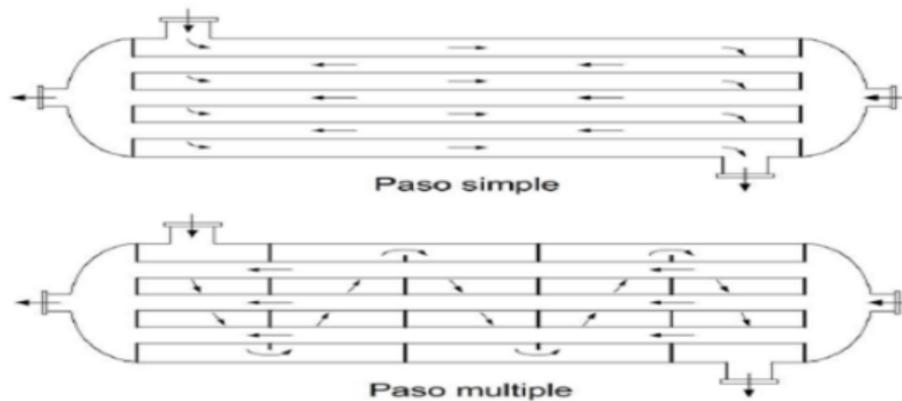


Figura 7 Paso simple y múltiples pasos Fuente: (Sadik Kakac, 2012)

6.3.4 Intercambiadores de calor según sus características de construcción

Si bien los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las siguientes categorías: tubulares, placas, carcaza y tubo y tubo es espiral. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación (Jaramillo, 2007).

6.3.4.1 Intercambiador de calor tubular:

Este intercambiador es generalmente construido por tubos circulares, elípticos, rectangulares, redondos y planas (ver Figura 8). Existe una considerable flexibilidad en el diseño, porque la geometría puede variar fácilmente cambiando el tubo de diámetro, posición y longitud. Este intercambiador de calor es diseñado para presiones relativamente altas. Se utilizan principalmente líquido-líquido y líquidos con cambios de fase (condensación y evaporación). Se utilizan para gas-líquido y gas-gas en las aplicaciones de transferencia de calor en las que la temperatura y presión de funcionamiento son muy altas (Labat, 2018).



Figura 8 Intercambiador de calor tubular Fuente: (Labat, 2018)

6.3.4.2 Intercambiador de calor de placas:

Consisten en una estructura con placas metálicas generalmente corrugadas y montadas a presión, que forman el área necesaria para la transferencia de calor, con orificios de acuerdo a la disposición de flujo. Estos intercambiadores no pueden soportar altas presiones ni temperaturas (ver Figura 9) (Labat, 2018).

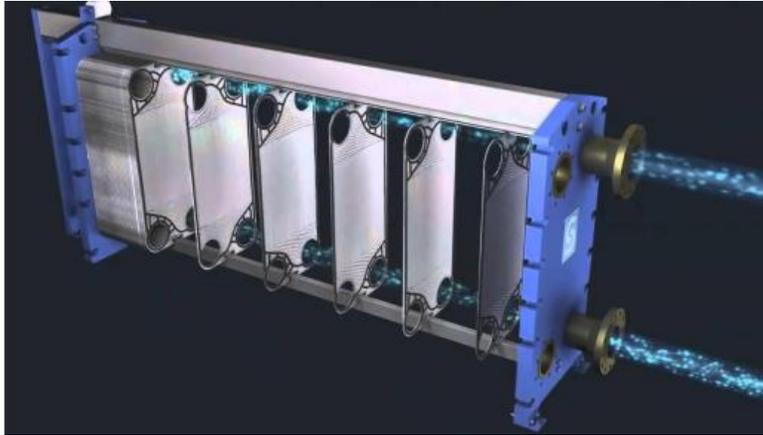


Figura 9 Intercambiador de calor de placas Fuente: (Labat, 2018)

6.3.4.3 Intercambiador de carcasa y tubos:

Los intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos (ver Figura 10) son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí. Las corrientes de fluido que están involucradas en esa forma, están separadas entre sí por una pared de tubo, o por cualquier otra superficie, la cual forma el camino de transferencia del calor. Este intercambiador es construido para evitar fugas, por facilidad de limpieza, y para controlar más fácilmente la corrosión (Labat, 2018).

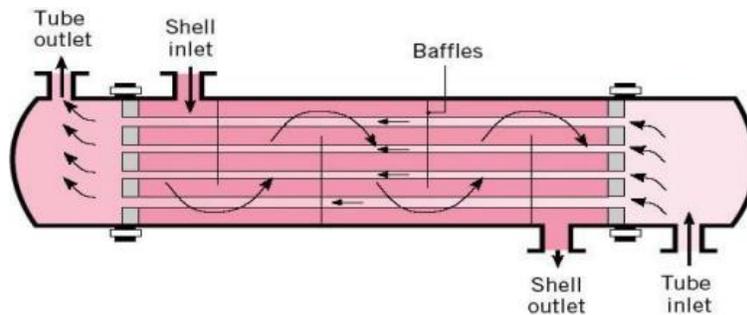


Figura 10 Intercambiador de calor de coraza y tubos Fuente: (Yunus A Cengel, 2012)

6.3.4.4 Intercambiador de calor de tubo en espiral:

Este intercambiador consiste en una o más bobinas en forma de espiral colocadas dentro de un depósito. La tasa de transferencia de calor asociada con un tubo en

espiral es mayor que la de un tubo recto. La desventaja de este intercambiador es la limpieza del mismo (ver Figura 11) (Labat, 2018).

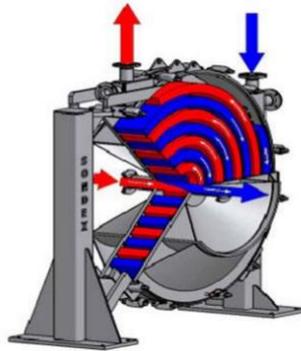


Figura 11 Intercambiador de calor de tubo en espiral Fuente: (Labat, 2018)

6.3.5 Intercambiadores de calor según su función:

Los intercambiadores de calor también pueden ser clasificados por su función como Intercambiadores regenerativo y no regenerativos (Kern, 2012).

6.3.5.1 Intercambiador de calor regenerativo:

Un intercambiador regenerativo es aquel donde un fluido transfiere su calor a un regenerador y posteriormente regresa al sistema, ya que el fluido que es removido del proceso principal contiene energía, el calor del fluido que abandona el sistema se usa para recalentar el fluido de regreso (Kern, 2012).

6.3.4.2 Intercambiador de calor no regenerativo:

En un intercambiador de calor no regenerativo, el fluido con mayor temperatura es enfriado por un fluido de un sistema separado, y la energía removida no es regresada al sistema (Kern, 2012).

6.4 Intercambiadores de calor de tubos y coraza:

Como su nombre indica, los intercambiadores de calor son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclados. Los intercambiadores de calor se usan ampliamente en varias industrias y su diseño es variado (Yunus A Cengel, 2012).

La forma más simple de un intercambiador de calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza), y que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos. Un fluido corre por el tubo interno mientras otro lo hace en el espacio anular entre ambos tubos. El calor se transfiere del fluido caliente al frío a través de la pared que los separa. Algunas veces el tubo interno tiene un par de vueltas dentro de la coraza para aumentar el área de transferencia de calor y, por consiguiente, la tasa de transferencia de calor. Las cámaras de mezclado analizadas antes se clasifican a veces como intercambiadores de calor de *contacto directo* (Yunus A Cengel, 2012).

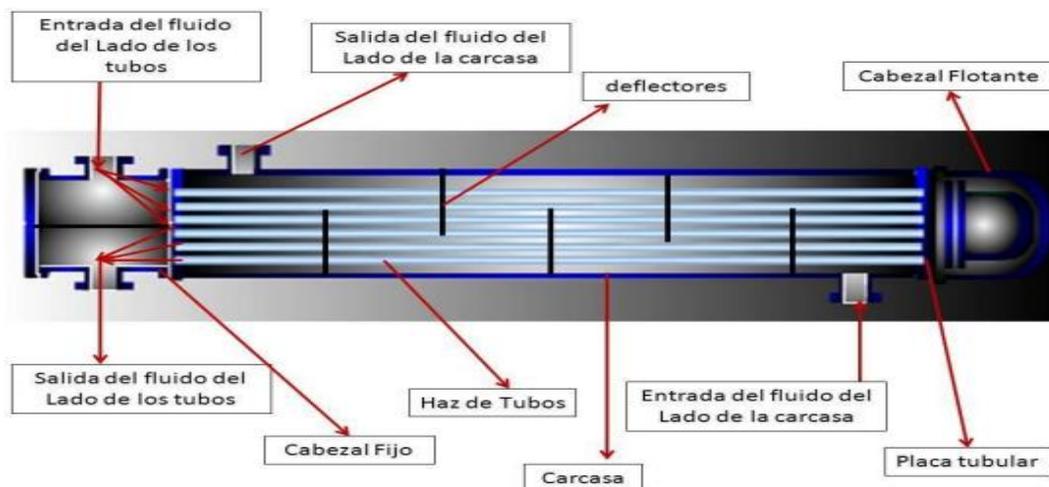


Figura 12 Partes de un intercambiador de calor de tubos y coraza Fuente: (Jaramillo, 2007)

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos se construyen de tubos redondos montados en una coraza cilíndrica con los tubos paralelos a la coraza. Un fluido fluye dentro de los tubos, mientras que el otro fluido a través y a lo largo del eje del intercambiador como se muestra en la Figura 12. Los principales componentes de

este intercambiador son tubos (haz de tubos), coraza, cabecera frontal, cabeza de la parte trasera, deflectores y placas de tubos (Yunus A Cengel, 2012).

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos proporcionan grandes superficies de área de transferencia de calor a volumen y peso, que puedan limpiarse fácilmente. Ellos ofrecen una gran flexibilidad para satisfacer casi cualquier requisito de servicio. Los intercambiadores de calor de coraza y tubos pueden ser diseñados para altas presiones relativas a las diferencias de medio ambiente y de alta presión entre las corrientes de fluido (Yunus A Cengel, 2012).

6.4.1 El elemento tubular

La satisfacción de muchas demandas industriales requiere el uso de un gran número de horquillas de doble tubo. Estas consumen considerable área superficial, así como presentan un número considerable de puntos en los cuales puede haber fugas. Cuando se requieren superficies grandes e transferencia de calor, pueden ser mejor obtenidas por medio de equipo de tubos y coraza (Kern, 2012).

El equipo de tubo y coraza involucra la expansión de un tubo en un espejo y la formación de un sello que no fuga bajo condiciones razonables de operación. Un ejemplo simple y común de tubo expandido se muestra en la Figura 13. En el espejo se perfora un orificio cuyo diámetro es apenas mayor que el diámetro exterior del tubo, además se cortan dos o más hendeduras en

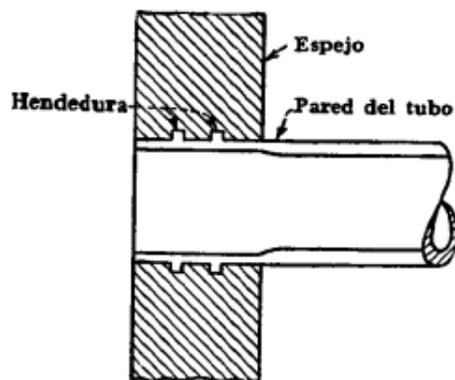


Figura 13 Tubo rolado Fuente: (Kern, 2012)

la pared de este orificio. Se coloca el tubo dentro del orificio, y se inserta un rolator en el final del tubo. El rolator es un mandril rotatorio que tiene conicidad pequeña. Es capaz de exceder el límite elástico del metal del tubo y transformarlo a una condición semiplástica, de manera que se escurra hasta las hendeduras y forme así un sello perfecto. El rolado de los tubos es un arte, ya que el tubo puede dañarse si

se rola hasta adelgazarlo demasiado de manera que el sello tiene poca resistencia estructural (Kern, 2012).

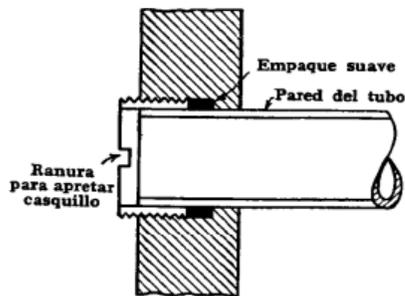


Figura 14 Casquillo Fuente: (Kern, 2012)

En algunos usos industriales es deseable instalar tubos en el espejo, de manera que puedan ser fácilmente removidos como se muestra en la Figura 14, en la práctica, los tubos se empaquen en el espejo mediante casquillos, y usando anillos de metal suave como empaques (Kern, 2012).

6.4.2 Tubos para intercambiadores de calor

Los tubos para intercambiadores de calor también se conocen como tubos para condensador y no deberán confundirse con tubos de acero u otro tipo de tubería obtenida por extrusión a tamaños normales de tubería de hierro. El diámetro exterior de los tubos para condensador o intercambiador de calor, es el diámetro exterior real en pulgadas dentro de tolerancias muy estrictas. Estos tubos para intercambiador se encuentran disponibles en varios metales, los que incluyen acero, cobre, admiralty, metal Muntz, latón, 70-30 cobre-níquel, aluminio-bronce, aluminio y aceros inoxidables. Se pueden obtener en diferentes grosores de pared, definidos por el calibrador Birmingham para alambre, que en la práctica se refiere como el calibrador BWG del tubo (ver Figura 15) (Kern, 2012).

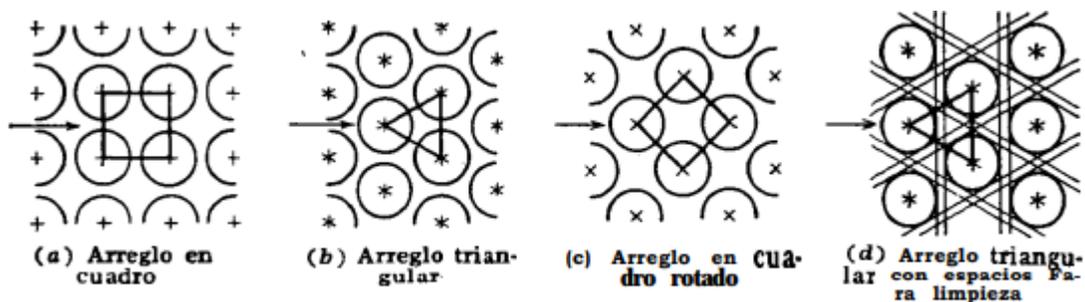


Figura 15 Arreglos comunes para los tubos de intercambiadores Fuente: (Kern, 2012)

6.4.3 Espaciado de los tubos

Los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno de otro, ya que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes, debilita estructuralmente el cabezal de tubos o espejo. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes es el claro o ligadura, y éstos a la fecha, son casi estándar. Los tubos se colocan en arreglos ya sea triangulares o cuadrados, como se muestra en las Figura 15a y b. La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tienen pequeña caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada en la Figura 15a. El espaciado de los tubos PT es la distancia menor de centro a centro en tubos adyacentes. Los espaciados más comunes para arreglos cuadrados son de 3/4 plg DE en un espaciado cuadrado de 1 plg y de 1 plg DE en un espaciado en cuadro de 1 1/2 plg. Para arreglos triangulares éstos son, de 3/4 plg DE en espaciado triangular de 15/16 plg, 3/4 plg DE en un arreglo triangular de 1 plg, y 1 plg DE en un arreglo triangular 1 1/2 plg. En la Figura 15c el arreglo en cuadro ha sido rotado 45°, y permanece esencialmente lo mismo que en la Figura 15a. En la Figura 15d se muestra una modificación del espaciado triangular que permite una limpieza mecánica. Si los tubos se separan suficientemente, es posible dejar los pasajes indicados para limpieza (Kern, 2012).

6.4.4 Coraza

Es un recipiente cilindro el cual se encuentra bajo presión interna y externa, las diferentes configuraciones se muestran en la Figura 16. La coraza es la estructura que permite el paso de fluidos y la transferencia de calor entre los tubos y la coraza.

Las corazas hasta de 12 plg de diámetro IPS se fabrican de tubo de acero. Sobre 12 e incluyendo 24 plg el diámetro exterior real y el diámetro nominal del tubo son los mismos. El grueso estándar para corazas con diámetros interiores de 12 a 24 plg inclusive, es de 3/8 plg, lo que es satisfactorio para presiones de operación por el lado de la coraza hasta de 300 lb/plg². Se pueden obtener mayores gruesos para

presiones superiores. Las corazas mayores de 24 plg de diámetro se fabrican rolando placa de acero (Kern, 2012).

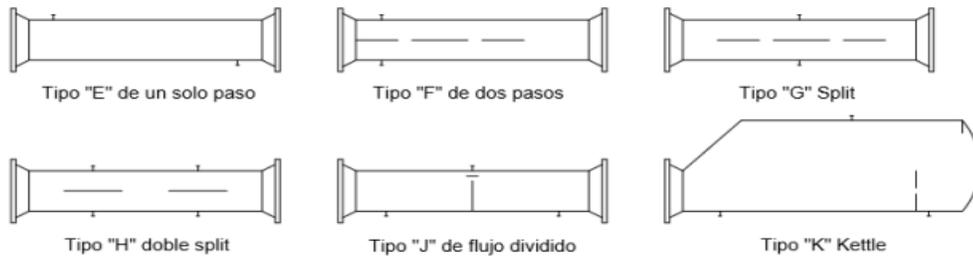


Figura 16 Tipos de coraza Fuente: (Sadik Kakac, 2012)

6.4.5 Deflectores

Es claro que se logran coeficientes de transferencia de calor más altos cuando el líquido se mantiene en estado de turbulencia. Para inducir turbulencia fuera de los tubos, es costumbre emplear deflectores que hacen que el líquido fluya a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos. Esto causa considerable turbulencia aun cuando por la coraza fluya una cantidad pequeña de líquido. La distancia centro a centro entre los deflectores se llama espaciado de deflectores.

Puesto que los deflectores pueden espaciarse ya sea muy junto o muy separado, la masa velocidad no depende enteramente del diámetro de la coraza. Usualmente el espaciado de los deflectores no es mayor que una distancia igual al diámetro interior de la coraza, o

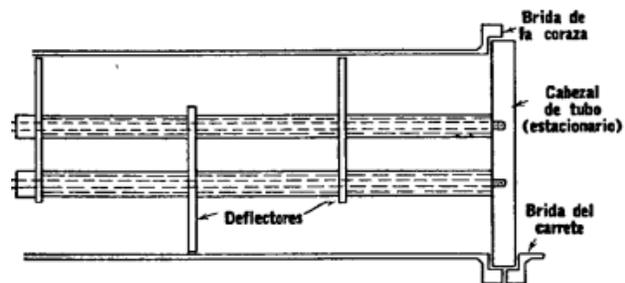


Figura 17 Espaciador de deflectores Fuente: (Kern, 2012)

menor que una distancia igual a un quinto del diámetro interior de la coraza. Los deflectores se mantienen firmemente mediante espaciadores como se muestra en la Figura 17. que consisten de un pasador atornillado en el cabezal de tubos o espejo y un cierto número de trozos de tubo que forman hombreras entre deflectores adyacentes (Kern, 2012).

Hay varios tipos de deflectores que se emplean en los intercambiadores de calor, pero los más comunes son los deflectores segmentados; también se encuentran los deflectores de disco y corona y los deflectores de orificio (ver Figura 18, 19, 20). Aun cuando algunas veces se emplean otros tipos, no son de importancia general.

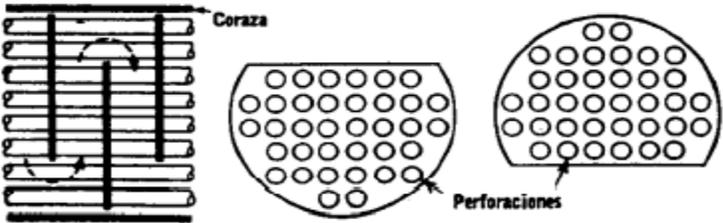


Figura 18 Deflector de segmento Fuente: (Kern, 2012)

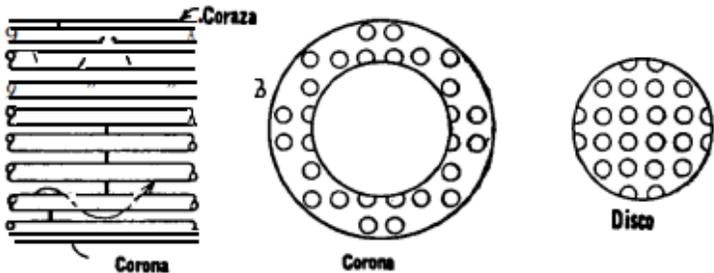


Figura 19 Deflector de corona y disco Fuente: (Kern, 2012)

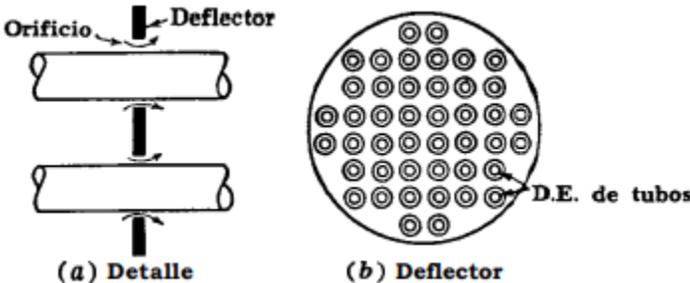


Figura 20 Deflector de orificio Fuente: (Kern, 2012)

6.4.6 Clasificación de los intercambiadores de tubos y coraza

Los intercambiadores comúnmente usados por sistemas de mantenimiento, economía, montaje y construcción son los que a continuación se describen:

6.4.6.1 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 plana, con el fin de que no puedan moverse relativamente en la coraza eliminando los problemas de movimiento entre la coraza y los tubos, este tipo de intercambiador proporciona que el haz de tubos pueda ser retirado, para realizar la limpieza exterior de los tubos con medios mecánicos, pero es necesario realizar la limpieza química en el interior de los tubos. En los intercambiadores de tubos en U el limitante es trabajar con fluidos no ensuciantes en el lado del tubo (ver Figura 21) (Kern, 2012).

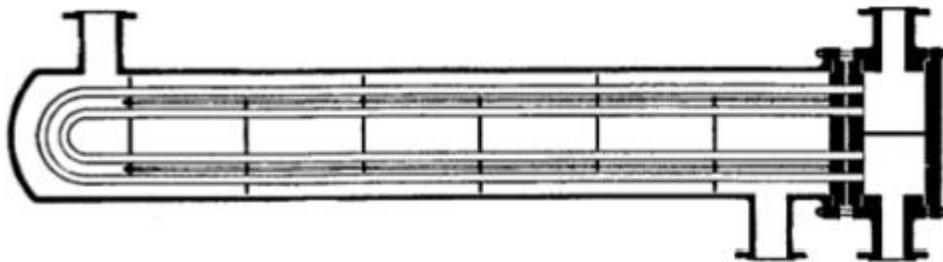


Figura 21 Intercambiador de calor tipo U Fuente: (Kern, 2012)

6.4.6.2 Intercambiador de calor de cabezal fijo:

Los intercambiadores de cabezal fijo son el diseño más simple (ver Figura 22), se construye sin juntas empaquetadas en el lado de la coraza. Pueden tener dos espejos soldados en la coraza, formando una caja para proporcionar un sellado para prevenir las fugas del fluido por el lado coraza, y los cabezales son bridados a la coraza. También se pueden soldar la coraza y los cabezales a los espejos formando una unidad compacta, pero imposibilitando una limpieza de las partes. En este tipo de intercambiador, la coraza puede ser llenada completamente de tubos para lograr la máxima transferencia de calor, pero esto incrementa la caída de presión en el lado de la coraza, y limita el intercambiador de calor a servicios relativamente

limpios. Después de remover las cubiertas de los cabezales en cada extremo del intercambiador de calor se obtiene el acceso a los tubos, por lo tanto, los interiores de los tubos pueden ser limpiados por medios mecánicos. Como el haz de tubos no puede ser removido, la limpieza del exterior de los tubos se hace por medio de químicos, esto limita al intercambiador de espejos fijos a trabajar con fluidos ensuciantes por el lado de la coraza, aunque algunos fluidos ensuciantes pueden ser guiados a través de los tubos (Kern, 2012).



Figura 22 Intercambiador de cabezal fijo Fuente: (Kern, 2012)

6.4.6.3 Intercambiador de cabezal flotante:

Este tipo de intercambiador se caracteriza por tener un espejo fijo (ver Figura 23), mientras que la otra flota permitiendo el movimiento libre entre la coraza y los tubos, esta configuración es la más indicada en servicios en los que la limpieza de tubos o su remplazo es frecuente. Se pueden encontrar dos tipos de intercambiador de



Figura 23 Intercambiador de cabezal flotante Fuente: (Kern, 2012)

cabezal flotante, uno emplea un cabezal flotante con o sin anillo seccionado y el otro usa una empaquetadura para permitir la expansión térmica, aunque este no se usa en servicios con fluidos peligrosos o cuando las fugas pueden ser tóxicas. 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 (Kern, 2012).

6.4.7 Usos de los intercambiadores de tubos y coraza

Los usos que se le pueden dar a los intercambiadores existentes son variados, pero en general, los intercambiadores son usados para recuperar calor entre dos flujos en un proceso. Los intercambiadores de calor de coraza y tubos se emplean comúnmente para (Yunus A Cengel, 2012):

- Vapor/Agua, para condensar vapor y/o calentar agua.
- Aceite/Agua, para enfriar aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos.
- Vapor/Combustóleo, para calentar combustóleo en tanques de almacenamiento, fosas de recepción y estaciones de bombeo.
- Aire/Agua, para enfriar aire como Post-enfriadores de compresos de aire.
- Refrigerante/Agua, para condensar refrigerantes.
- Intercambiadores de calor para procesos químicos y/o petroquímicos; fabricados en acero al carbón, acero inoxidable y/o aceros especiales.
- Chillers (Intercambiadores de calor para enfriar agua con gas refrigerante para unidades de agua helada) (Yunus A Cengel, 2012).

6.5 Corrosión

6.5.1 Tipos de corrosión

La corrosión puede definirse como una reacción irreversible de un material con su medio ambiente, que normalmente (aunque no siempre) trae asociado una degradación del material o de sus propiedades. Esta definición tan general de corrosión incluye las reacciones de una gama de materiales muy amplia. Sin embargo, el foco de la mayor parte de los estudios sobre corrosión son los metales. La corrosión en los metales puede darse de muchas formas diferentes que son importantes de entender, ya que los mejores métodos de prevención de la corrosión dependen de la forma de corrosión (Bianca Lucas Granados, 2018).

Según el *mecanismo de corrosión*, ésta puede ser corrosión química seca o corrosión electroquímica húmeda.

- **La corrosión química:** consiste en la oxidación de metales a alta temperatura en atmósferas gaseosas, formándose una película sólida de productos de reacción sobre la superficie metálica se trata de un tipo de corrosión que se produce en ausencia de electrolito, con la que la circulación de electrones e iones se produce a través de la capa de productos de reacción, y tiene relevancia cuando el material metálico trabaja a temperaturas elevadas.
- **La corrosión electroquímica:** se debe a la actuación de pilas electroquímicas, en las que el metal sufre disolución en las regiones anódicas, que es donde se produce su oxidación (Bianca Lucas Granados, 2018).

Según la *morfología del ataque* la corrosión puede ser:

- **Corrosión uniforme, homogénea o generalizada:** se ataca toda la superficie por igual y se pierde superficie por igual.
- **Corrosión por picadura (*pitting*):** es una forma localizada de ataque corrosivo. Se caracteriza por la formación de agujeros o picaduras en la superficie del metal. Es muy peligrosa ya que suele ser muy difícil de detectar.
- **Corrosión galvánica:** se da cuando dos o más metales diferentes se ponen en contacto eléctrico en el mismo electrolito. El metal con un potencial de corrosión más positivo se polariza catódicamente, reduciendo o incluso suprimiendo su velocidad de corrosión, mientras que el miembro más negativo se polariza anódicamente incrementando su velocidad de corrosión.
- **Corrosión por aireación diferencial:** tiene lugar cuando una pieza metálica se encuentra sometida a una diferencia de concentración de oxígeno (grados de oxigenación o aireación diferentes), debido, por ejemplo, al hecho de estar semienterrada.
- **Corrosión de resquicio (*crevice*):** se produce en junta de metales (por ejemplo, una pieza metálica y un tornillo) debido a la existencia de una aireación diferencial.

- **Corrosión intergranular:** el ataque está relacionado con la segregación de un elemento específico o la formación de un compuesto en el borde de grano de una aleación.
- **Corrosión selectiva o desaleante:** es la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida.
- **Corrosión-erosión:** es consecuencia de la acción conjunta de la corrosión y la erosión a la que el material metálico puede estar sometido si, por ejemplo, la velocidad de flujo del electrolito es demasiado rápida, o si el medio corrosivo contiene partículas sólidas capaces de erosionar la superficie del metal.
- **Tribocorrosión:** es consecuencia de la acción conjunta de la corrosión y fenómenos de desgaste. Es la forma de corrosión en los implantes metálicos en el cuerpo humano.
- **Corrosión bajo tensión (stress corrosion cracking):** se debe a la corrosión conjunta de la corrosión y tracciones mecánicas. Una estructura sometida a tensiones y expuesta a un medio corrosivo, puede iniciar grietas que crezcan a tensiones inferiores al límite elástico del material (Bianca Lucas Granados, 2018).

6.5.2 Factores que influyen en la corrosión

6.5.2.1 Potencial eléctrico de los metales

Cuando dos metales están en contacto a través de un líquido se produce una corrosión galvánica o electrolítica. El grado de corrosión depende fundamentalmente de la diferencia de potencial eléctrico existente entre los dos metales en contacto (Moreno, 2016).

Cuanto más bajo (negativo) sea el potencial de un metal, más fácilmente resultará corroído; del mismo modo cuando mayor sea la diferencia de potencial entre los dos metales en contacto, tanto mayor será la corrosión galvánica producida entre ambos, siempre en perjuicio del de menor potencial (Moreno, 2016).

6.5.2.2 Formación de películas

Los productos insolubles de la corrosión pueden ser completamente impermeables al líquido corrosivo, por eso son totalmente protectores, o impermeables y permitir la corrosión local y general sin obstáculos. Las películas pueden tener tendencia a absorber la humedad o retenerla, incrementando la corrosión resultante de la exposición a la atmosférica o los vapores corrosivos (Moreno, 2016).

6.5.2.3 Temperatura

La corrosión tiende a aumentar al elevar la temperatura ya que esta posee efectos secundarios mediante su influencia en la solubilidad del aire, que es la sustancia más común que influye en la corrosión (Moreno, 2016).

6.5.2.4 Velocidad

Un aumento en la velocidad del movimiento relativo entre una solución corrosiva y una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión, influyendo las sustancias oxidantes (oxígeno), lleguen a la superficie que se corroe y a la mayor rapidez con que los productos de la corrosión misma, se retiran (Moreno, 2016).

6.5.2.5 Agentes oxidantes

Los agentes oxidantes que aceleran la corrosión de algunos materiales pueden retrasar la corrosión de otras, mediante la formación en sus superficies de óxidos o capas de oxígeno absorbidos que los hacen más resistentes a los ataques químicos (Moreno, 2016).

6.5.2.6 Acidez de la solución

La velocidad de corrosión de la gran parte de los metales es afectada por el pH. Los metales solubles en ácido, como el hierro, el nivel de pH medio (aprox. 4 a 10) la velocidad de corrosión está controlada por la velocidad de transporte del oxidante (generalmente oxígeno disuelto) a la superficie metálica temperaturas muy altas la velocidad de corrosión aumenta con el incremento de la basicidad.

Los metales anfotéricos como el aluminio y el cinc se disuelven rápidamente en soluciones ácidas o básicas. La tendencia que tienen los metales a corroerse mediante el desplazamiento de iones de hidrógeno de solución de indica de modo general por su posición en la serie electromotriz. Los metales por encima del hidrógeno, desplazan al hidrógeno con mayor facilidad que los que se encuentran debajo del hidrógeno; una disminución en la concentración del ion hidrógeno tiende a hacer ascender el hidrógeno en reacciones con los metales, mientras que si se aumenta el ion metálico tiende a desplazar a los metales hacia abajo en relación al hidrógeno (Moreno, 2016).

6.5.3 Sistema corrosivo

Un sistema corrosivo es aquel en donde las sustancias que se manejan tienen un grado de corrosividad muy alto, es decir, todas sus propiedades químicas nos indican que pueden obstruir el medio por el cual fluye o se transporta, en este tipo de sistemas es muy importante tener en cuenta el diseño de las tuberías; ya que los materiales que se emplean para su fabricación deben ser altamente resistentes a la corrosión de los fluidos para que en un futuro no se tenga algún problema con ello.

Los materiales que se emplean para la fabricación de los conductos donde se transportaran los fluidos por lo regular suelen ser un poco más costosos que los que se emplean para los fluidos no corrosivos. Las industrias químicas tienen que ser cuidadosas a la hora de diseñar sus equipos donde se transportarán sus fluidos, en este caso los intercambiadores de calor que son clave importante en los sistemas químicos al igual que los reactores químicos deben ser diseñados perfectamente bien ya que si no la corrosión los afectará y se tendrá que recurrir a un nuevo equipo.

6.5.4 Sistema no corrosivo

Un sistema no corrosivo, se refiere a un sistema en donde los fluidos principalmente no son altamente corrosivos o no provocan una corrosión totalmente degradante en el medio por el cual fluye, o se lleva a cabo su almacenamiento. Por lo general las sustancias que son menos corrosivas son las orgánicas, principalmente los alcoholes que son sustancias orgánicas ligeras, aunque también es relativamente

común saber que la sustancia más común utilizada por no ser tan corrosiva es el agua, empleada incluso para el diseño de algunos equipos; ya que por ser la sustancia menos peligrosa se puede manipular sin correr riesgo de tener algún problema mayor.

El costo de los materiales que se usan para el diseño de las tuberías o equipos de proceso donde fluirán o se transformarán los fluidos no corrosivos no son altos en comparación a los que se usan para los equipos que se usan en sistemas corrosivos; en este caso el acero al carbón es uno de los más empleados para este tipo de equipos, es importante mencionar que los sistemas no corrosivos no corren un alto riesgo de sufrir problemas de corrosión a corto plazo, sin embargo que las sustancias no sean corrosivas no significa que a largo plazo se tengan pequeños detalles de corrosión por algunas propiedades químicas que contengan los fluidos.

6.5.5 Principales sustancias no corrosivas

- Agua
- Leche
- Vinagre
- Jugo de naranja
- Cerveza
- Jabón líquido
- Alcoholes orgánicos (metanol, etanol, propanol)
- Alcohol isopropílico
- Alcohol isobutílico
- Éter etílico
- Glicerina
- Etilenglicol

6.5.6 Materiales de diseño para fluidos no corrosivos

Los materiales más comunes empleados en los intercambiadores de calor que son usados para sistemas no corrosivos son el acero al carbono y el acero inoxidable.

6.5.6.1 Acero al carbón:



Figura 24 Tubos de acero inoxidable Fuente: Internet

Es un tipo de acero que contiene carbono, el cual es el principal componente de este tipo de acero, también posee hierro y manganeso. Es conocido este ejemplar de acero como forjado, y es flexible lo cual permite que pueda obtener cualquier forma. El 90% de los aceros son de carbono.

El acero al carbono (Figura 24) es un tipo de acero que contiene acero como su nombre lo indica, cuando el hierro está aleado con el carbono se le llama acero al carbono, aunque el principal componente es el carbono también se encuentra aleado con otros elementos como el hierro y el manganeso, la proporción de carbono y tratamiento térmico del acero son los que determinan sus propiedades, también es conocido como acero maleable, esto quiere decir que es flexible y puede tomar cualquier forma. Está considerado como de alta resistencia y baja aleación.

6.5.6.2 Acero Inoxidable:

Los aceros inoxidables (Figura 25) son aleaciones base hierro que contienen, como mínimo, un 12 % de cromo, bajo contenido en carbono y porcentajes variables de níquel, molibdeno, titanio, vanadio, etc. (Solá, 1990).

El acero inoxidable se encuentra en todas partes, su resistencia a la corrosión es lo que da su nombre. Sus aplicaciones son casi ilimitadas en el hogar, en la industria, en la ciudad para diferentes usos diferentes. Es un material sólido y no un revestimiento especial aplicado al acero



Figura 25 Tubos de acero inoxidable Fuente: Internet

común puede variar su apariencia y esto dependerá de la manera en que este fabricado y en su acabado superficial (Solá, 1990).

El acero inoxidable se utiliza principalmente en cuatro tipos de mercado: electrodomésticos, automoción, construcción, e industria en general.

6.6 Normativa de diseño

El código más empleado en el diseño de Intercambiadores de calor, es el ASME (American Society of Mechanical Engineers) este 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. La aplicación de este código, requiere un amplio criterio del diseñador para la implementación correcta del mismo en el diseño. También existen las normas TEMA (Tubular Exchangers Manufactures Association) cuyo objetivo es regular los criterios de diseño y fabricación de intercambiadores de coraza y tubos. Todos los elementos que constituyen la construcción de intercambiadores de calor, están normalizados por la TEMA, la cual especifica las características mecánicas y térmicas para el diseño del equipo correspondiente a las diversas condiciones de funcionamiento.

6.6.1 Código ASME

Presenta todo lo referente al diseño y operación de calderas y recipientes a presión, se compone de XI secciones, de las cuales la VIII está dedicada exclusivamente a los recipientes a presión. A continuación, se hace una descripción de la sección VIII, división I: Consta de tres subsecciones:

- a) Requisitos generales
- b) Requisitos concernientes a los métodos de diseño y fabricación de los recipientes sujetos a presión
- c) Requisitos concernientes a las clases de materiales

6.6.1.1 Subsección A:

Esta subsección también se conoce como la parte UG y trata de los requisitos mínimos concernientes a materiales, diseño, aberturas y refuerzos, superficies reforzadas y apoyadas, ligamentos, fabricación, inspección y prueba, estampado de reportes y dispositivos de alivio de presión.

- Materiales - UG-4 a UG-15; hace referencia a los requisitos que deben cumplir los diferentes tipos de materiales empleados en los recipientes sujetos a presión.
- Diseño. - UG-16 a UG-35; Establece que el espesor mínimo para las corazas y las tapas debe ser de 1/16" sin considerar lo correspondiente a la corrosión; también aclara que las condiciones de diseño deben ser la más críticas que se esperen en operación normal. Proporciona las ecuaciones para el diseño de coraza y tubos bajo condiciones de presión interna y externa. También proporciona las ecuaciones para el diseño de tapas
- Aberturas y refuerzos, - UG-36 a UG-46; trata o referente a los refuerzos que deben colocarse a las aberturas que se necesiten para las boquillas en las coraza y cabezas.
- Superficies reforzadas y apoyadas. - UG-47 a UG-50; se proporciona las ecuaciones de cálculo para este tipo de superficies; los tipos y las dimensiones de los pernos y la localización de los mismos.
- Ligamentos - UG-53 a UG-55; se presentan las eficiencias de los ligamentos de los diferentes tipos de placas perforadas.
- Fabricación. - UG-75 a UG-85, trata lo referente a la fabricación, como es la identificación de materiales, reparación de defectos de materiales, formado de coraza y tapas, la redondez permitida para las corazas, pruebas Charpy y tratamiento térmico.
- Inspección y prueba. - UG-90 a UG-103; se define lo que es un inspector y las inspecciones que debe realizar durante la construcción; trata también sobre los diferentes tipos de pruebas.

- Estampado y reportes - UG-115 a UG-120; se señala los requisitos a cumplir por el fabricante para que el elemento fabricado reciba el estampado correspondiente; también indica los datos que debe contener la placa y por último se indica el tipo de reporte que debe ser llenado por el fabricante y que debe ser firmado por el inspector.
- Dispositivos de alivio de presión. - UG-125 a UG-136; se indica las características que deben cumplir estos dispositivos (ASME, 2010).

6.6.1.2 Subsección B.

Está subsección trata sobre los requisitos mínimos para los diferentes métodos de fabricación.

- Parte UW. - En esta parte se tratan los requisitos para la fabricación por soldadura de los recipientes sujetos a presión.
En las generalidades especifican los diferentes tipos de usarse juntas soldadas. Con respecto a los materiales, se establecen las diferentes clases y cualidades que deben para la construcción de los recipientes sujetos a presión.
En la parte de diseño se trata el diseño de juntas soldadas, tratamiento térmico al que deben someterse los exámenes por radiografía y por ultrasonido que deben realizarse, las eficiencias de las juntas, los detalles de los diferentes tipos de juntas, aberturas cercanas a soldaduras, y conexiones soldadas. En la fabricación se tratan los procesos de soldadura y su calificación, las pruebas a los soldadores, las temperaturas permisibles de soldadura, los tipos de cortes, la limpieza de la superficie a soldar, tolerancias y reparación de defectos de soldadura. En la inspección y prueba, se trata la supervisión del procedimiento de soldadura, la calificación de soldadores, supervisión del tratamiento térmico, pruebas no destructivas, exámenes radiográficos, exámenes ultrasónicos y el estampado y reportes.
- Parte UF. - Trata lo referente a la fabricación por forja de recipientes sujetos a presión.

- Parte UB - Presenta los requisitos de fabricación por soldadura no ferrosa para los recipientes sujetos a presión (ASME, 2010).

6.6.1.3 Subsección C

En esta subsección, el código trata lo referente a los materiales de construcción de los recipientes sujetos a presión.

- Parte UCS - Señala los requisitos a cumplir con los recipientes sujetos a presión construidos en aceros al carbón y aceros de baja aleación. Esta parte se completa con sus respectivas tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño.
- Parte UNF. - Se refiere a los requisitos para recipientes a presión construidos de materiales no ferrosos. Su complemento se encuentra en las tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño.
- Parte UMA. - Trata los requisitos a cubrir por los recipientes sujetos a presión construidos de aceros de alta aleación. Se complementa con sus tablas de valores de admisibles para el diseño.
- Parte UCI - Trata los requisitos a cubrir por los recipientes construidos de hierro fundido.
- Parte UTH. - Se refiere a requisitos para recipientes sujetos a presión construidos de acero ferrítico con propiedades de alta resistencia a la tensión; se complementa con las tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño (ASME, 2010).

6.6.2 Normativa TEMA

El tema trata lo relacionado a los Intercambiadores de calor de coraza y tubos. Su contenido es el siguiente:

- N: Nomenclatura
- F: Tolerancias de fabricación
- G: Fabricación en general e información de funcionamiento
- E: Instalación operación y mantenimiento

- RCB: Normas mecánicas del TEMA para Intercambiadores de calor RCB
- V: Vibración inducida por flujo
- T: Relaciones térmicas
- P: Propiedades físicas de fluidos
- D: Información general
- RGP: Recomendaciones Prácticas

6.6.2.1 Nomenclatura:

Presenta de manera normalizada, una nomenclatura para los diferentes tipos de intercambiadores de calor.

6.6.2.2 Tolerancias de fabricación

Establece las tolerancias admisibles en la construcción.

6.6.2.3 Fabricación en general e información

Inicia con una hoja de datos necesarios que deben suministrarse para lograr el diseño adecuado. Posteriormente cubre lo relacionado a inspección, a datos de placa, a dibujos, reportes y a las características generales de construcción.

6.6.2.4 Instalación operación y mantenimiento

Se señala que la correcta instalación y el mantenimiento preventivo son responsabilidades del usuario. Con respecto a la instalación se trata sobre las características del sitio de instalación, así como la limpieza que debe efectuarse antes de la instalación. Con respecto a la operación, se debe tener la información suficiente para ese propósito.

6.6.2.5 Normas mecánicas del TEMA para Intercambiadores de calor RCB

Define tres clases de intercambiadores, R, C y B, especificando que deben cumplir con la sección VIII, división I del ASME. Señala la presión de diseño, las pruebas, las temperaturas del metal, las normas admisibles de corrosión. Con respecto a los

tubos, especifica sus longitudes, sus diámetros y sus calibres, los espaciamentos y los tipos de sus arreglos.

- Para las corazas y las tapas se tratan los diámetros, las tolerancias, así como los espesores mínimos.
- Muestra los diferentes tipos de deflectores, sus espesores, sus espaciamentos, protecciones contra la erosión en las áreas de entrada y salida; y las características de los separadores.
- Describe las características constructivas de las cabezas flotantes y de los empaques.
- Pone especial énfasis en el diseño de los espejos de tubos, proporcionando las ecuaciones de cálculo de los espesores. Proporciona los métodos de cálculo de elementos flexibles de la coraza. También trata lo relacionado a las boquillas y a las bridas.

6.6.2.6 Vibración inducida por flujo

Aquí se indica que el problema de la inducción de vibraciones por el flujo es muy complejo y que todavía no se tiene una solución del tipo analítico. Se describen los diferentes daños por vibración y las regiones de falla. Se tratan las características de la frecuencia natural, los esfuerzos axiales en los tubos, el amortiguamiento y proporciona el método de cálculo de la velocidad crítica de flujo.

6.6.2.7 Relaciones térmicas

Se hace un estudio del problema térmico, mediante la relación básica de transmisión de calor y de la determinación del coeficiente global de transmisión de calor. Se trata el problema de ensuciamiento y de la diferencia media de temperaturas. También se presentan las relaciones que permiten el cálculo de las temperaturas medias de la coraza y los tubos.

6.6.2.8 Propiedades físicas de fluidos

Se proporciona un amplio conjunto de datos en forma gráfica y tabular de fluidos muy importantes, principalmente hidrocarburos.

6.6.2.9 Información general

Se encuentra información general sobre dimensiones de tubos de conexiones y de bridas. También se proporcionan tablas de conductividades térmicas de metales y de coeficiente medios de expresión.

6.6.2.10 Designación de Intercambiadores de coraza y tubos

clasifica los intercambiadores de coraza y tubos en tres clases de acuerdo al proceso y las condiciones de operación los cuales se mencionan a continuación:

- Clase R: Incluye los intercambiadores de calor que utilizan en la industria del petróleo y los procesos similares.
- Clase C: Abarca a los intercambiadores de calor en procesos moderados tales como comerciales y generales.
- Clase B: Incluye los intercambiadores de calor que se utilizan en procesos químicos.

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 (Tabla 2).

- 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 (TEMA, 2007).

6.7 Método de diseño de Kern

6.7.1 Consideraciones generales de diseño

Este método ha sido adoptado como un estándar por la industria durante muchos años. Las correlaciones para el cálculo de la transferencia de calor y la pérdida de carga se obtuvieron de intercambiadores estándar con un corte de deflector del 25 % (una decisión acertada porque en la mayoría de los casos es el mejor diseño).

La predicción de la transferencia de calor varía entre ligeramente insegura (valor superior al real) y muy segura (valor inferior al real). Mientras que las predicciones de la pérdida de carga se sitúan en el lado de seguridad con errores superiores al 100 %. En régimen laminar los errores todavía son grandes debido a la poca información disponible en el momento que se elaboró el método (Kern, 2012).

Si bien los resultados obtenidos por el método Kern no presentaron una gran mejora respecto a las correlaciones existentes, el mérito del éxito obtenido se encuentra en el hecho de haber presentado un método global de diseño, presentando además varios ejemplos de cálculo. Es evidente que no puede ser utilizado como un método de diseño porque la sobrestimación de la pérdida de carga puede llevar a diseños conservadores, con una gran separación de deflectores o con diámetros de carcasa superiores, y por consiguiente con coeficientes de transferencia de calor bajos. Sin embargo, todavía se sigue utilizando en la industria para comprobar el funcionamiento térmico de los intercambiadores (Kern, 2012).

6.8 Glicerina al 100%



FICHA TÉCNICA Glicerina USP

DESCRIPCIÓN

Líquido cristalino con aspecto a jarabe y sabor dulce.

FÓRMULA:

$C_3H_8(OH)_3$

PESO MOLECULAR:

92.09 g/mol

NÚMERO CAS:

56-81-5

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN
Color	Transparente
Apariencia	Líquido espeso, claro
Olor	Suave, característico
pH	5.0 – 6.5
Densidad gr/cm ³ a 25°C	1.25802
Viscosidad a 20°C	1410 cP
Punto de ebullición	290 °C
Punto de congelamiento	17 °C
Pureza	99.5 - 101.0%
Residuo por ignición	0.015 máx
Humedad karl fisher	5% máx
Cloruros	0.001% máx
Sulfatos	0.002% máx
Esteres y ácidos grasos	1.0 máx
Compuestos clorados	0.003% máx
Gravedad específica	>1.249
Solubilidad	Agua y alcohol. No soluble en éter.

Figura 26 Ficha técnica de la Glicerina Fuente: (Glinsa, s.f.)

La glicerina es un líquido viscoso claro obtenido por hidrólisis de grasas y aceites mixtos que encontramos en alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos.

Es una sustancia de sabor dulce neutral, que tiene un punto de ebullición alto y que al congelarse forma una pasta gomosa y espesa. Son sus propiedades químicas las que producen sus beneficios para nuestra salud.

La glicerina (glicerol) se encuentra en todos los tipos de aceites, así como en grasas animales o vegetales, siempre y cuando éstas estén asociadas a otros ácidos grasos, como puede ser, el oleico o esteárico.

Aunque la calidad de la glicerina no depende de que su origen haya sido vegetal, animal o sintético, en la elaboración de cosméticos y la producción de jabones de calidad, se valora más la glicerina de origen vegetal (Navarro, 2019).

Dentro de los principales usos se encuentran:

- La elaboración de cosméticos como, por ejemplo, jabones de tocador. La glicerina aumenta su detergencia, da blancura a la piel y la suaviza. Se puede encontrar entre un 8-15% de glicerina en la composición de estos jabones.
- En el área de la medicina se utiliza en la elaboración de medicamentos en forma de jarabes (como excipiente; como antiséptico para prevenir infecciones en heridas; como inhibidor de cambios enzimáticos durante la fermentación de ungüentos, pastas o cremas; como disolvente de yodo, bromo, fenol, timol, taninos, alcaloides y cloruro de mercurio). También es utilizado para lubricantes y humectantes oftalmológicos.
- Además, se utiliza formando parte de los supositorios de glicerina, que tienen acción laxante. El mecanismo de acción de estos supositorios se basa en dos propiedades de la glicerina: es higroscópico y ligeramente irritante de mucosas.
- Como baño calefactor para temperaturas superiores a los 250 °C.
- Lubricación de maquinarias específicas. Por ejemplo, de producción de alimentos y medicamentos (por no ser tóxica), de petróleo, etc.
- En las industrias militar y minería para la fabricación de explosivos, como la nitroglicerina, así como para enfriar los cañones de las armas de fuego.
- Anticongelante (baja el punto de fusión del agua, por el descenso crioscópico).
- Elaboración de productos de consumo. Principalmente, se utiliza para preparar extractos de té, café, jengibre y otros vegetales; fabricación de refrescos; aditivo (tipo tensioactivo comestible) para mejorar la calidad del producto.
- Elaboración de resinas alquídicas, que se utilizan como aislantes.
- Fluido separador en tubos capilares de instrumentos.

- Industria de lacas y pinturas. Componente clave de los barnices que se utilizan para acabados. En algunos casos, se utiliza glicerina al 98% para preparar barnices electroaislantes.
- Industria tabacalera. Debido a la elevada capacidad higroscópica de la glicerina, es posible regular la humedad con el fin de eliminar el sabor desagradable e irritante del humo de tabaco.



Figura 27 Glicerina Fuente: internet

- Industria del cigarrillo electrónico/vapeo: junto al propilenglicol, la glicerina se utiliza como base para el líquido de vapeo. En algunos casos, la base se compone sólo de glicerina (sin propilenglicol), aunque lo habitual es mezclarla en una proporción de entre el 20 y el 80% de la base. Proporciona un sabor dulce y es el compuesto que crea el vapor en el cigarrillo electrónico.
- Industria textil. Proporciona elasticidad y suavidad a las telas.
- Industria del cuero. Se añade a disoluciones acuosas de cloruro de bario con el fin de preservar las pieles. También se añade a emulsiones de cera para curtirlas (Navarro, 2019).

6.9 Etilenglicol

Aspecto:	Líquido incoloro, claro.
Olor:	Dulzón.
Solubilidad:	Soluble en muchos solventes orgánicos; en agua a 20 °C: 1000 g/L
Densidad (20 °C):	1.11 g/cm ³
pH:	6.5- 7.0
Punto de Ebullición:	194- 200 °C
Punto de Fusión:	-12.4 °C
Presión de Vapor (hPa):	0.08 @ 20 °C (68F)
Punto de Inflamabilidad:	111 °C
Temperatura de autoignición:	410 °C
Temperatura de descomposición:	No determinado.
Límite inferior de explosión (%):	3.2 Vol %
Límite superior de explosión (%):	53 Vol %
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua):	-1.35655
Viscosidad Dinámica a 20 °C:	21 mPas
Propiedades explosivas:	No es explosivo.

Figura 28 Ficha de seguridad del etilenglicol Fuente: internet

El etilenglicol es una sustancia líquida sintética que absorbe agua. No tiene olor, pero tiene un sabor dulce.

Se utiliza como anticongelante en los circuitos de refrigeración de motores de combustión interna, como difusor del calor, mezclado con agua para los procedimientos de deshielo y antihielo de los aviones comerciales, para fabricar compuestos de poliéster, y como disolvente en la industria de la pintura y el plástico. El etilenglicol es también un ingrediente en líquidos para revelar fotografías, fluidos para frenos hidráulicos y en tinturas usadas en almohadillas para estampar, bolígrafos, y talleres de imprenta (ATSRD, s.f.).



Figura 29 Etilenglicol Fuente: Internet

7. Descripción de las actividades realizadas

Cronograma de las actividades desarrolladas durante la residencia profesional

Actividad	Semana															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Recopilación de información técnica para el diseño	x	x	x													
Establecimiento de las bases de diseño para el intercambio de calor		x	x													
Diseño termodinámico del intercambiador de tubos y coraza.			x	x	x	x										
Simulación de la operación del intercambiador de calor diseñado.						x	x	x								
Diseño mecánico del Intercambiador de Calor simulado									x	x	x					
Estimación de costos de inversión y operación del intercambiador de calor.										x	x	x				
Optimización del diseño simulado.												x	x	x		
Integración el expediente técnico con planos de construcción.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

7.1 Diseño termodinámico del intercambiador de calor de tubos y coraza

Determinación de los parámetros iniciales para el diseño del intercambiador de calor

Flujo de másico

- Flujo másico para el etilenglicol

$$\dot{m}_{C_2H_6O_2} = 5000 \frac{kg}{h} =$$

Conversión de los Kg/h a Lb/h

$$\dot{m}_{C_2H_6O_2} = \left(5000 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{1 lb}{0.4536 kg}\right) = 11023.11 \frac{lb}{h}$$

- Flujo másico para la glicerina al 100%

$$\dot{m}_{C_3H_8O_3} = 3000 \frac{kg}{h}$$

Conversión de los Kg/h a Lb/h

$$\dot{m}_{C_3H_8O_3} = \left(3000 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{1 lb}{0.4536 kg}\right) = 6613.76 \frac{lb}{h}$$

Temperaturas de diseño

Temperaturas de entrada

- Temperatura de entrada de la glicerina $C_3H_8O_3$.

$$T_1 = 110 \text{ } ^\circ\text{C} = 230 \text{ } ^\circ\text{F}$$

- Temperatura de entrada del etilenglicol $C_2H_6O_3$.

$$t_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 77 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Temperaturas de salida

Para la determinación de las temperaturas de salida en el intercambiador para ambos fluidos se realizó un método iterativo en el que cuyo objetivo era igualar el calor transferido en cada fluido donde se obtuvieron las siguientes temperaturas:

Para el fluido caliente $C_3H_8O_3$ la temperatura de salida del fluido en el intercambiador de calor fue:

$$T_2 = 153.5 \text{ }^\circ F = 67.5 \text{ }^\circ C$$

Para el fluido frío $C_2H_6O_3$ la temperatura de salida del fluido en el intercambiador de calor fue:

$$t_2 = 129.9 \text{ }^\circ F = 54.38 \text{ }^\circ C \text{ aprox.}$$

DISEÑO TERMODINAMICO PARA EL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Balance de calor para el intercambiador de calor

$$Q_{cedido} = Q_{absorbido} = Q_{Transferido}$$

- Cálculo del calor sensible para la glicerina al 100%

$$Q_{cedido} = \dot{m}_{C_3H_8O_3} * C_p * \Delta T$$

Con un C_p para la glicerina a $T = 230 \text{ }^\circ F$

$$C_p = 0.68 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}$$

$$Q_{cedido} = 6613.76 \frac{lb}{h} * \left(0.68 \frac{BTU}{lb * ^\circ F} \right) * (230 \text{ }^\circ F - 153.5 \text{ }^\circ F)$$

$$Q_{cedido} = 344,047.79 \frac{BTU}{h}$$

- Cálculo del calor absorbido para el etilenglicol

$$Q_{abs} = \dot{m}_{C_2H_6O_3} * C_p * \Delta t$$

$$Q_{cedido} = 11023.11 \frac{lb}{h} * \left(0.59 \frac{BTU}{lb * ^\circ F} \right) * (129.9 \text{ }^\circ F - 77 \text{ }^\circ F)$$

$$Q_{cedido} = 344,047.79 \frac{BTU}{h}$$

- Cálculo de la eficiencia del intercambiador por el método NTU

Este método efectividad de la transferencia de calor está definido por:

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{MAX}} = \frac{C_f(T_{f,sal} - T_{f,ent})}{C_{min} * (T_1 - t_1)} = \frac{C_c(T_{c,ent} - T_{c,sal})}{C_{min} * (T_1 - t_1)}$$

Donde

$$Q_{real} \rightarrow 344,047.79 \frac{BTU}{h}$$

C_{min} → es la razón de capacidad calorífica en menor cantidad

$C_f = \dot{m}_f C_{pf}$ y $C_c = \dot{m}_c C_{pc}$, son las razones de capacidad calorífica de los fluidos frío y caliente, respectivamente.

Determinación de C_{min} para conocer que fluido tiene menor capacidad calorífica

Para la glicerina

$$\dot{m}_{C_3H_8O_3} * C_p = 6613.76 \frac{lb}{h} * \left(0.68 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}\right) = 4497.35 \frac{BTU}{h * ^\circ F}$$

Para el etilenglicol

$$\dot{m}_{C_2H_6O_2} * C_p = 11023.11 \frac{lb}{h} * \left(0.59 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}\right) = 6503.63 \frac{BTU}{h * ^\circ F}$$

Cálculo de la eficiencia:

$$\varepsilon = \frac{344,047.79 \frac{BTU}{h}}{\left(6613.76 \frac{lb}{h} * 0.68 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}\right)_{min} * (230 - 77)} = 0.50 \%$$

Temperatura media logarítmica (MLDT)

- Cálculo de la temperatura media logarítmica para determinar la dirección de las corrientes de los fluidos

Para corriente paralelo, la temperatura media logarítmica (MLDT) se determina de la siguiente manera:

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

Sustituyendo valores

$$\Delta T_{ML} = \frac{(230^{\circ}F - 77^{\circ}F) - (153.5^{\circ}F - 129.9^{\circ}F)}{\ln\left(\frac{230^{\circ}F - 77^{\circ}F}{153.5^{\circ}F - 129.9^{\circ}F}\right)} = 69.226926^{\circ}F$$

Para un flujo en contracorriente, la temperatura media logarítmica (MLDT) se determina de la siguiente manera:

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

Sustituyendo valores

$$\Delta T_{ML} = \frac{(230^{\circ}F - 129.9^{\circ}F) - (153.5^{\circ}F - 77^{\circ}F)}{\ln\left(\frac{230^{\circ}F - 129.9^{\circ}F}{153.5^{\circ}F - 77^{\circ}F}\right)} = 87.7714^{\circ}F$$

- Cálculo del factor de corrección de temperatura

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{230^{\circ}F - 153.5^{\circ}F}{129.9^{\circ}F - 77^{\circ}F} = 1.44$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{129.9^{\circ}F - 77^{\circ}F}{230^{\circ}F - 77^{\circ}F} = 0.34$$

$$F_T = 0.93$$



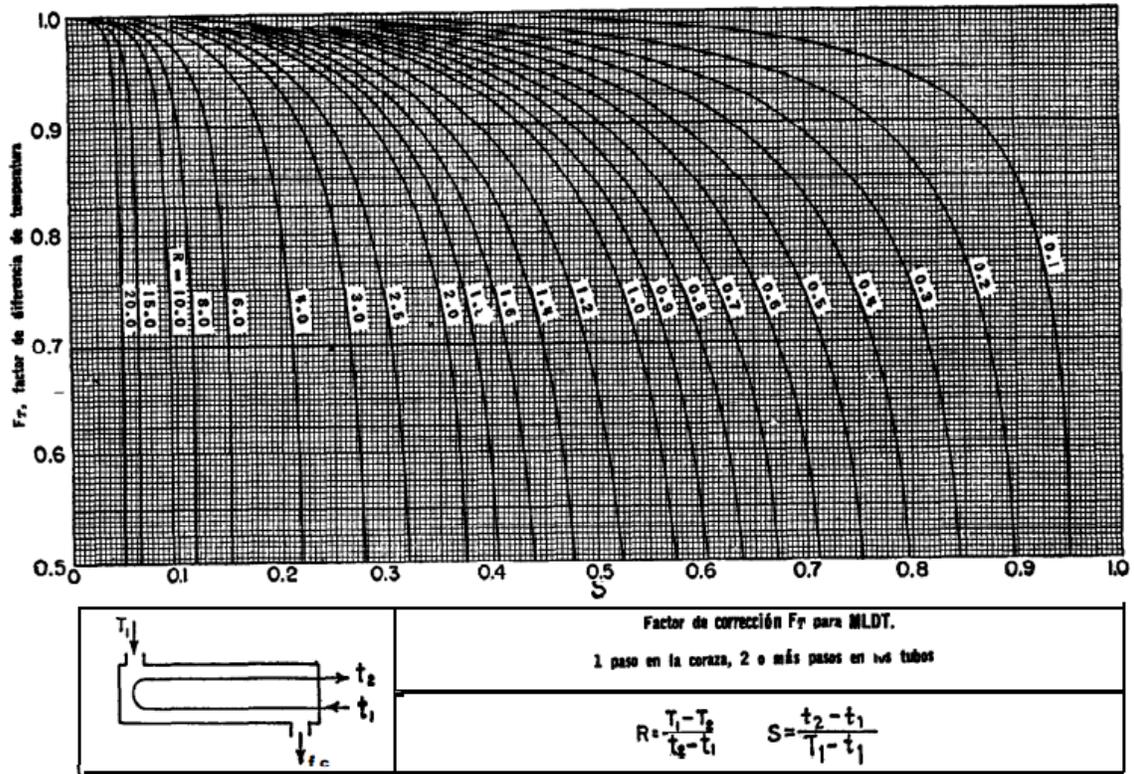


Tabla 1 Factor de corrección Fuente: (Kern, 2012)

- Cálculo de la diferencia de temperatura

$$\Delta T = F_T * \Delta T_{ML}$$

$$\Delta T = 0.94 * 87.7714 \text{ } ^\circ F = 82.5051 \text{ } ^\circ F$$

DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Propiedades de los fluidos seleccionados a la temperatura promedio

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS		
Propiedades	Glicerina al 100% (caliente)	Etilenglicol (frio)
	$\bar{T}_{prom} = 131.75 \text{ } ^\circ F$	$\bar{t}_{prom} = 103.45 \text{ } ^\circ F$
μ (Centipoise)	20	10
$C_p \left(\frac{BTU}{lb * ^\circ F} \right)$	0.56	0.52
$K \left(\frac{BTU}{h * ft * ^\circ F} \right)$	0.214	0.191
$Rd \left(\frac{h * ft^2 * ^\circ F}{BTU} \right)$	0.003	0.0023

Tabla 2. Propiedades de los fluidos a la temperatura promedio.

AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

- Cálculo del área de transferencia de calor

Para el cálculo del área de transferencia de calor, se usó un coeficiente de transferencia de calor con el máximo rango, cuyos datos están registrados en la siguiente tabla.

Intercambiadores		
Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 †
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	250-500 †
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas ligeras	40-75
Sustancias orgánicas medias	Sustancias orgánicas medias	20-60
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas pesadas	10-40
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas ligeras	30-60
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas pesadas	10-40

Tabla 3 Tabla de sustancias UD Fuente: (Kern, 2012)

Para este caso se usó un valor para el coeficiente de transferencia de calor de $40 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$, por que al ser sustancias que poseen una viscosidad mayor que 1, se les consideran como sustancias pesadas y el rango de estos va de 10 a $40 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$, por lo que es recomendable usar un valor muy alto.

De la ecuación del balance de calor

$$Q_{Trans} = U_D * A * \Delta T$$

Se despeja A para obtener el valor del área total de transferencia de calor

$$A = \frac{Q_{Trans}}{U_D * \Delta T} = \frac{344,047.79 \frac{BTU}{h}}{40 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} * 82.5052 ^\circ F} = 32.5 ft^2$$

DISEÑO EN EL LADO DE LOS TUBOS

NUMERO DE TUBOS TOTALES

- Cálculo del número de tubos

$$No \ de \ tubos \ totales = \frac{Area}{longitud \ de \ tubos * superficie \ linial}$$

Donde

$$\text{superficie linial} = 0.2618 \frac{ft^2}{ft \text{ lin}}$$

$$\text{longitud de tubos} = 12 \text{ ft}$$

$$\text{Area de transferencia de calor} = 32.25 \text{ ft}^2$$

$$\text{No de tubos} = \frac{32.25 \text{ ft}^2}{12 \text{ ft} * 0.2618} = 13.18 \approx 13 \text{ tubos}$$

ÁREA DE FLUJO

- Cálculo del área de flujo

$$a_t = \frac{\text{No de tubos} * \text{area de flujo/tubo}}{\text{No. de pasos}}$$

$$\text{area de flujo /tubo} = 0.4702 \text{ plg}^2$$

Por lo tanto, el área de flujo por tubos es igual a:

$$a_t = \frac{13 * 0.4790 \text{ plg}^2}{144 * 2} = 0.05488 \text{ ft}^2$$

MASA VELOCIDAD

- Calculo de la masa velocidad

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

$$G_t = \frac{11,023.11 \frac{lb}{h}}{0.05488 \text{ ft}^2} = 200,858.418 \frac{lb}{\text{ft}^2 * h}$$

NÚMERO DE REYNOLDS

- Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{DI * G_t}{\mu_{\bar{t}}}$$

$$DI \text{ de la tubería de acero al carbón} = 0.782 \text{ plg} = 0.0651 \text{ ft}$$

$$\mu_{\bar{t}} = 10 \text{ centipoise} * 2.242 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}} = 24.190 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}}$$

$$Re = \frac{0.0651 \text{ ft} * 200,858.418 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 * \text{h}}}{12.095 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}}} = 1089.65$$

OBTENCIÓN DE FACTOR TRANSFERENCIA DE CALOR LADO DE TUBOS (j_H).

El factor de transferencia de calor está en función del número de Reynolds, con referencia a esto y con ayuda de la gráfica se obtuvo el valor del factor de transferencia de calor lado de tubos (j_H), cuyo valor aproximado fue de:

$$j_H \approx 3.5$$

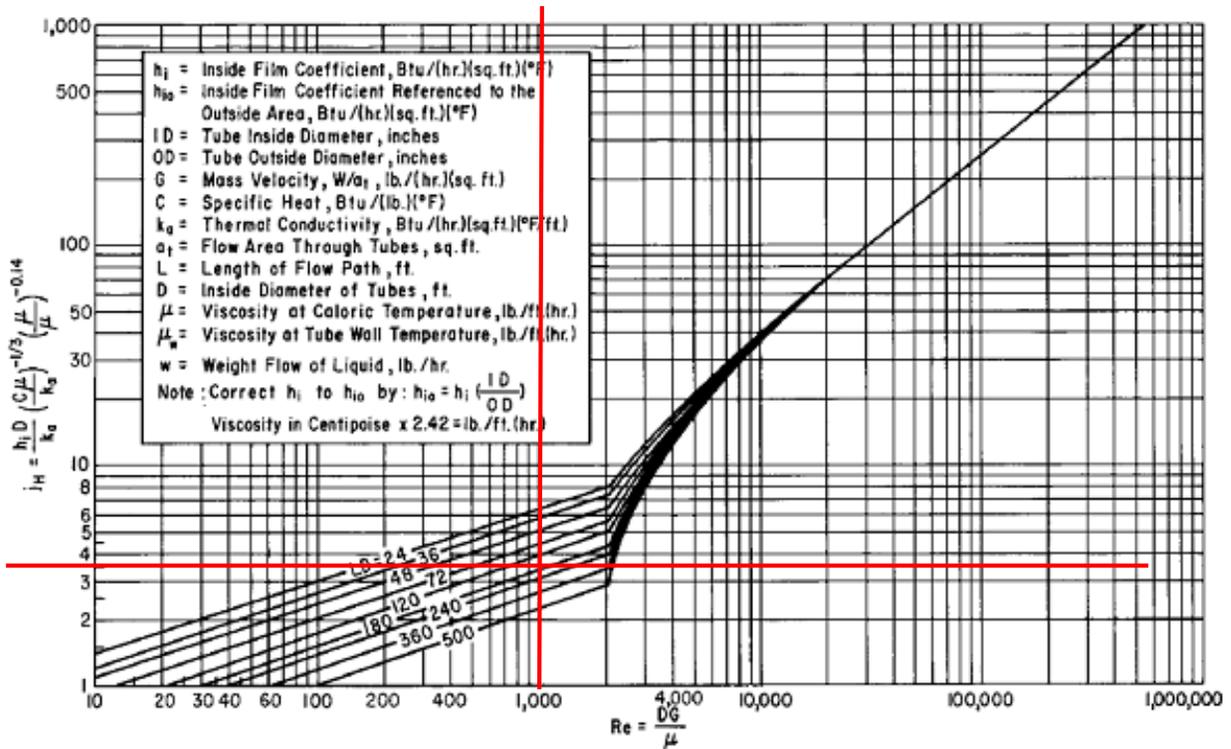


Tabla 4 Factor de corrección Fuente: (Kern, 2012)

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR EL LADO DE LOS TUBOS

- Cálculo de h_i

$$h_i = jH * \left(\frac{k}{DI}\right) * \left(\frac{Cp * \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} * \varphi_t$$

Dado que la expresión φ_t se desconoce la ecuación anterior se transforma en la siguiente manera:

$$\frac{h_i}{\varphi_t} = jH * \left(\frac{k}{DI}\right) * \left(\frac{Cp * \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h_i}{\varphi_t} = 3.5 * \left(\frac{0.191 \frac{BTU}{h * ft * ^\circ F}}{0.0651 ft}\right) * \left(\frac{0.52 \frac{BTU}{lb * ^\circ F} * 24.19 \frac{lb}{ft * h}}{0.191 \frac{BTU}{h * ft * ^\circ F}}\right)^{\frac{1}{3}} = 224.7741 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

- Cálculo de $\frac{h_{io}}{\varphi_t}$

$$\frac{h_{io}}{\varphi_t} = \frac{h_i}{\varphi_t} * \left(\frac{DI}{DE}\right)$$

DI de la tubería de acero al carbono = 0.0651 ft

DE de la tubería de acero al carbono = 0.0851 ft

$$\frac{h_{io}}{\varphi_t} = 224.7741 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} * \left(\frac{0.0651 ft}{0.0851 ft}\right) = 171.948 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

DISEÑO DEL LADO DE LA CORAZA

DIÁMETRO INTERNO DE LA CORAZA

- Cálculo del diámetro interno de la coraza (Di):

$$D_i = 0.637 * \sqrt{\frac{C_T}{C_{CT}} * \left[\frac{A_E * (R_{PT})^2 * d_e}{L_T}\right]^{0.5}}$$

Dónde:

C_T Constante del arreglo de los tubos (Kakaç et al., 2012)

- $C_T = 1,0$ para α_T igual a 90° y 45°
- $C_T = 0,87$ para α_T igual a 30° y 60°

C_{CT} Constante de cálculo del conteo de tubos (Kakaç et al., 2012)

- $C_{CT} = 0,93$ para un pase por los tubos ($n = 1$)
- $C_{CT} = 0,90$ para dos pases por los tubos ($n = 2$)
- $C_{CT} = 0,85$ para tres pases por los tubos ($n = 4$)

$A_E =$ área total de transferencia

$$R_{PT} = \text{Relación de paso de los tubos} = \frac{P_T}{d_e}$$

$L_T =$ Longitud de los tubos

$d_e =$ Diámetro externo de los tubos

$$D_i = 0.637 * \sqrt{\frac{C_T}{C_{CT}}} * \left[\frac{A_E * \left(\frac{P_T}{d_e}\right)^2 * d_e}{L_T} \right]^{0.5}$$

$$D_i = 0.637 * \sqrt{\frac{0.87}{0.85}} * \left[\frac{104.25 \text{ ft}^2 * \left(\frac{1.25 \text{ plg}}{1 \text{ plg}}\right)^2 * \frac{1 \text{ plg}}{12}}{12 \text{ ft}} \right]^{0.5} = 0.685 \text{ ft} = 8.22 \text{ plg} \approx 8 \text{ plg}$$

DEFLECTORES

$$\text{espacio del deflector (B)} = 2 \text{ plg}$$

CLARO

$$\text{Claro (C')} = 0.25 \text{ plg}$$

PASO DE LOS TUBOS

$$\text{paso de los tubos (P}_T\text{)} = \text{claro} + \text{DE de los tubos} = 1.25 \text{ plg}$$

ÁREA DE FLUJO EN EL LADO DE LA CORAZA

- Cálculo del área de flujo

$$a_s = \frac{DI_c * C' * B}{144 * P_T}$$

$$a_s = \frac{8 \text{ plg} * 0.25 \text{ plg} * 2 \text{ plg}}{144 * 1.25 \text{ plg}} = 0.0222 \text{ ft}^2$$

MASA VELOCIDAD EN EL LADO DE LA CORAZA

- Cálculo de la masa velocidad

$$G_s = \frac{w_c}{a_s}$$

$$G_s = \frac{6613.76 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{0.0222 \text{ ft}^2} = 297,917.117 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 * \text{h}}$$

DIÁMETRO EQUIVALENTE (DE)

- Cálculo del diámetro equivalente (De)

Para el cálculo del diámetro equivalente este depende del tipo de arreglo de tubo y en este caso se eligió un arreglo de tubos en triangulo puesto que el arreglo triangular es más preferido.

Para un arreglo de tubos en triangulo

$$d_e = \frac{4 * \left(\frac{1}{2} P_T * 0.86 P_T - \frac{\frac{1}{2} \pi D E_t^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi D E}$$

$$d_e = \frac{4 * \left(\frac{1}{2} (1.25 \text{ plg}) * 0.86 (1.25 \text{ plg}) - \frac{\frac{1}{2} \pi (1 \text{ plg})^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi (1 \text{ plg})} = 0.711 \text{ plg}$$

$$D_e = 0.711 \text{ plg} * \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ plg}} \right) = 0.05925 \text{ ft}$$

NÚMERO DE REYNOLDS EN LA CORAZA

- Cálculo del número de Reynolds

$$Re = \frac{De * G_s}{\mu_{\bar{T}}}$$

$$De = 0.05925 \text{ ft}$$

$$\mu_{\bar{T}} = 20 \text{ centipoise} * 2.242 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}} = 48.381 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}}$$

$$Re = \frac{0.05925 \text{ ft} * 340,915.464 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 * \text{h}}}{48.381 \frac{\text{lb}}{\text{ft} * \text{h}}} = 417.503$$

FACTOR DE TRANSFERENCIA DE CALOR LADO DE LA CORAZA.

Con el número de Reynolds obtenido, con ayuda de la gráfica se obtuvo el valor de la transferencia de calor lado de tubos (j_H).

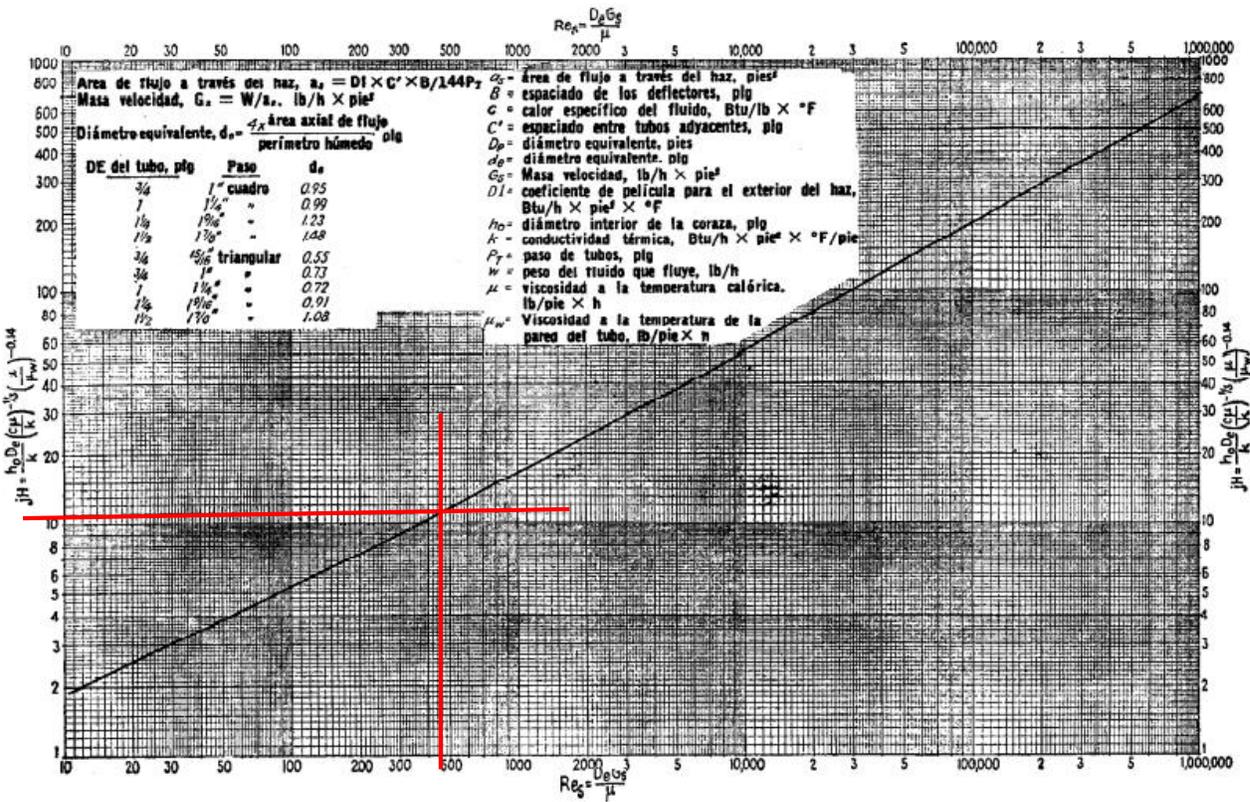


Tabla 5 Factor de transferencia Fuente: (Kern, 2012)

$$jH \approx 11$$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL LADO DE LA CORAZA

- Cálculo de h_o

$$h_o = jH * \left(\frac{k}{De}\right) * \left(\frac{Cp * \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} * \varphi_s$$

Dado que la expresión φ_t se desconoce la ecuación anterior se transforma en la siguiente manera:

$$\frac{h_o}{\varphi_s} = jH * \left(\frac{k}{De}\right) * \left(\frac{Cp * \mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{h_o}{\varphi_s} = 11 * \left(\frac{0.214 \frac{BTU}{h * ft * ^\circ F}}{0.05925 ft}\right) * \left(\frac{0.56 \frac{BTU}{lb * ^\circ F} * 48.381 \frac{lb}{ft * h}}{0.214 \frac{BTU}{h * ft * ^\circ F}}\right)^{\frac{1}{3}} = 676.64 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO

- Cálculo de la Temperatura de la pared del tubo:

$$t_w = \bar{t} + \frac{\frac{h_o}{\varphi_s}}{\frac{h_{io}}{\varphi_t} + \frac{h_o}{\varphi_s}} * (\bar{T} - \bar{t})$$

$$t_w = 92.9962 ^\circ F + \frac{1676.64 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}}{171.948 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} + 1676.64 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}} * (184.1 ^\circ F - 92.9962 ^\circ F)$$

$$t_w = 156.332 ^\circ F$$

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS A LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL TUBO

- Cálculo de μ_w a la temperatura t_w para ambos fluidos

Glicerina al 100%:

$$\mu_w = 17 \text{ centipoise} * 2.242 \frac{lb}{ft * h} = 41.124 \frac{lb}{ft * h}$$

Etilenglicol:

$$\mu_w = 12 \text{ centipoise} * 2.242 \frac{lb}{ft * h} = 29.02 \frac{lb}{ft * h}$$

RAZÓN DE VISCOSIDAD

Cálculo de φ_t y φ_s

Con ayuda de la gráfica 24 del kern se obtuvieron los valores de φ_t y φ_s de acuerdo con las viscosidades de los fluidos a la temperatura t_w

Para el lado de los tubos

$$\frac{\mu_t}{\mu_w} = \frac{12.095 \frac{lb}{ft * h}}{41.12 \frac{lb}{ft * h}} = 0.3$$

Para el lado de la coraza

$$\frac{\mu_s}{\mu_w} = \frac{48.381 \frac{lb}{ft * h}}{29.9 \frac{lb}{ft * h}} = 1.61$$

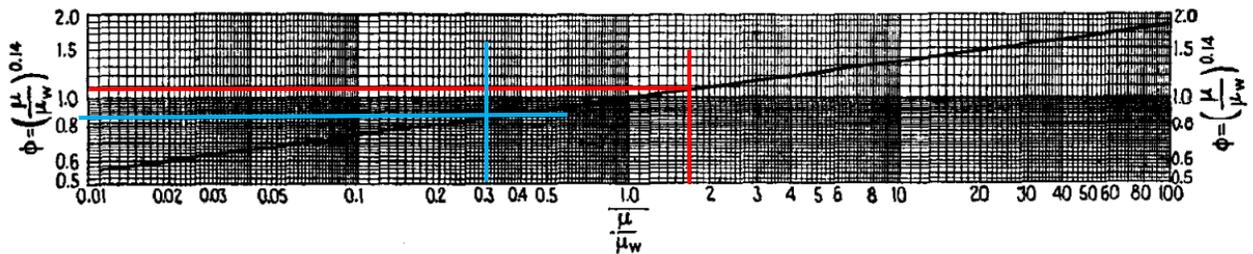


Tabla 6 Viscosidades fuente: (Kern, 2012)

Para el lado de los tubos

$$\varphi_t \approx 0.8$$

Para el lado de la coraza

$$\varphi_s \approx 1.3$$

Calculando el mismo coeficiente con la siguiente fórmula para comprobar

Para los tubos

$$\varphi_t = \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} = (0.3)^{0.14} = 0.84$$

Para el lado de la coraza

$$\varphi_s = \left(\frac{\mu_s}{\mu_w}\right)^{0.14} = (1.61)^{0.14} = 1.068$$

Por lo tanto, al ver de manera práctica se optó por los cálculos realizados para más exactitud

COEFICIENTE CORREGIDO PARA LOS TUBOS Y LA CORAZA

- Cálculo del coeficiente corregido para los tubos y la coraza

Tubos

$$h_{io} = \left(\frac{h_{io}}{\varphi_t}\right) * \varphi_t = \left(171.948 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}\right) * 0.84 = 136.17 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

Coraza

$$h_o = \frac{h_o}{\varphi_s} * \varphi_s = \left(167.64 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}\right) * 1.068 = 179.03 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

COEFICIENTE TOTAL U_c

- Cálculo del coeficiente total U_c

$$U_c = \frac{h_{io} * h_o}{h_{io} + h_o} = \frac{\left(136.17 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}\right) * \left(179.03 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}\right)}{136.17 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} + 179.03 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}} = 77.34 \frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F}$$

Cálculo del factor U_D nuevo

$$\text{superficie por pie lineal} = 0.2618 \frac{ft^2}{ft \text{ lin}}$$

Superficie total

$$A = \text{No de tubos} * \text{longitud de tbo} * \text{superficie linial}$$

$$A = 13 * 12 \text{ ft} * 0.2618 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft lin}}$$

$$A = 103.67 \text{ ft}^2$$

Con la nueva área obtenida se calculó el coeficiente de transferencia de calor U_d a partir de la ecuación

$$Q_{Total} = U_D * A * \Delta T$$

Despejando a U_D

$$U_D = \frac{Q_{Total}}{A * \Delta T} = \frac{344,047.79 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{103.67 \text{ ft}^2 * 82.5051 \text{ }^\circ\text{F}} = 40.22 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}}$$

FACTOR DE OBSTRUCCIÓN

$$R_d = \frac{U_C - U_D}{U_C * U_D} = \frac{77.34 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}} - 40.22 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}}}{77.34 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}} * 40.22 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}}} = 0.011933 \frac{\text{h} * \text{ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

CAIDA DE PRESION EN LOS TUBOS Y EN LA CORAZA

- Tubos

$$\Delta P_t = \frac{f * G_t^2 * L * n}{5.22 * 10^{10} * D_l * S * \varphi_t}$$

Donde:

$f \rightarrow$ factor de fricción

$G_s \rightarrow$ Masa – velocidad en el lado de los tubos

$L \rightarrow$ longitud de los tubos

$n \rightarrow$ numero de paso

$D_e \rightarrow$ diametro equivalente

$S \rightarrow$ gravedad especifica del HNO_3

$\varphi_t \rightarrow$ coeficiente

Cálculo del factor de fricción

El factor de fricción está en función del número de Reynolds, con lo cálculos anteriores se obtuvo un numero de Reynolds para el lado de los tubos, $R_e = 1089.65$, en base a ello el factor de fricción se obtuvo con la grafica de abajo donde se obtuvo un valor de:

$$f = 0.0031 \frac{ft^2}{plg^2}$$

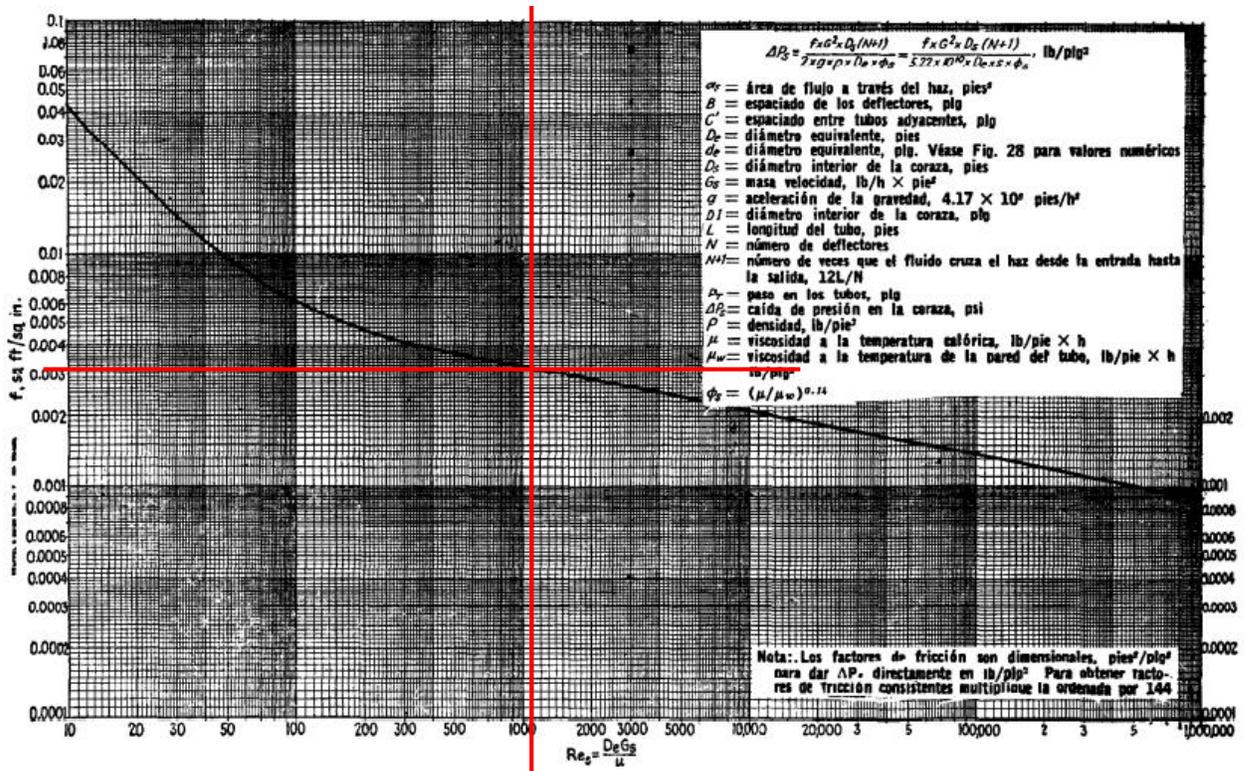


Tabla 7 Factor de fricción fuente: (Kern, 2012)

GRAVEDAD ESPECIFICA DEL FLUIDO

La gravedad especifica del Etilenglicol se obtuvo de la siguiente tabla donde la gravedad especifica es $S = 1.04$

Compuesto	Mol.	S *	compuesto	Mol.	s *
Acetaldehído	44.1	0.78	Cloruro de etilo	64.5	0.99
Acetato de amilo	130.2	0.88	Cloruro de metilo	50.5	0.92
Acetato de etilo	88.1	0.90	Cloruro de n-propilo	78.5	0.89
Acetato de metilo	74.9	0.83	Cloruro de sulfúrico	135.0	1.87
Acetona	58.1	0.79	Dibrometano	187.3	2.09
Acetato de butilo	116.2	0.88	Dicloroetano	99.0	1.17
Acetato de vinilo	86.1	0.93	Diclorometano	88.9	1.34
Agua	18.0	1.0	Difenilo	154.2	0.98
Acido acético 100%	60.1	1.05	Eter etílico	74.1	0.71
Acido acético 70%	.....	1.07	Etilbenceno	106.1	0.87
Acido n-butírico	88.1	0.96	Etilglicol	88.1	1.04
Acido i-butírico	88.1	0.96	Fenol	94.1	1.07
Acido clorosulfónico	116.5	1.77	Formiato de etilo	74.1	0.92
Acido fórmico	46.0	1.22	Glicerina 100%	92.1	1.26
Acido nítrico 95%	.....	1.50	Glicerina 50%	.....	1.13
Acido nítrico 60%	.....	1.38	n-heptano	100.2	0.68
Acido propiónico	74.1	0.99	n-hexano	86.1	0.66
Acido sulfúrico 100%	98.1	1.83	Hidróxido de sodio 50%	.....	1.53
Acido sulfúrico 98%	.....	1.84	Yoduro de etilo	155.9	1.93
Acido sulfúrico 60%	.....	1.05	Yoduro de n-propilo	170.0	1.76

Tabla 8 Gravedad específica fuente: (Kern, 2012)

- Cálculo de la caída de presión en el lado de los tubos

$$\Delta P_t = \frac{f * G_t^2 * L * n}{5.22 \times 10^{10} * D_i * S * \varphi_t}$$

Donde:

$$f = 0.0031$$

$$G_s = 200,858.418 \frac{lb}{ft^2 * h}$$

$$L = 12 \text{ ft}$$

$$n = 2 \text{ pasos por los tubos}$$

$$S = 1.04$$

$$\varphi_t = 0.84$$

$$D_e = 0.05925 \text{ ft}$$

$$D_i = 0.782 \text{ plg} = 0.0651 \text{ ft}$$

Sustituyendo los valores

$$\Delta P = \frac{0.0031 \frac{ft^2}{plg^2} * \left(200,858.418 \frac{lb}{ft^2 * h}\right)^2 * 12 \text{ ft} * 2}{5.22 \times 10^{10} * 0.0651 \text{ ft} * 1.04 * 0.84} = 1.0110 \frac{lb}{plg^2}$$

Cálculo de la pérdida de progreso

El cambio de dirección introduce una caída de presión adicional ΔP_r , llamada pérdida de regreso y se consideran cuatro cabezas de velocidad por paso como pérdida

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} * \frac{V^2}{2g'}$$

Donde

$$\frac{V^2}{2g'} = 0.006 \frac{lb}{plg^2}$$

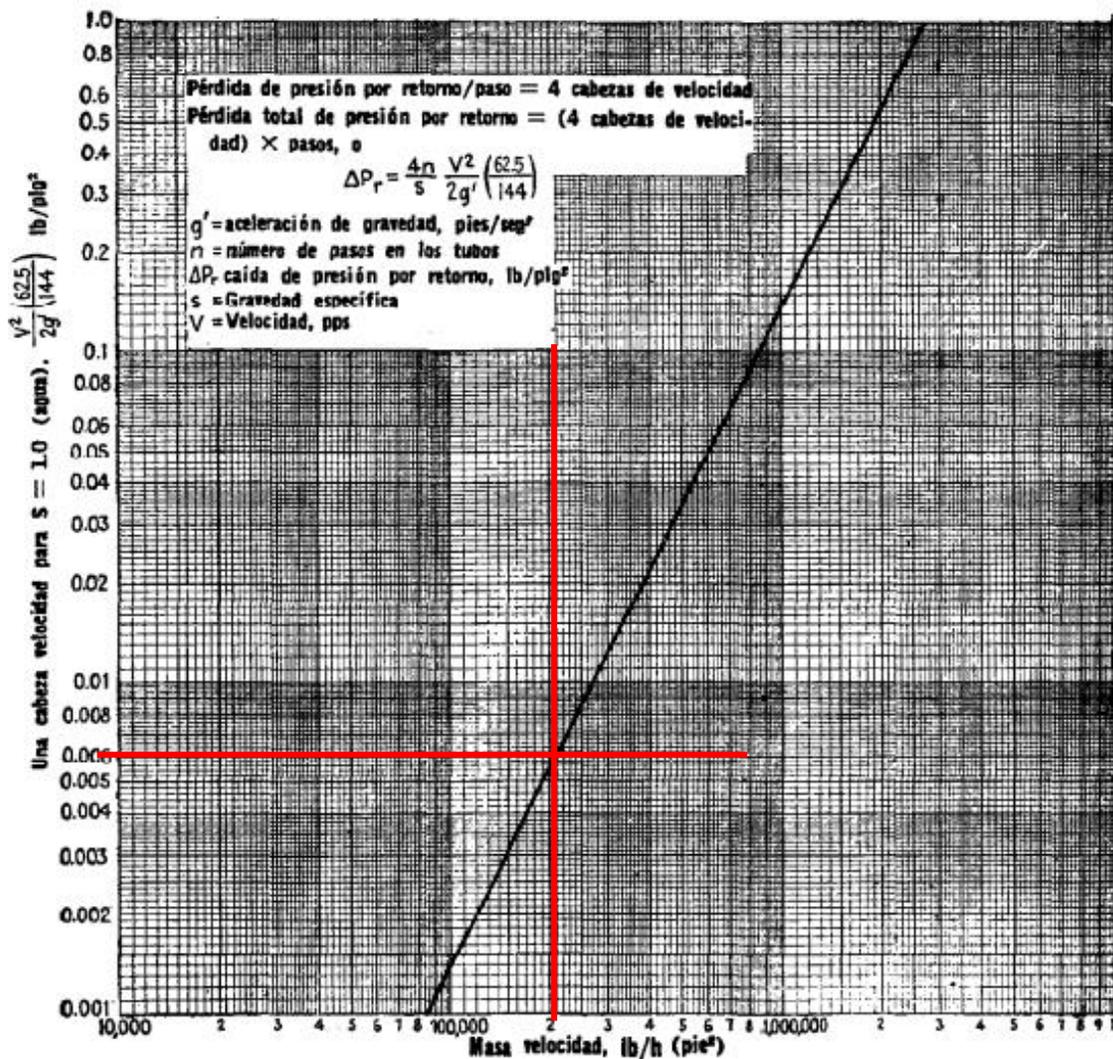


Tabla 9 Perdida de progreso fuente: (Kern, 2012)

Por lo tanto

$$\Delta P_r = \frac{4 * 2}{1.04} * 0.006 \frac{lb}{plg^2} = 0.04 \frac{lb}{plg^2}$$

Por consiguiente, la caída de presión total en el lado de los tubos es

$$\Delta P_T = \Delta P_r + \Delta P_t$$

$$\Delta P_T = 0.04 \frac{lb}{plg^2} + 1.01 \frac{lb}{plg^2} = 1.05 \frac{lb}{plg^2}$$

Coraza

$$\Delta P = \frac{f * G_S^2 * D_S * (N + 1)}{5.22 \times 10^{10} * D_e * S * \varphi_S}$$

Donde:

$f \rightarrow$ factor de fricción

$G_S \rightarrow$ Masa – velocidad en el lado de la coraza

$D_S \rightarrow$ diametro interno de la coraza

$(N + 1) \rightarrow$ numero de cruces

$D_e \rightarrow$ diametro equivalente

$S \rightarrow$ gravedad especifica de la glicerina

$\varphi_S \rightarrow$ coeficiente

Cálculo del factor de fricción

Para el cálculo del factor de fricción se necesitó del siguiente diagrama en función del número de Reynolds obtenido anteriormente para el lado de la coraza

Con un numero de Reynolds para el fluido en la coraza

$$R_e = 417.503$$

Por lo tanto

$$f = 0.004 \frac{ft^2}{plg^2}$$

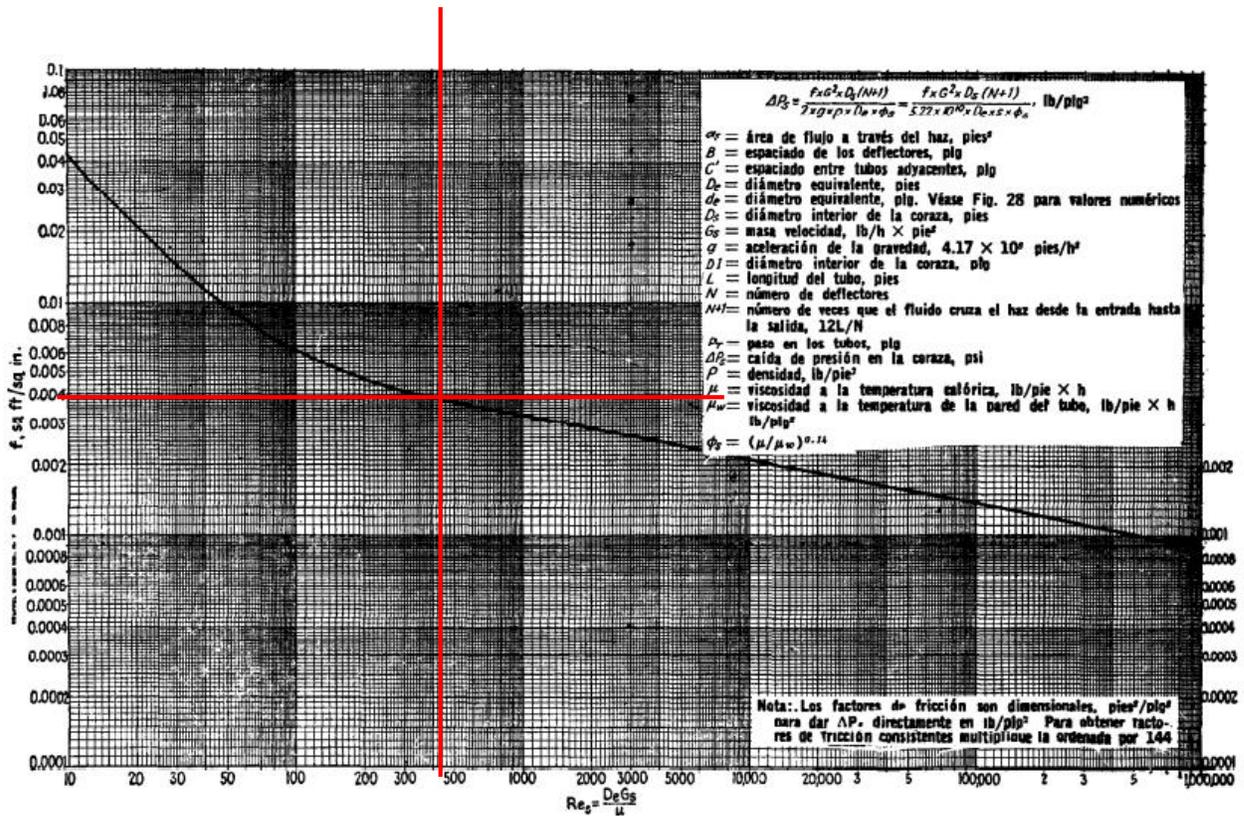


Tabla 10 Factor de fricción fuente: (Kern, 2012)

NÚMERO DE CRUCES (N + 1)

El número de cruces se determina mediante la siguiente expresión

Por lo tanto

$$(N + 1) = \frac{12 * 12 \text{ ft}}{2 \text{ plg}} = 72$$

Determinación del número de baffles o deflectores para el intercambiador de calor

A partir del número de cruces donde N es el número de deflectores, por lo tanto

$$N + 1 = 72$$

$$N = 72 - 1 = 71$$

Determinación de la gravedad específica del fluido

Gravedad específica de la glicerina

$$S = 1.26$$

Compuesto	Mol.	S *	compuesto	Mol.	s *
Acetaldehído	44.1	0.78	Cloruro de etilo	64.5	0.99
Acetato de amilo	130.2	0.88	Cloruro de metilo	50.5	0.92
Acetato de etilo	88.1	0.90	Cloruro de n-propilo	78.5	0.89
Acetato de metilo	74.9	0.83	Cloruro de sulfúrico	135.0	1.87
Acetona	58.1	0.79	Dibrometano	187.3	2.09
Acetato de butilo	116.2	0.88	Dicloroetano	99.0	1.17
Acetato de vinilo	86.1	0.93	Diclorometano	88.9	1.34
Agua	18.0	1.0	Difenilo	154.2	0.98
Acido acético 100%	60.1	1.05	Eter etílico	74.1	0.71
Acido acético 70%	.....	1.07	Etilbenceno	106.1	0.87
Acido n-butírico	88.1	0.96	Etilglicol	88.1	1.04
Acido i-butírico	88.1	0.96	Fenol	94.1	1.07
Acido clorosulfónico	116.5	1.77	Formiato de etilo	74.1	0.92
Acido fórmico	46.0	1.22	Glicerina 100%	92.1	1.26
Acido nítrico 95%	.....	1.50	Glicerina 50%	.....	1.13
Acido nítrico 60%	.....	1.38	n-heptano	100.2	0.68
Acido propiónico	74.1	0.99	n-hexano	86.1	0.66
Acido sulfúrico 100%	98.1	1.83	Hidróxido de sodio 50%	.....	1.53
Acido sulfúrico 98%	.....	1.84	Yoduro de etilo	155.9	1.93
Acido sulfúrico 60%	.....	1.05	Yoduro de n-propilo	170.0	1.76

Tabla 11 Composición de sustancias fuente: (Kern, 2012)

Calculo de la caída de presión en el lado de la coraza

$$\Delta P = \frac{f * G_s^2 * D_s * (N + 1)}{5.22 \times 10^{10} * D_e * S * \varphi_s}$$

Donde:

$$f = 0.004 \frac{ft^2}{plg^2}$$

$$(N + 1) = 72$$

$$G_s = 297,917.117 \frac{lb}{ft^2 * h}$$

$$D_s = \frac{8 plg}{12} = 0.666 ft$$

$$(N + 1) = 72$$

$$D_e = 0.0592 ft$$

$$S = 1.26$$

$$\varphi_s = 1.03$$

sustituyendo los valores

$$\Delta P = \frac{0.004 \frac{ft^2}{plg^2} * \left(297,917.117 \frac{lb}{ft^2 * h}\right)^2 * 0.666 ft * 72}{5.22 \times 10^{10} * 0.05925 ft * 1.26 * 1.03} = 4.24 \frac{lb}{plg^2}$$

7.2 Diseño mecánico del intercambiador de calor de tubos y coraza

Temperatura de diseño

La temperatura de diseño para nuestro intercambiador de calor se determinará mediante la siguiente expresión de acuerdo al código (ASME, 2019) y a la normativa (TEMA, STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2007), donde la temperatura de diseño será la que resulte mayor de las siguientes expresiones:

$$T_D = 1.1 * T_O$$

$$T_D = T_O + 25 \text{ } ^\circ F$$

$$T_D = 150 \text{ } ^\circ F$$

Donde T_O es la temperatura de operación, el cual es el valor normal de temperatura en las condiciones de operación del proceso, a la cual el intercambiador de calor será expuesto.

LADO DE LOS TUBOS

$$T_O = t_2 = 129.9 \text{ } ^\circ F$$

Aplicando las tres expresiones para ver que temperatura es mayor se obtuvo lo siguiente:

$$T_D = 1.1 * 129.9 \text{ } ^\circ F = 142.89 \text{ } ^\circ F$$

$$T_D = 129.9 \text{ } ^\circ F + 25 \text{ } ^\circ F = 155 \text{ } ^\circ F$$

$$T_D = 150 \text{ } ^\circ F$$

Con estas expresiones se tomó en consideración una temperatura de diseño de 155 $^\circ F$, puesto que fue la temperatura mayor registrada en comparación de las otras.

LADO DE LA CORAZA

$$T_O = T_1 = 230 \text{ } ^\circ F$$

Aplicando las tres expresiones para ver que temperatura es mayor se obtuvo lo siguiente:

$$T_D = 1.1 * 230 \text{ } ^\circ F = 253 \text{ } ^\circ F$$

$$T_D = 230 \text{ } ^\circ F + 25 \text{ } ^\circ F = 255 \text{ } ^\circ F$$

$$T_D = 150 \text{ } ^\circ F$$

En este caso se tomó en consideración una temperatura de diseño de 255 °F, puesto que fue la temperatura mayor registrada.

PRESION DE DISEÑO

$$\text{si } P_o < 300 \text{ Psi}$$

Entonces

$$P_d = P_o + 30 \text{ Psi}$$

Pero si

$$P_o > 300 \text{ Psi}$$

$$P_d = 1.1 * P_o$$

Por lo tanto, en este caso como las presiones de operación para el etilenglicol y la glicerina son de un bar y 5 bar respectivamente se utilizará el primer método.

Presión de diseño en el lado de los tubos para el etilenglicol

$$P_o = 5 \text{ Bar} = 72.51887 \text{ Psi}$$

$$P_d = 72.51887 \text{ Psi} + 30 \text{ Psi} = 102.51887 \text{ psi}$$

Presión de diseño en el lado de la coraza para la glicerina

$$P_o = 1 \text{ Bar} = 14.50377 \text{ Psi}$$

$$P_d = 14.50377 \text{ Psi} + 30 \text{ Psi} = 44.50377 \text{ Psi}$$

CALCULO DEL ESPESOR DE LA CORAZA

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{S * E - 0.6Pd}$$

Donde

$t \rightarrow$ Espesor de la coraza, plg

$Pd \rightarrow$ Presion de diseño en el lado de la coraza. Psi

$R_{interno}$ → Radio interno de la coraza, plg

S → Tensión máximo permitido, Psi

E → Eficiencia conjunta

Para en el lado de la coraza con una temperatura de diseño de 255 °F se obtuvo un valor de tensión máximo permitido de 83.98 MPa obtenida del código ASME II

Sustituyendo valores

Pd → 44.50377 Psi

$R_{interno}$ → 2 plg

S → 83.98 MPa = 12177.368 psi

E → 1

$$t = \frac{44.50377 \text{ Psi} * 2.5 \text{ plg}}{(12177.368 \text{ psi} * 1) - (0.6 * 44.50377 \text{ Psi})} = 0.00916 \text{ plg}$$

DIAMETRO EXTERIOR DE LA CORAZA

Una vez calculado el valor del espesor para nuestra coraza, el diámetro externo se determinará por medio de la siguiente expresión:

$$D_E = D_{I \text{ CORAZA}} + (2 * t)$$

Donde

D_E → Diametro externo de la coraza, plg

$D_{I \text{ CORAZA}}$ → Diametro interno de la coraza = 5 plg

t → Espesor de la coraza = 0.00916 plg

$$D_E = 5 \text{ plg} + (2 * 0.00916 \text{ plg}) = 5.0183 \text{ plg}$$

Espesor de los deflectores

BAFFLE OR SUPPORT PLATE THICKNESS
Dimensionis in Inches (mm)

Nominal Shell ID	Plate Thickness				
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.				
	24 (610) and Under	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)
6-14 (152-356)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)
15-28 (381-711)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)
29-38 (737-965)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)
39-60 (991-1524)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)
61-100 (1549-2540)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)

Tabla 12 Espesor de deflectores

Calculo de los cascos del intercambiador de calor

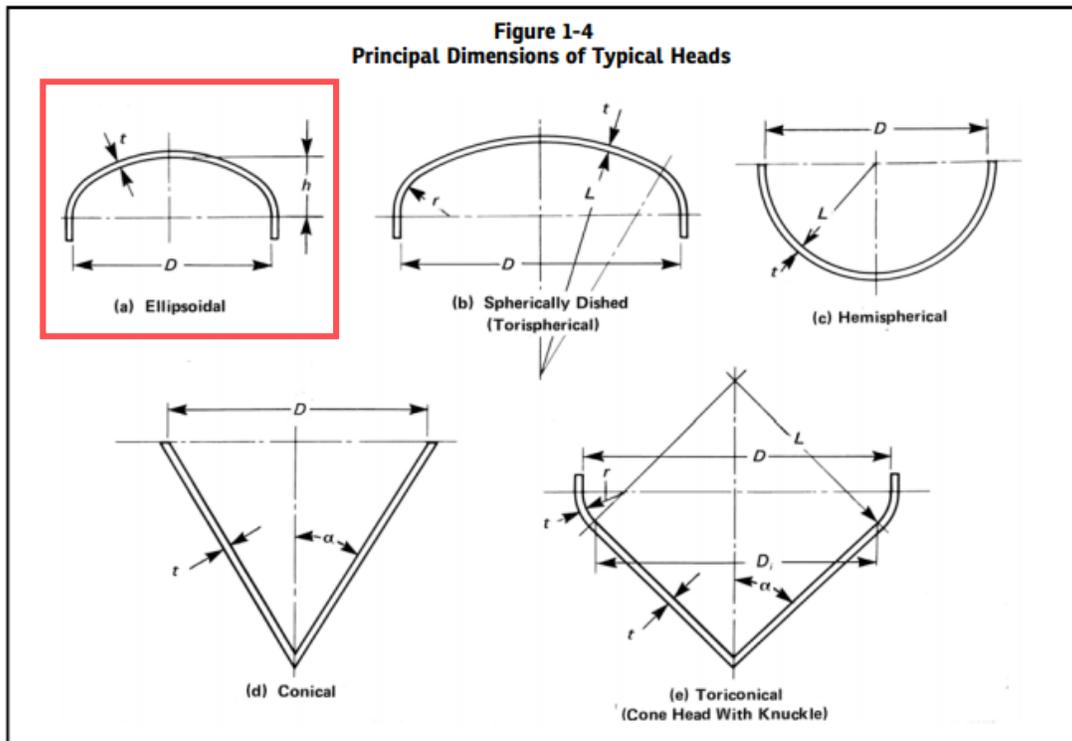


Figura 30 Tipos de cascos

$$t = \frac{Pd * D_I}{2 * S * E - 0.2 * P_d}$$

$$t = \frac{44.50377 \text{ Psi} * 2.5 \text{ plg}}{2 * (12177.368 \text{ psi} * 1) - (0.2 * 44.50377 \text{ Psi})} + \frac{1}{16} \text{ plg} = 0.0671 \text{ plg}$$

Diámetro externo de la tapa

De igual manera como se calculó el diámetro exterior de la coraza se procedió a calcular el diámetro exterior de la tapa

$$D_o = D_{I\text{Tapa}} + (2 * t)$$

Donde

$D_o \rightarrow$ *Diámetro externo de la tapa, in*

$D_I \rightarrow$ *Diámetro interno de la tapa = 5 in*

$t \rightarrow$ *Espezor de la coraza = 0.0671 in*

$$D_o = 5 \text{ plg} + (2 * 0.0671 \text{ plg}) = 5.1342 \text{ in}$$

Como se puede observar que el diámetro externo obtenido para la tapa esta aproximado al diámetro externo de la coraza por lo tanto se optó por tener las mismas dimensiones para el lado de la tapa y en el canal con el fin de evitar inconvenientes que puedan afectar en la construcción del intercambiador de calor.

CALCULO DE LAS BOQUILLAS

Velocidad del fluido en el lado de los tubos

$$V_t = \frac{\text{masa} - \text{velocidad en los tubos}}{3600 * \text{densidad del fluido}}$$

Por lo tanto

$$V_t = \frac{1127182.686 \left(\frac{\text{lb}}{\text{h} * \text{ft}^2} \right)}{3600 * 69.51 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} = 4.52 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Caudal

$$Q = \frac{W}{\rho}$$

$$Q = \frac{11023.11 \frac{lb}{h}}{69.51 \frac{lb}{ft^3}} = 158.58 \frac{ft^3}{h} = 0.04405 \frac{ft^3}{s}$$

Calculo del diámetro de las boquillas

$$Q = V * A$$

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{0.04405 \frac{ft^3}{s}}{4.52 \frac{ft}{s}} = 0.00974 ft^2$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Despejando a D

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.00974 ft^2}{\pi}} = 0.1113 ft = 1.33 plg$$

Espesor la boquilla

Calculo del espesor debido al esfuerzo circular

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{S * E - 0.6Pd}$$

Para en el lado de los tubos con la temperatura de diseño es de 155 °F se obtuvo un valor de tensión máximo permitido de 82 MPa para el material de diseño que es acero al carbono obtenida del código ASME II

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{S * E - 0.6Pd} + C$$

$$Pd \rightarrow 102.51887 Psi$$

$$R_{interno} \rightarrow 0.714 plg$$

$$S \rightarrow 82 MPa = 11893.1 psi$$

$E \rightarrow 1$

$C \rightarrow \text{Margen de corrosion} = \frac{1}{16} \text{ plg}$

$$t = \frac{102.51887 \text{ Psi} * 0.714 \text{ plg}}{(11893.1 \text{ psi} * 1) - (0.6 * 102.51887 \text{ Psi})} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$
$$t = 0.0635 \text{ plg}$$

Espesor debido al esfuerzo longitudinal

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{2 * S * E + 0.4 * Pd} + C$$

$Pd \rightarrow 102.51887 \text{ Psi}$

$R_{interno} \rightarrow 0.714 \text{ plg}$

$S \rightarrow 82 \text{ MPa} = 11893.1 \text{ psi}$

$E \rightarrow 1$

$C \rightarrow \text{Margen de corrosion} = \frac{1}{16} \text{ plg}$

$$t = \frac{102.51887 \text{ Psi} * 0.714 \text{ plg}}{2 * (11893.1 \text{ psi} * 1) + (0.4 * 102.51887 \text{ Psi})} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$
$$t = 0.0627 \text{ plg}$$

Boquillas en la coraza

Velocidad del fluido en el lado de la coraza

$$\rho V_n^2 \leq 500 \frac{lb}{ft * S^2}$$

Por lo tanto

$$V_t = \sqrt{\frac{500 \frac{lb}{ft * S^2}}{\rho}} = \sqrt{\frac{500 \frac{lb}{ft * S^2}}{78.25 \frac{lb}{ft^3}}} = 2.52 \frac{ft}{s}$$

Caudal

$$Q = \frac{W}{\rho}$$

$$Q = \frac{6613.76 \frac{lb}{h}}{78.25 \frac{lb}{ft^3}} = 84.52 \frac{ft^3}{h} = 0.0234 \frac{ft^3}{s}$$

Calculo del diámetro de las boquillas

$$Q = V * A$$

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{0.0234 \frac{ft^3}{s}}{2.52 \frac{ft}{s}} = 0.00928 ft^2$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Despejando a D

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.00928 ft^2}{\pi}} = 0.1 ft = 1.2 plg$$

Espesor la boquilla

Calculo del espesor debido al esfuerzo circular

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{S * E - 0.6Pd}$$

Para en el lado de la coraza con la temperatura de diseño es de 255 °F se obtuvo un valor de tensión máximo permitido de 83.98 MPa para el material de diseño que acero inoxidable obtenida del código ASME II

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{S * E - 0.6Pd} + C$$

$$Pd \rightarrow 44.50377 \text{ Psi}$$

$$R_{interno} \rightarrow 0.6 \text{ plg}$$

$$S \rightarrow 83.98 \text{ MPa} = 12177.368 \text{ psi}$$

$$E \rightarrow 1$$

$$C \rightarrow \text{Margen de corrosion} = \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$t = \frac{44.50377 \text{ Psi} * 0.6 \text{ plg}}{(12177.368 \text{ psi} * 1) - (0.6 * 44.50377 \text{ Psi})} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$t = 0.0647 \text{ plg}$$

Espesor debido al esfuerzo longitudinal

$$t = \frac{Pd * R_{interno}}{2 * S * E + 0.4 * Pd} + C$$

$$Pd \rightarrow 44.50377 \text{ Psi}$$

$$R_{interno} \rightarrow 0.6 \text{ plg}$$

$$S \rightarrow 83.98 \text{ MPa} = 12177.368 \text{ psi}$$

$$E \rightarrow 1$$

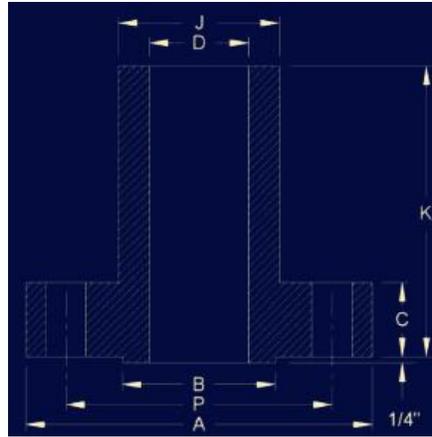
$$C \rightarrow \text{Margen de corrosion} = \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$t = \frac{44.50377 \text{ Psi} * 0.6 \text{ plg}}{2 * (12177.368 \text{ psi} * 1) + (0.4 * 44.50377 \text{ Psi})} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$t = 0.0636 \text{ plg}$$

DISEÑO DE LAS BOQUILLAS

Para el diseño de las boquillas para el lado de la coraza y por el lado del cabezal (parte de los tubos) se optó por un tipo de brida de cuello soldable largo, ya que generalmente las boquillas se toman de catálogos dependiendo del tipo de brida que se desee. Por lo que para el dimensionamiento de las bridas las dimensiones se obtuvieron de la empresa steeljrv

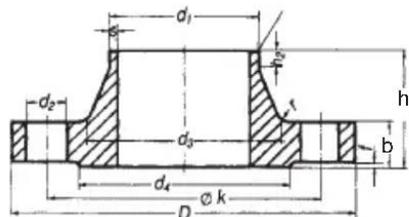


Pipe Size (NPS)	Outside Diameter of Flange A	Diameter of Raised Face B	Thickness of Flange C	Diameter of Bore D	Diameter of Hub at Base J	Length of Hub K	Number of Bolt Holes	Diameter of Bolt Holes	Bolt Circle Diameter P	Approx. Weight
1/2	3 3/4	1 3/8	9/16	0.50	1 1/2	9	4	5/8	2 5/8	5
3/4	4 5/8	1 11/16	5/8	0.75	1 7/8	9	4	3/4	3 1/4	8
1	4 7/8	2	11/16	1.00	2 1/8	9	4	3/4	3 1/2	11
1 1/4	5 1/4	2 1/2	13/16	1.25	2 1/2	9	4	3/4	3 7/8	14
1 1/2	6 1/8	2 7/8	7/8	1.50	2 3/4	9	4	7/8	4 1/2	17
2	6 1/2	3 5/8	1	2.00	3 1/4	9	8	3/4	5	21
2 1/2	7 1/2	4 1/8	1 1/8	2.50	3 15/16	9	8	7/8	5 7/8	29
3	8 1/4	5	1 1/4	3.00	4 5/8	9	8	7/8	6 5/8	38
3 1/2	9	5 1/2	1 3/8	3.50	5 1/4	9	8	1	7 1/4	48

Tabla 13 Diámetro de boquillas

Bridas

Para la selección de las bridas se optó por un diseño integral, el cual para su diseño se utilizó un catálogo como se puede ver en la figura de abajo.



Presión nominal 16 DIN 2633															
Tubo		Brida				Cuello				Resalte		Tornillos			Peso/U. (7,85 kg/dm ³) kg≈
DN	d ₁ ISO	D	b	k	h ₁	d ₃	s	r	h ₂	d ₄	f	Cant.	Boxa	d ₂	
10	17,2	90	14	60	35	28	1,8	4	6	40	2	4	M12	14	0,580
15	21,3	95		65		32				2					45	0,648
20	26,9	105	16	75	38	40	2,3			58					0,952
25	33,7	115		85		45	68			1,14					
32	42,4	140		100		40	56	2,6	78	1,69					
40	48,3	150	18	110	45	64	2,9	6	7	88	3	8	M16	18	1,86
50	60,3	165		125		75			8	102					2,53
65	76,1	185		145		90			10	122					3,06
80	88,9	200	20	160	50	105	3,2	8	12	138	3	8	M16	18	3,70
100	114,3	220		180		52				131					3,6	158	4,62
125	139,7	250	22	210	55	156	4	10	12	188	3	8	M16	18	6,30
150	168,3	285		240		184				4,5					212	7,75
200	219,1	340	24	295	62	235	5,9			268			M20	22	11,0

Tabla 14 Dimensiones de bridas

Brida para el cabezal

De igual manera que se hizo en el lado de la coraza para el lado de la boquilla se obtuvo un diámetro externo de 5.1342 plg, sin embargo, al ver que el diámetro es similar al de la coraza se optó por las mismas dimensiones para las bridas que unirán el cabezal con la coraza del intercambiador de calor.

Espejos

El diseño se hace bajo las normas del TEMA que recomienda que en ningún caso los espesores de los espejos deben ser al menos del diámetro exterior de los tubos para intercambiadores tipo "R":

$$t = \frac{F * G}{3} * \sqrt{\frac{P}{n * S}} + C$$

Donde

T: Espesor efectivo del espejo (plg).

S: Esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño (lb/plg²).

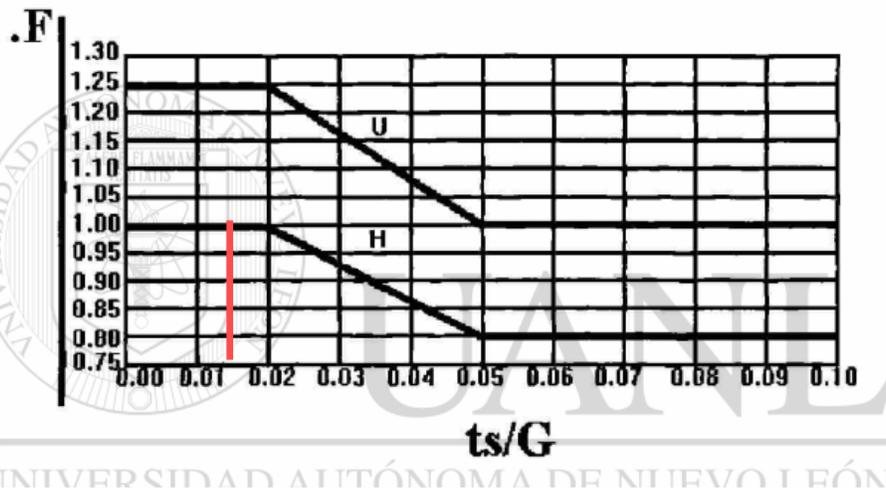
P: Presión de diseño depende del tipo de soporte del espejo de tubos que se use (lb/plg²).

Para el cálculo de F (Constante que depende del tipo de espejo). El valor de F varía entre 0.8 y 1.25. F se puede evaluar por medio de la figura de abajo. Cabe resaltar que la curva U se usa para espejos no fijos, y la curva H se usa para espejos fijos.

$G =$ Diámetro medio del empaque o la carcaza (plg).

$t_s =$ Espesor de la coraza

$$\frac{t_s}{G} = \frac{0.07166 \text{ plg}}{5 \text{ plg}} = 0.01432$$



$$F = 1$$

Calculo de la cpnstante que depende del tipo de arreglo

$$\eta = 1 - \frac{0.907}{\left[\frac{P_T}{d_o}\right]^2}$$

Donde:

$n =$ Constante que depende del tipo de arreglo

$P_T =$ Paso de tubos, = 1 plg

$d_o =$ diametro externo de los tubos, = 0.75 plg

Por lo tanto

$$\eta = 1 - \frac{0.907}{\left[\frac{1 \text{ plg}}{0.75 \text{ plg}}\right]^2} = 0.49$$

Calculo del espesor de los espejos

$$t = \frac{F * G}{3} * \sqrt{\frac{P}{n * S}} + C = \frac{1 * 5 \text{ plg}}{3} * \sqrt{\frac{44.50377 \text{ psi}}{0.49 * 12177.368 \text{ psi}}} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$t = 0.144 \text{ plg} + \frac{1}{16} \text{ plg} = 0.2065 \text{ plg}$$

7.3 Simulación del intercambiador de calor de tubos y coraza

Para la simulación del intercambiador de calor se utilizó el software operativo de Solidwork, en el cual se llevaron a cabo los planos de las dimensiones de las partes que conforman el diseño del intercambiador, es importante hacer mención que cuando se llevó a cabo el diseño de los planos el programa te exigía las medidas exactas para que llevara a cabo la simulación correctamente ya que de lo contrario, te marcaría error al momento de que llevara a cabo la ejecución de los comandos para mostrar cómo quedaría los planos del equipo de proceso.

Solidwork es un programa diseñado para que los ingenieros de procesos puedan diseñar equipos empleados en industrias ya que por su amplia gama de comandos

que contiene el programa hace que sea factible de usar siempre y cuando se tenga conocimiento del programa.

7.4 Estimación de costos de inversión y operación del intercambiador

Para la estimación del costo de nuestro intercambiador de calor se tomaron en cuenta factores como el área de nuestro intercambiador, la presión a la que trabaja y el material con el cual se diseñó el equipo.

Para este concepto se utilizaron las formulas establecidas en el libro de Diseño de procesos en ingeniería química del autor Arturo Jiménez.

Área del intercambiador de calor= 32.5 ft²

Costo base de acuerdo a la gráfica es igual a \$380.00

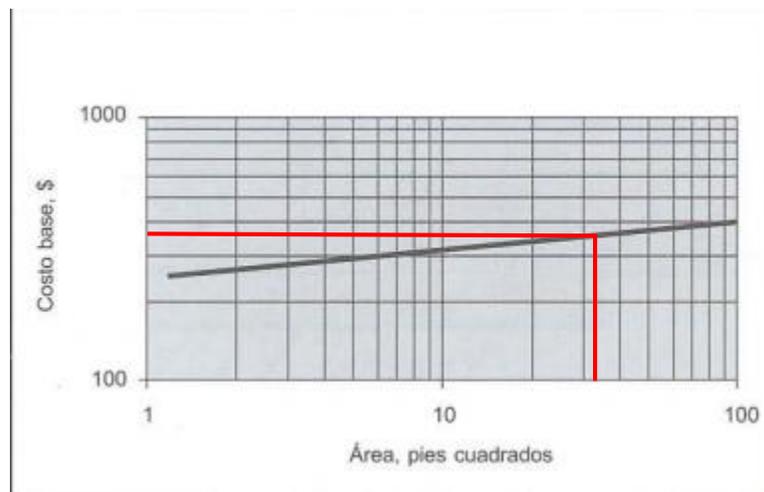


Tabla 15 Costo de intercambiadores Fuente: (Gutiérrez, 2003)

Los factores para este caso son:

$F_d = 1.0$ (tipo de intercambiador)

$F_p = 1.0$ (presión de trabajo 44.5 psi)

$F_m = 1.0$ (material de construcción)

El costo ajustado es:

Costos base $(F_d + F_p) F_m = \$380.00$

Ahora para intercambiadores de calor el factor de modulo desnudo es

Factor de modulo= 1.83

El costo de una unidad en base al acero al carbón, presiones bajas y cabezal flotante es

$$C_{md} = \$380.00 \times 1.83 = 695.4$$

El costo de la unidad deseada se obtiene sumando el rubro anterior la diferencia entre C_{fab} y C_{base} , lo cual da el costo del módulo desnudo ajustado.

$$C_{mda} = 695.4 + (380-380) = 695.4$$

Con este valor se determinará el costo de la unidad para años actualizados usando los índices de costos del Chemical Engineering.

$$C_{mda} = 695.4 \times 394.1/113.7 = \$2410.35$$

Añadiendo el 15% de contingencia de costos se obtiene el costo deseado.

$$\text{Costo} = \$2771.9$$

8. Resultados del proyecto

8.1 Resultados del diseño termodinámico

Propiedades	Fluido frío		Fluido caliente	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Nombre del fluido	Etilenglicol		Glicerina	
flujo másico	5000 kg/h		3000 kg/h	
Temperaturas	77°F	129.9°F	230°F	153.5°F
Densidad	1.11 g/cm ³	1.13 g/cm ³	1.26 g/cm ³	1.21 g/cm ³
Calor específico	0.59 btu / lb*°F	0.53 btu / lb*°F	0.68 btu / lb*°F	0.62 btu / lb*°F
Viscosidad	10 cp	7 cp	20 cp	0.27 cp
Conductividad térmica	0.191 btu/h*ft*°F	0.234 btu/h*ft*°F	0.214 btu/h*ft*°F	0.201 btu/h*ft*°F
Área de transferencia de calor	32.5 ft ²			
Área de flujo	0.05488 ft ²			
Masa velocidad	200 858.41 lb/ft ² *h			
Numero de Reynolds	1089.65			

8.2 Resultados del diseño mecánico

	Tubos	Coraza
Fluido	Etilenglicol	Glicerina al 100%
Temperatura de diseño	150°F	230°F
Presión de diseño	102.51 psi	44.5 psi
Espesor	0.083 in	0.00916 in
Diámetro exterior	0.7812 in	5.0183 in
Diámetro interior	1.021 in	5 in
Longitud	12 ft	

Número de tubos	13
Arreglo	Triangular

Casco del intercambiador	
Espesor	0.0671 in
Diámetro externo de la tapa	5.1342 in
Diámetro interno de la tapa	5 in

Espejos	
Espesor	0.216 in

Deflectores	
Espesor	0.375 in
Espaciado	2 in

Boquillas en tubos	
Diámetro	1.33 in
Espesor	0.0635 in

Boquillas en coraza	
Diámetro	1.2 in
Espesor	0.0647 in

Diseño de las boquillas

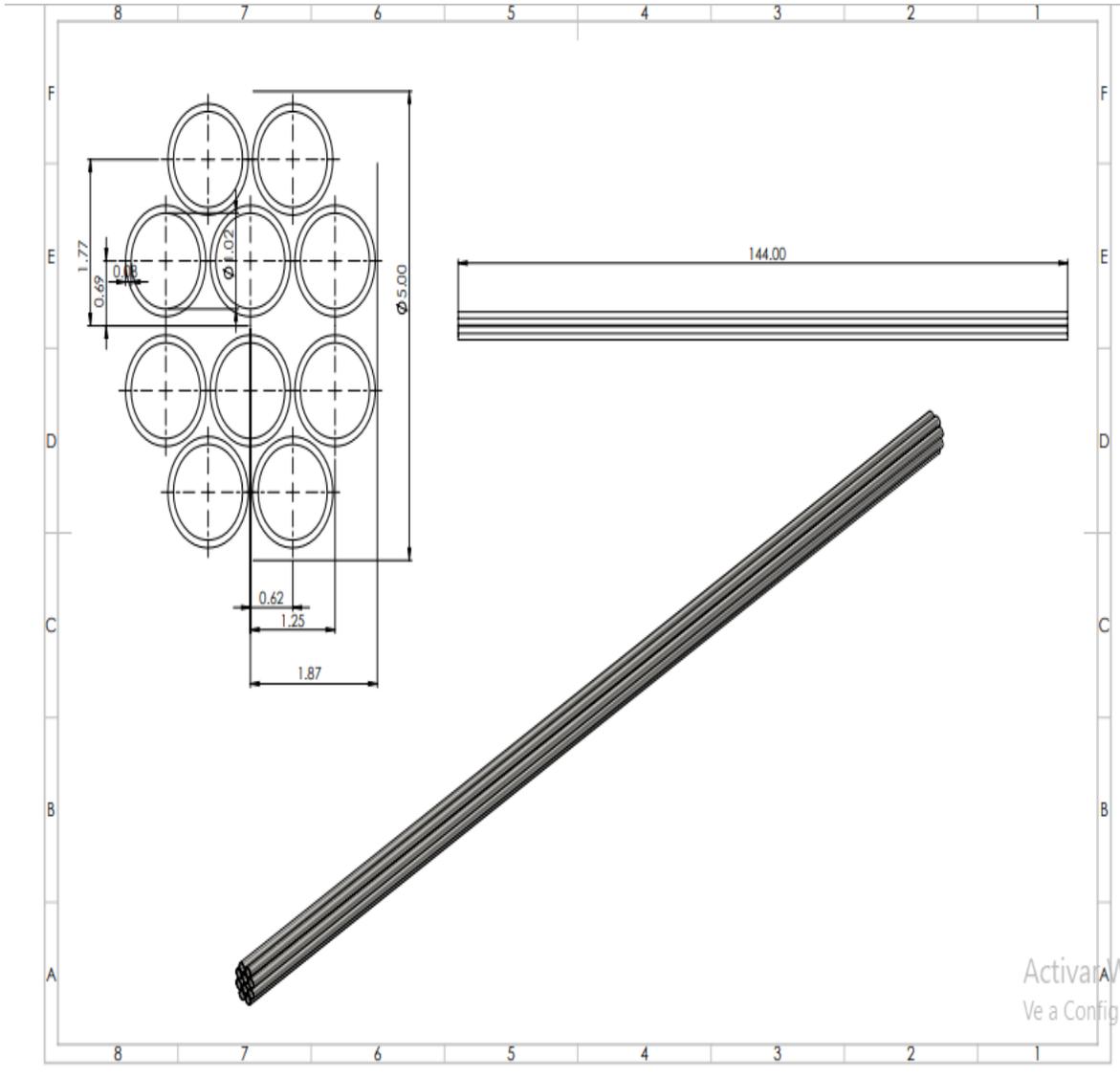
Pipe Size (NPS)	Outside Diameter of Flange A	Diameter of Raised Face B	Thickness of Flange C	Diameter of Bore D	Diameter of Hub at Base J	Length of Hub K	Number of Bolt Holes	Diameter of Bolt Holes	Bolt Circle Diameter P	Approx. Weight
1/2	3 3/4	1 3/8	9/16	0.50	1 1/2	9	4	5/8	2 5/8	5
3/4	4 5/8	1 11/16	5/8	0.75	1 7/8	9	4	3/4	3 1/4	8
1	4 7/8	2	11/16	1.00	2 1/8	9	4	3/4	3 1/2	11
1 1/4	5 1/4	2 1/2	13/16	1.25	2 1/2	9	4	3/4	3 7/8	14
1 1/2	6 1/8	2 7/8	7/8	1.50	2 3/4	9	4	7/8	4 1/2	17
2	6 1/2	3 5/8	1	2.00	3 1/4	9	8	3/4	5	21
2 1/2	7 1/2	4 1/8	1 1/8	2.50	3 15/16	9	8	7/8	5 7/8	29
3	8 1/4	5	1 1/4	3.00	4 5/8	9	8	7/8	6 5/8	38
3 1/2	9	5 1/2	1 3/8	3.50	5 1/4	9	8	1	7 1/4	48

Diseño de las bridas tomando en cuenta que se utilizara la mismas medidas para las bridas de cabezal

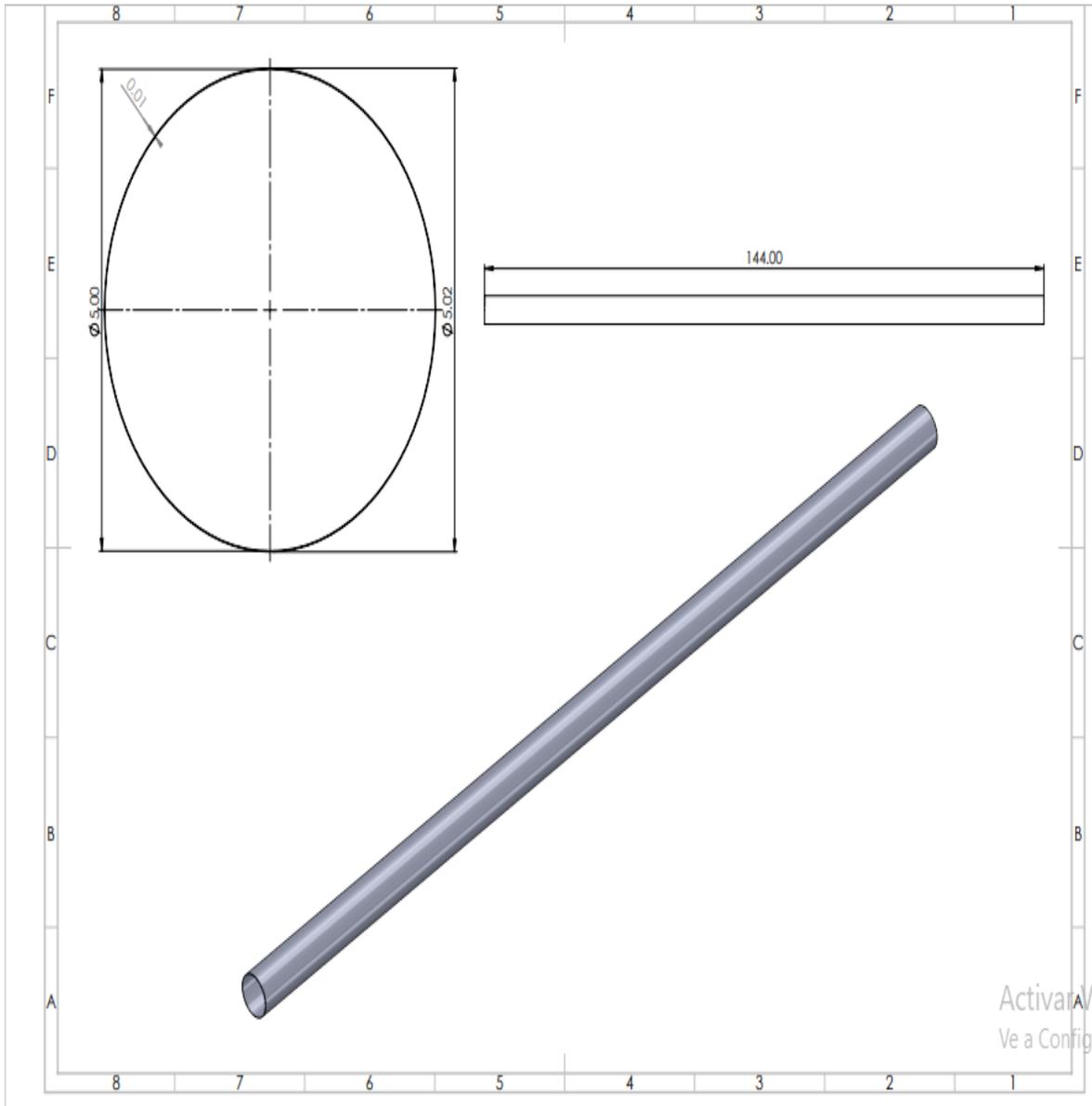
Presión nominal 16 DIN 2633															
Tubo		Brida				Cuello				Resalte		Tornillos			Peso/U. (7,85 kg/dm ³) kg≈
DN	d ₁ ISO	D	b	k	h ₁	d ₃	s	r	h ₂	d ₄	f	Cant.	Rosa	d ₂	
10	17,2	90	14	60	35	28	1,8	4	6	40	2	4	M12	14	0,580
15	21,3	95		65		32				2					45	0,648
20	26,9	105	16	75	38	40	2,3			58					0,952
25	33,7	115		85		45	68			1,14					
32	42,4	140	18	100	40	56	2,6	6	78	3	8	M16	18	1,69	
40	48,3	150		110		42			64					7	88	1,86
50	60,3	165	20	125	45	75	2,9		8					102	2,53
65	76,1	185		145		90			122					3,06	
80	88,9	200	22	160	50	105	3,2	8	10	138	8	M20	22	3,70	
100	114,3	220		180		52			131	3,6				158	4,62
125	139,7	250	210	156	4	188	6,30								
150	168,3	285	24	240	55	184	4,5		212	7,75					
200	219,1	340	24	295	62	235	5,9	268	11,0						

8.3 Resultados de los planos del intercambiador de calor

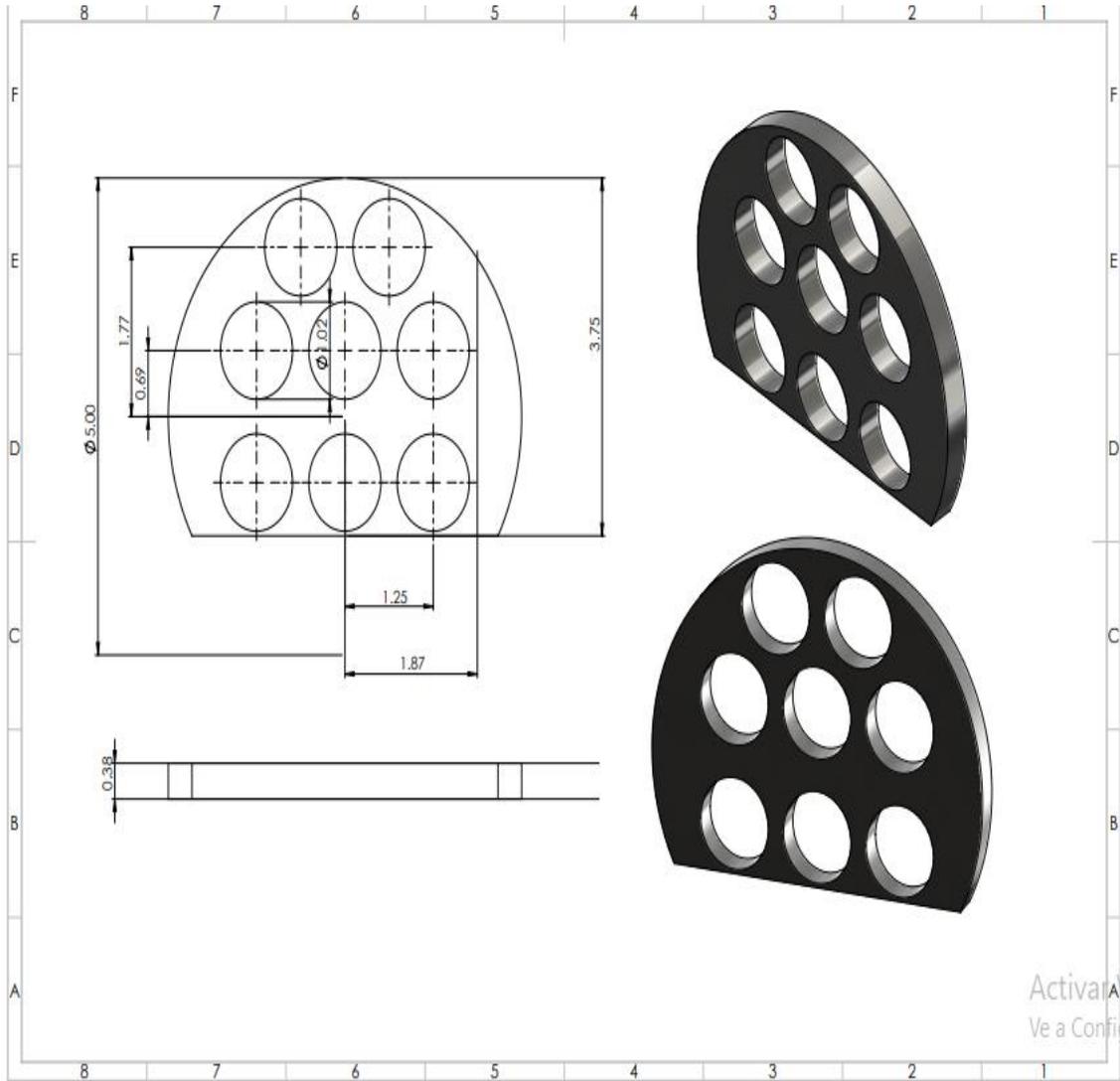
Tubos



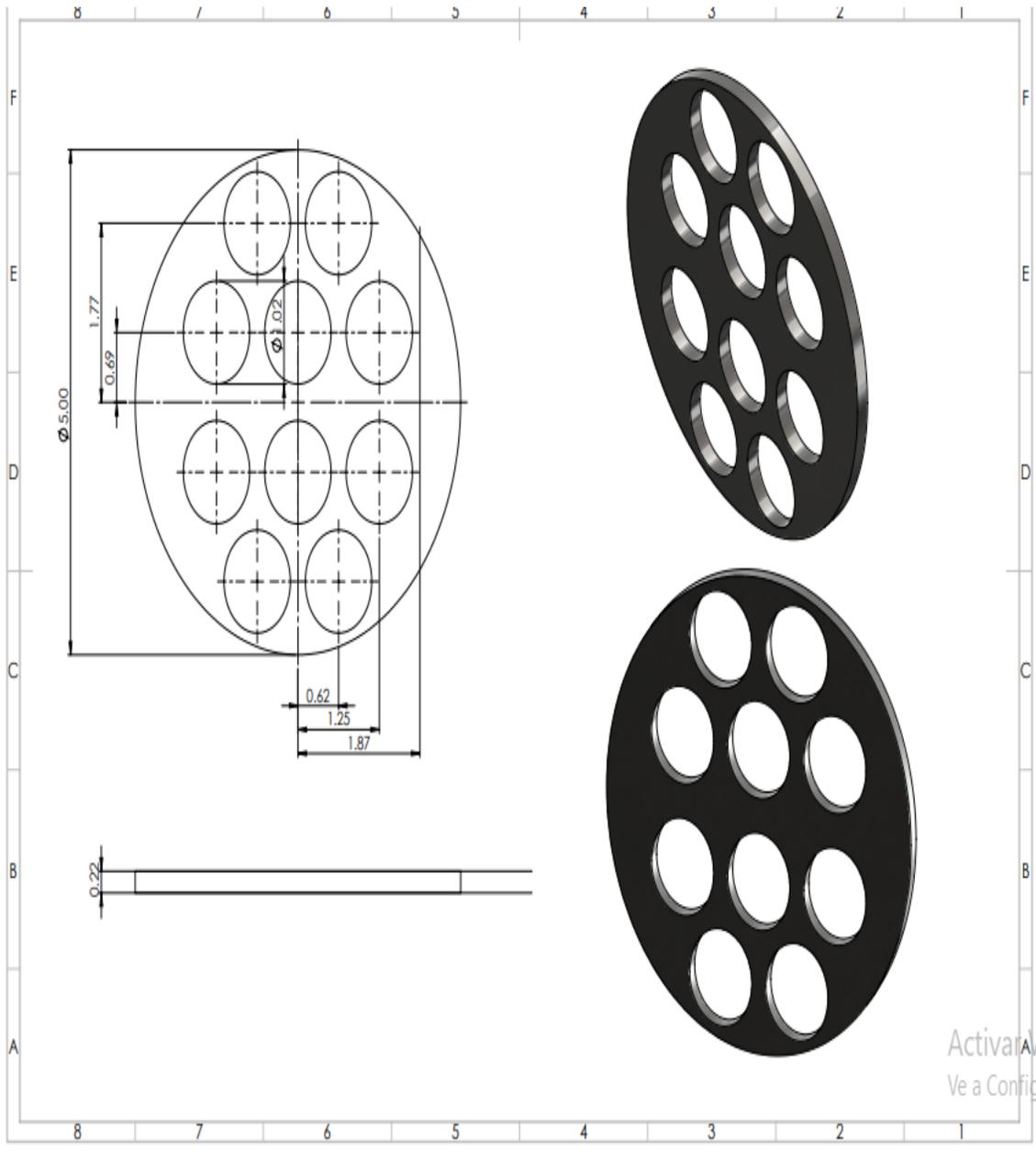
Coraza



Deflectores

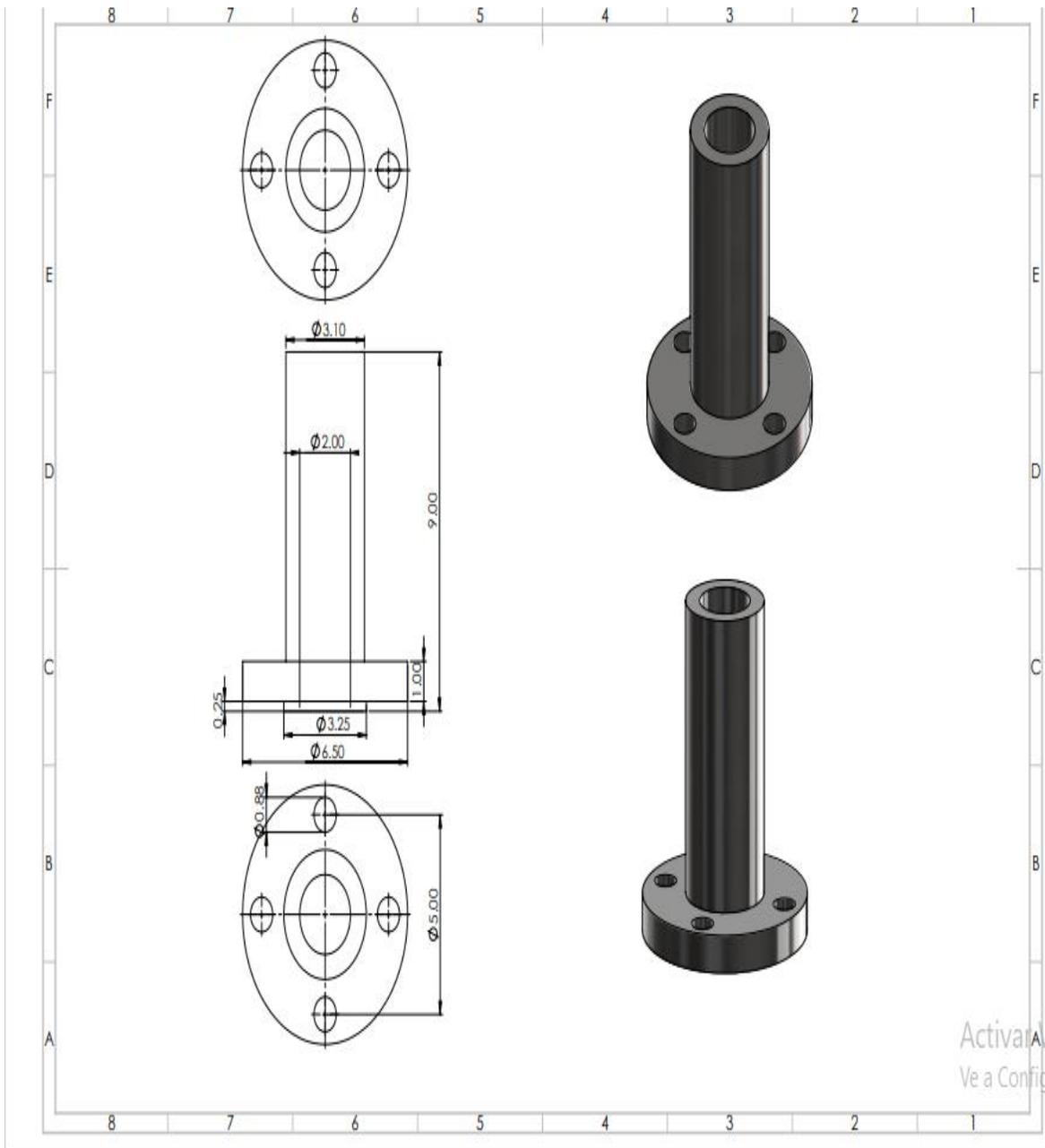


Espejo de tubos



Activar
Ve a Config

Boquillas de cabezal



8.4 Resultados del costo e inversión del intercambiador de calor

Costo del Intercambiador	\$2,771.90
--------------------------	------------

9. Conclusión

Este proyecto de residencia profesional, sin duda alguna tuvo sus dificultades ya que no es tan sencillo como parece diseñar un intercambiador de calor de tubos y coraza, ya que se tiene que consultar en mucha bibliografía datos actualizados del equipo, también modelos matemáticos que se tiene que emplear para la obtención de los resultados, consultar las normas vigentes que rigen el diseño de estos equipos como lo son las normas TEMA y ASME y también saber emplear adecuadamente el software operativo Solidwork para la simulación y el diseño de los planos del equipo.

Cabe mencionar que se logró llevar a cabo el objetivo general de este trabajo el cual consistía en: elaborar el diseño termodinámico y mecánico de un intercambiador de calor de tubos y coraza para un sistema no corrosivo, que se pueda construir y operar en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Se logró determinar cada uno de los objetivos específicos que se tenían en cuenta en este trabajo.

Se puede decir que por ser un medio no corrosivo en el cual se diseñó el intercambiador de calor las propiedades de las sustancias utilizadas no eran iguales pero tampoco variaban en algunos aspectos ya que ambas se caracterizaban por su bajo índice de corrosión hacia el equipo y por lo tanto el material con el cual se diseñó el equipo que en este caso fue acero al carbón no es tan costoso en comparación a materiales como el titanio fue técnicamente posible obtener datos de algunos catálogos de diseño.

En este trabajo se utilizó el software operativo de Solidwork para el diseño de los planos de las partes del equipo donde quedó demostrado que realmente se puede simular profesionalmente un equipo de intercambiador de calor con las medidas adecuadas y particularmente bien calculadas.

Finalmente se puede decir que la construcción de un intercambiador de calor de tubos y coraza en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en un medio no corrosivo se puede lograr con un costo técnicamente económico.

10. Competencias desarrolladas y/o aplicadas

Esta residencia profesional permitió reafirmar un poco más mis conocimientos en el diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza para un medio no corrosivo, logré comprender porque es importante la clasificación de estos equipos con base en su diseño, también la aplicación correcta de los modelos matemáticos para la obtención de los resultados del diseño del equipo.

De acuerdo al proyecto realizado pude lograr aplicar mis conocimientos de termodinámica, química analítica y orgánica, así como también mis conocimientos en matemáticas y programación ya que se diseñó por medio de Excel un programa con el cual se comprobaron los datos que se estaban calculados del equipo como también se utilizó un software de diseño para realizar los planos del equipo.

Es importante mencionar que de las materias que se me empleó conocimientos fue de la materia de procesos de separación ya que a través de esa cátedra fue que en el transcurso de mi formación como estudiante aprendí a diseñar equipos de intercambiadores de calor.

También se utilizó el uso adecuado del idioma inglés para la lectura de algunos catálogos de diseño y las normas que rigen el diseño de los equipos de proceso como lo son los intercambiadores de calor en las normas ASME y TEMA.

11. Fuentes de información

- ASME. (20 de Agosto de 2010). *Engineers, American Society of Mechanical*. Obtenido de <https://www.asme.org/error.html?aspxerrorpath=/search.aspx#page=1,category=>
- ASME. (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code: SECTION VIII, DIVISION 1, Rules for Construction of Pressure Vessels*. New York, NY: ASME Collective Membership Mar.
- ATSRD. (s.f.). *Agencia de sustancias toxicas*. Obtenido de <https://www.atsdr.cdc.gov/>
- Bianca Lucas Granados, R. S. (2018). *Corrosión*. España: Universidad Politecnica de Valencia .
- DOF, L. G. (8 de Julio de 1993). *Diario Oficial de la Federación* . Obtenido de <http://dof.gob.mx>
- Glinsa. (s.f.). Obtenido de Glinsa Sinergia que transforma: <https://glinsa.com.mx/>
- Gutiérrez, A. J. (2003). *Diseño de procesos en Ingeniería química*. México: Reverté.
- J. M. Smith, H. C. (2007). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. México: The McGraw-Hill.
- Jaramillo, O. A. (2007). *Intercambiadores de calor*. México: Centro de Investigaciones de Energía.
- Kern, D. Q. (2012). *PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. México: PATRIA.
- Labat, J. C. (Mayo de 2018). Diseño y Cálculo de un intercambiador de calor. *Diseño y Cálculo de un intercambiador de calor*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Moreno, J. A. (2016). *Factores que propician la corrosión*. Jalisco: Universidad de Jalisco.
- Navarro, R. (23 de Diciembre de 2019). *mifarma by atida*. Obtenido de <https://www.mifarma.es/>
- Sadik Kakac, H. L. (2012). *Heat Exchangers*. New York: CRC PressTaylor & FrancisGroup. .
- Solá, P. M. (1990). *Metales resistentes a la corrosión*. Barcelona : A.G. Portavella S.A.
- TEMA. (2007). *STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION*. New York, NY: TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC.
- TEMA. (2007). *Tubular Exchangers Manufactures Association*. Obtenido de <http://www.ingenieriaquimica.org/foros/norma-tema>
- Yunus A Cengel, M. A. (2012). *Termodinámica*. México: The McGraw-Hill.

12. Anexos

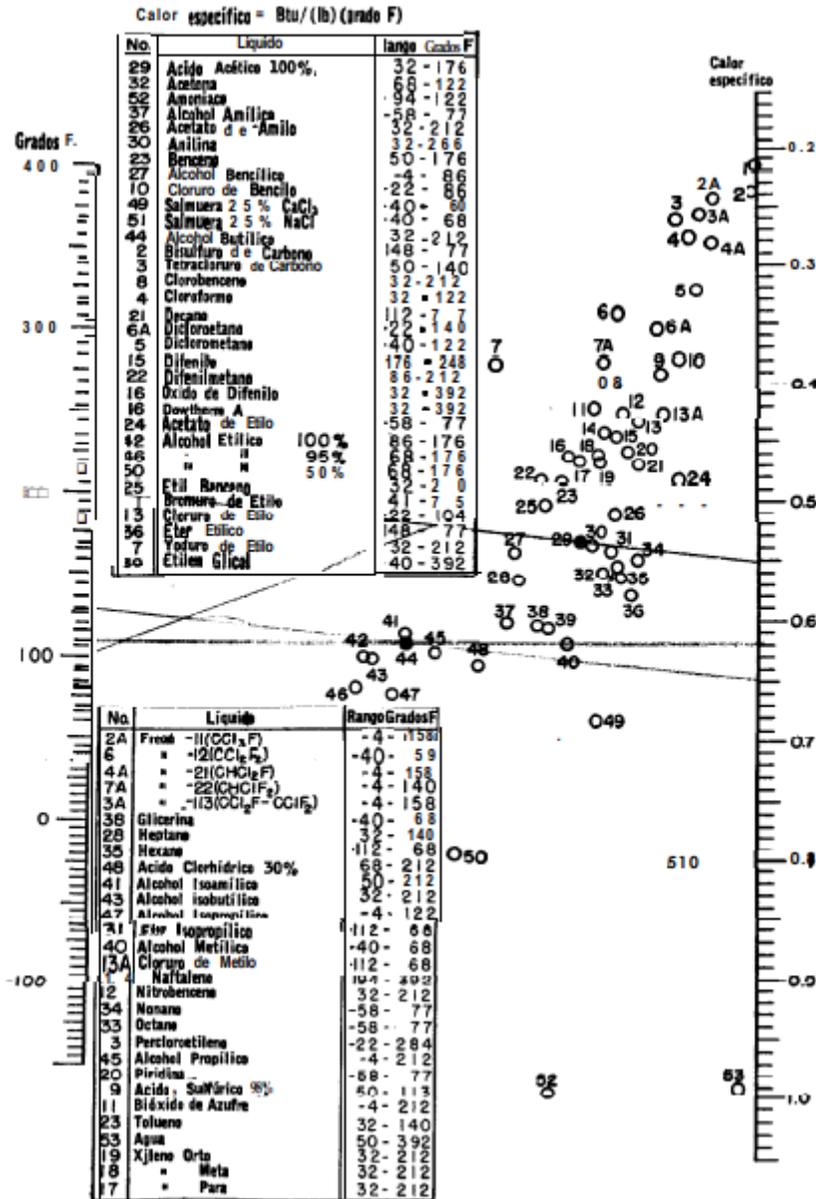


Tabla 1 Calores especificos tomada del (kern,2012)

Líquido	°F	k	Líquido	°F	k
Aceites			Bromobenceno	86	0.074
Ricino	68	0.104		212	0.070
Oliva	212	0.100	Nitrito de amoníaco	5	0.100
	68	0.097		86	0.111
Acetato de etilo	212	0.095	Bisulfuro de carbono	86	0.093
Alcohol 100%	48	0.101		167	0.088
80%	68	0.105	Tetracloruro	32	0.107
60%	68	0.137		154	0.094
40%	68	0.178	Cloruro de calcio, salmuera 30%	86	0.32
20%	68	0.224		86	0.34
100%	68	0.281	Cloruro de sodio, salmuera 25.0%	86	0.33
Benceno	122	0.087		86	0.34
Eter	86	0.086	Clorobenceno	50	0.083
Yoduro	140	0.082	Clorofórma	86	0.080
	68	0.070	Cymene (para)	86	0.078
Acetato de amilo	86	0.080		140	0.079
Alcohol (n-)	167	0.078	Decano (n-)	86	0.085
	104	0.064		140	0.083
	167	0.063	Diclorodifluorometano	30	0.057
	30	0.083		60	0.053
	86	0.094		100	0.048
	212	0.089		140	0.043
	86	0.088		180	0.038
	167	0.087	Dicloroetano	122	0.082
Acetato butílico (n-)	77-86	0.085	Diclorometano	5	0.111
Alcohol (n-)	86	0.097		86	0.096
(iso-)	167	0.095	Eter de petróleo	86	0.073
Acetona	66	0.091		167	0.073
	86	0.102	Etilen glicol	32	0.153
Acido acético 100%	167	0.095	Gasolina	86	0.078
30%	68	0.099	Glicerina 100%	68	0.164
Acido esteárico	68	0.20	80%	68	0.189
Acido láurico	212	0.0786	60%	68	0.220
Acido oleico	212	0.102	40%	68	0.259
Acido palmítico	212	0.0925	20%	68	0.278
Acido sulfúrico 90%	212	0.0835	100%	212	0.164
80%	86	0.21	Heptano (n-)	86	0.081
30%	86	0.25		140	0.079
Agua	86	0.30	Hexano (n-)	86	0.080
	32	0.320		140	0.078
	140	0.356	Kerosena	68	0.086
	176	0.381		167	0.081
	176	0.398	Mercurio	82	4.83
Alcohol alílico	77-86	0.104	Nitrobenceno	86	0.095
Alcohol heptílico (n-)	86	0.094		212	0.088
	167	0.091	Nitrometano	86	0.125
Alcohol hexílico (n-)	86	0.095		140	0.120
	167	0.091	Nonano (n-)	86	0.084
Alcohol metílico 100%	68	0.124		140	0.082
80%	68	0.154	Octano (n-)	86	0.083
60%	68	0.190		140	0.081
40%	68	0.234	Paraldehído	86	0.084
20%	68	0.284		212	0.078
100%	122	0.114	Pentano (n-)	86	0.078
Cloruro	5	0.111		167	0.074
	86	0.089	Percloroetileno	122	0.092
Alcohol propílico (n-)	86	0.099	Sodio	212	49
	167	0.095		410	46
Alcohol (iso-)	86	0.091	Tolueno	86	0.086
Amoniaco	140	0.090		167	0.084
Amoniaco, acuoso, 26%	5-86	0.35	Tetracloroetano	122	0.077
	68	0.361	Tricloroetileno	122	0.080
Anilina	140	0.091	Verdina (aguarrás)	59	0.074
Benceno	32-68	0.100	Waxolina	59	0.106
	86	0.092	Xileno (orto-)	68	0.090
	140	0.087	Xileno (meta-)	68	0.090

Tabla 2 conductividades térmicas tomada del (kern,2012)

Líquido	x	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	20.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35 %	7.9	15.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110 %	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.8
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.2	16.0	Metiletilcetona	13.9	8.6
Alcohol Ocilico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	116.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26 %	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dinopilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.6
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl ₂ 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sodio	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Cloroforma	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	16.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfurilo	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9

Tabla 3 coordenadas de viscosidades (kern, 2012)

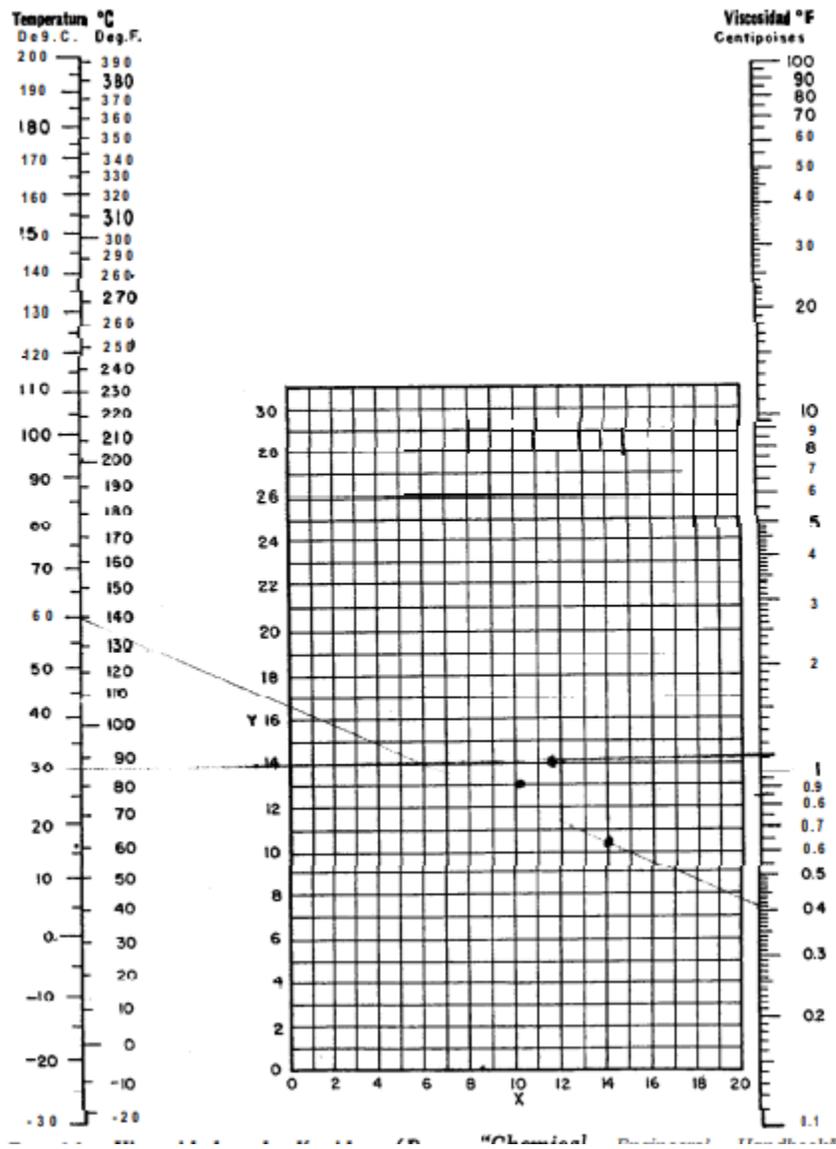


Tabla 4 Ajuste de las coordenadas de viscosidades (kern, 2012)

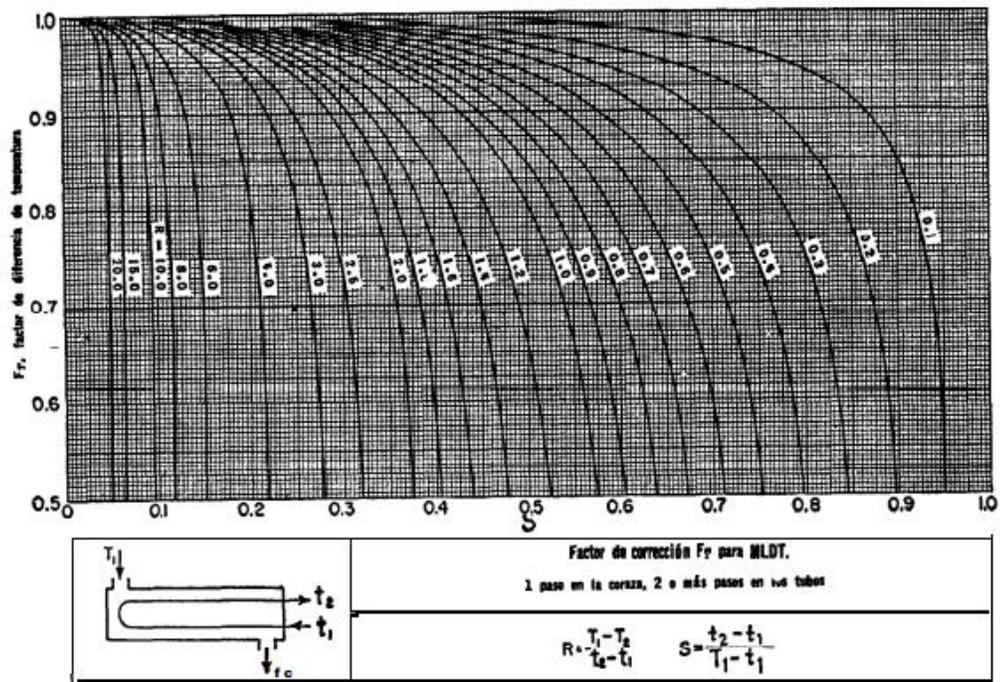


Tabla 5 Factores de fricción (kern, 2012)

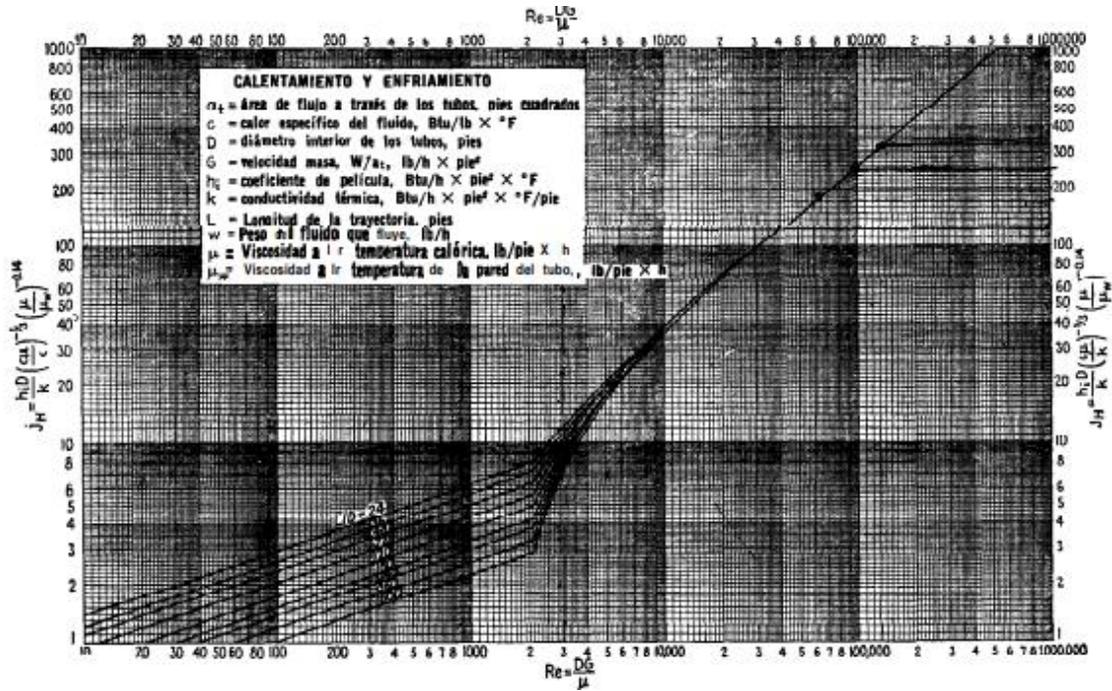


Tabla 6 Curva de transferencia de calor lado tubos (kern, 2012)

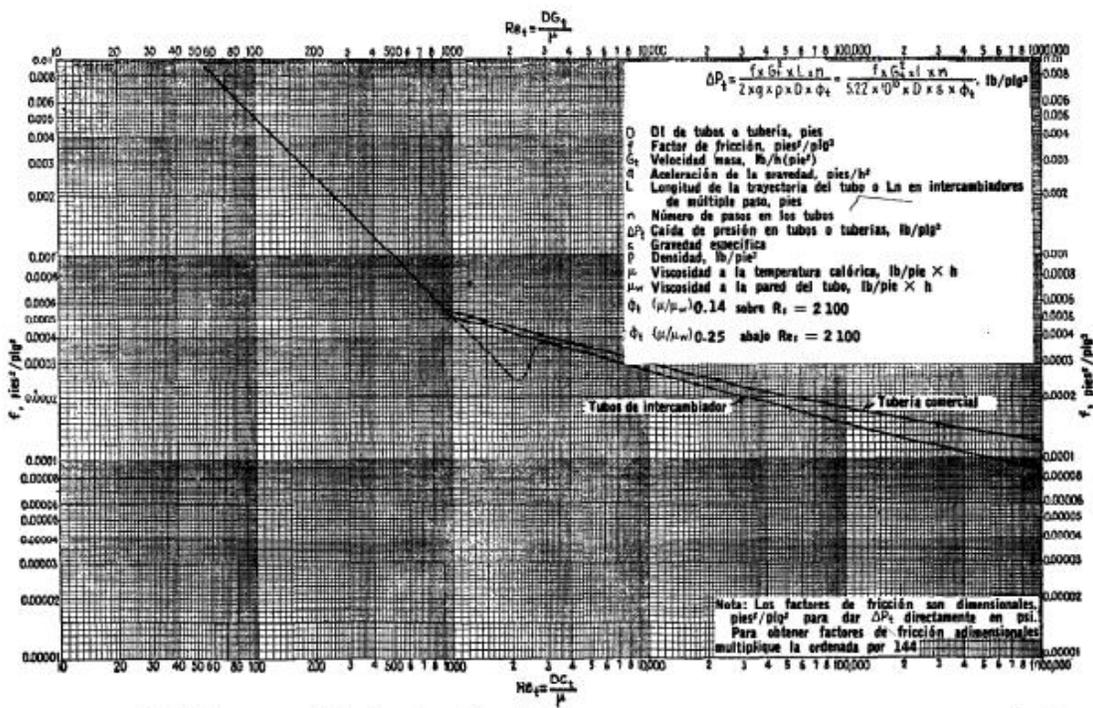


Tabla 7 Factores de fricción lado tubos (kern, 2012)

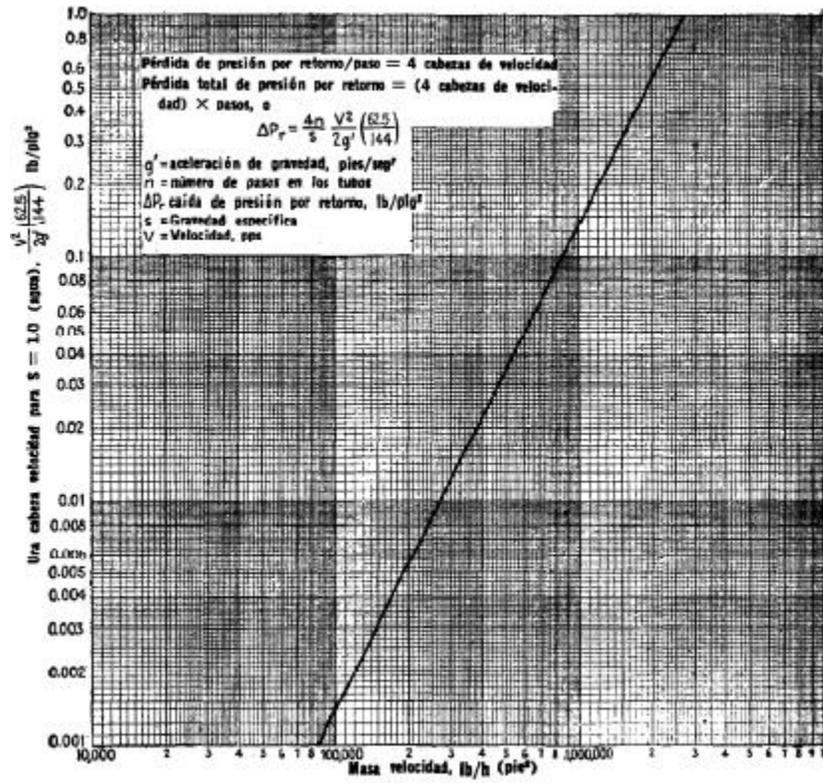


Tabla 8 perdida de fricción lado tubos (kern, 2012)

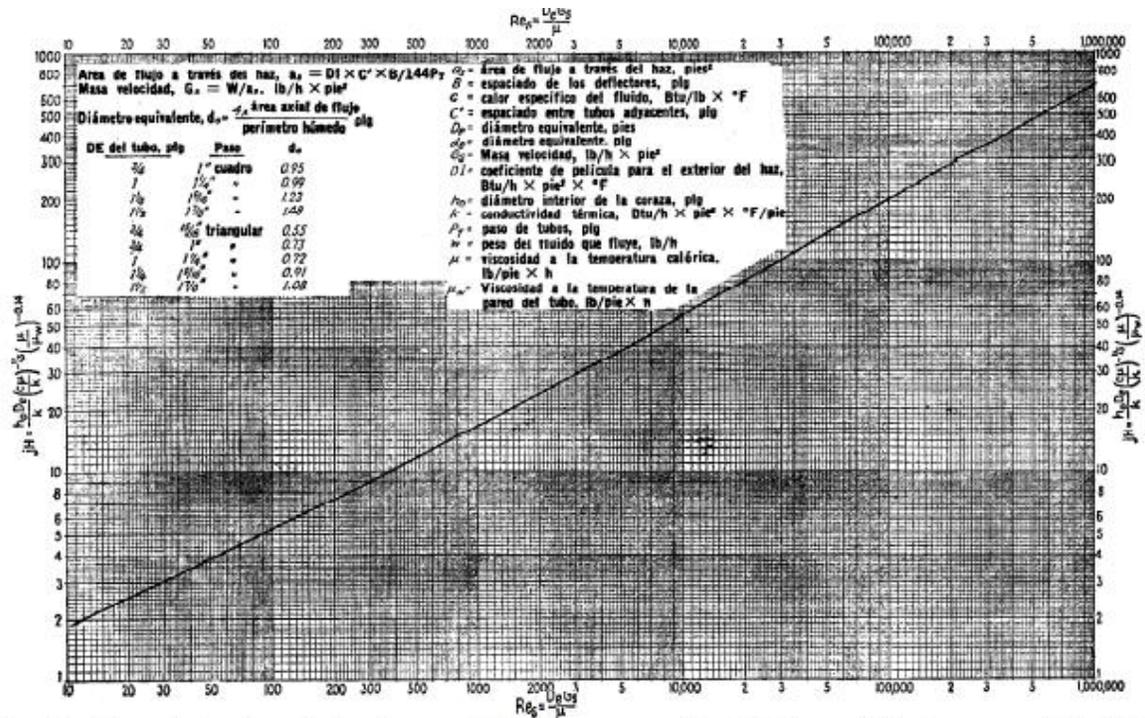


FIG. 28. Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25%

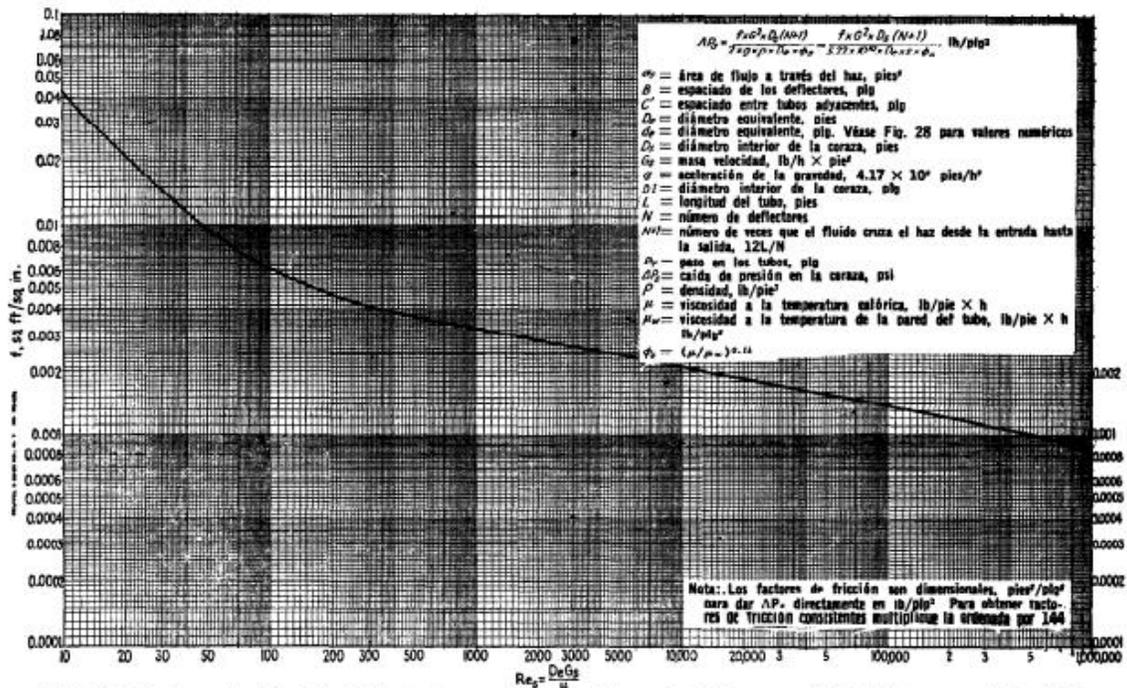


FIG. 29. Factores de fricción lado de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%

Intercambiadores

Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 ⁴
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	250-500 ⁴
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas ligeras	40-75
Sustancias orgánicas medias	Sustancias orgánicas medias	20-60
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas pesadas	10-40
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas ligeras	30-60
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas pesadas	10-40

¹ Las **sustancias orgánicas ligeras** son fluidos con viscosidades menores de 0.5 centipoises e incluyen benceno, tolueno, acetona, etanol, metil-etil-cetona, gasolina, kerosén y nafta.

² Las **sustancias orgánicas medias** tienen viscosidades de 0.5 a 1.0 centipoises e incluyen kerosén, strawoil, gasoil caliente, aceite de absorbedor caliente y algunos crudos.

³ **Sustancias orgánicas pesadas** tienen viscosidades mayores de 1.0 centipoises e incluyen gasoil frío, aceites lubricantes, petróleo combustible, petróleo crudo reducido, breas y asfaltos.

⁴ Factor de obstrucción 0.001.

⁵ Caída de presión de 20 a 30 lb/plg².

⁶ Estas tasas están influenciadas grandemente por la presión de operación.

Tabla 9 Factores UD (kern, 2012)

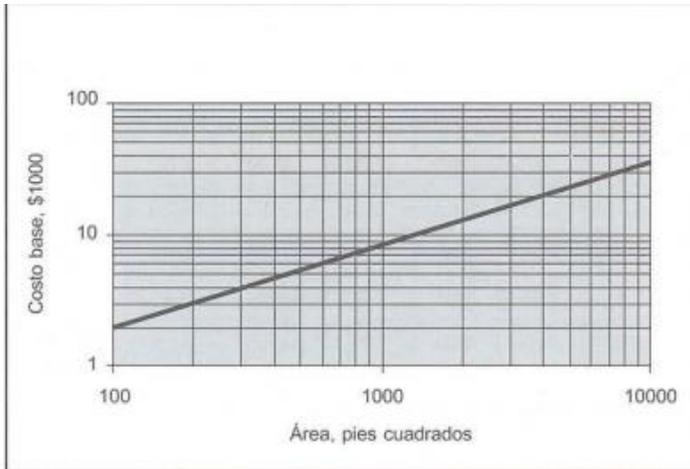


FIGURA 3.3
Costo base de intercambiadores de calor.

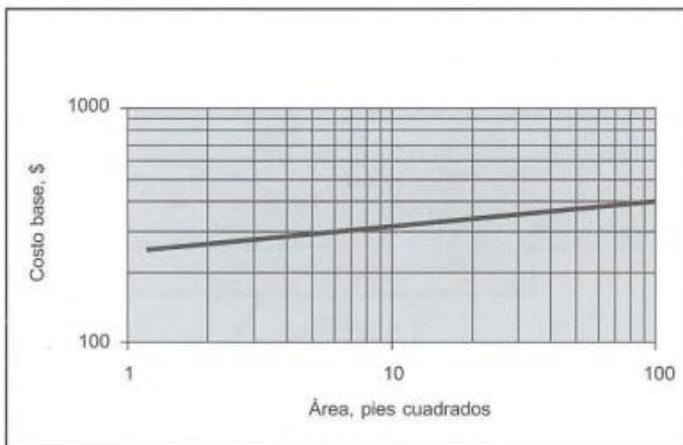


FIGURA 3.4
Costo de intercambiadores de calor (áreas pequeñas).

Tabla 10 costo base de intercambiadores (Jimenez, 2003)

factores de ajuste

Tipo de diseño	F _d	Presión de diseño (psi)	F _p
Reboiler, Kettle	1.35	Inferior a 150	0.00
Cabezal flotante	1.00	300	0.10
Tubo U	0.85	400	0.25
Hoja de tubos fijos	0.80	800	0.52
		1000	0.55

Material de la coraza / tubo, Fm

Área, ft ²	AC/ AC	AC/ Latón	AC/ Mo	AC/ Al	Al/ Al	AC/ Monel	Monel/ Monel	AC/ Ti	Ti/Ti
Inf. a 100	1.00	1.05	1.60	1.54	2.50	2.00	3.20	4.10	10.28
100 a 500	1.00	1.10	1.75	1.78	3.10	2.30	3.50	5.20	10.60
500 a 1000	1.00	1.15	1.82	2.25	3.26	2.50	3.65	6.15	10.75
1000 a 5000	1.00	1.30	2.15	2.81	3.75	3.10	4.25	8.95	13.05
5000 a 10000	1.00	1.52	2.50	3.52	4.50	3.75	4.95	11.1	16.60

Factores de ajuste

Material	Fm	Presión (psi)	Fp
AC/AC	1.00	Inferior a 600	1.00
AC/Al	1.85	900	1.10
		1000	1.25

Factores de módulo

Instalación de campo	1.35
Factor de módulo (normalizado)	1.83