

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE GAS.

1.1 INTRODUCCIÓN.

En la Industria Petrolera existen problemas, tales como la falta de regularidad, confiabilidad y eficiencia que impiden el normal funcionamiento de los procesos de obtención de derivados.

Es importante para la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional participar en los procedimientos de solución necesarios y de esta manera contribuir a solucionar problemas y dificultades técnicas, favoreciendo al enriquecimiento industrial del País.

El Complejo Industrial Shushufindi está ubicado en la Provincia de Sucumbíos, del cual forma parte la Planta de Gas del mismo nombre, la Planta de gas tiene capacidad para procesar 500 toneladas métricas diarias de gas doméstico; su operación se inició en febrero de 1984.

Es en la Planta de Gas donde se inicia el enfoque de este documento, específicamente, en un intercambiador de calor gas-liquido, el cual opera en la obtención de GLP con un régimen de trabajo del 100% a altas presiones y bajas temperaturas; por lo cual se ha decidido hacer una investigación que abarque materiales, análisis térmico, análisis mecánico y procesos de fabricación.

El intercambiador de calor es un intercambiador de placas y aletas o también llamado intercambiador compacto. Este está construido de aluminio y aleaciones en base de aluminio, en el presente documento se indica las aleaciones y especificaciones con las que se puede construir estos intercambiadores, para que cumpla con los requerimientos de normas internacionales.

Además, se hace el análisis térmico y mecánico de las partes que conforman el intercambiador, con este análisis se consigue obtener dimensiones para poder

escoger los procedimientos adecuados de construcción y ensamblaje para la realización de los procesos de fabricación.

En la Planta de gas es necesario tener un documento en el que se encuentre información del funcionamiento y armado de los intercambiadores compactos. Se ha desarrollado este documento de acuerdo al código ASME, Sección VIII⁽¹⁾ y norma ALPEMA⁽²⁾, y tomando como referencia intercambiadores existentes en el Complejo Industrial Shushufindi.

1.2 CONCEPTOS GENERALES

1.2.1 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Es un dispositivo que permite intercambiar calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida. Sus principales aplicaciones se presentan en acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desecho y procesamientos químicos.

Los intercambiadores de calor se clasifican de acuerdo al tipo de construcción y al arreglo del flujo, los intercambiadores mas simples son los de tubo concéntrico o doble tubo en el que los fluidos se mueven en la misma o en direcciones opuestas, cuando los flujos van en la misma dirección se denominan intercambiadores de flujo paralelo y cuando van en direcciones opuestas son de contraflujo. Otra alternativa, es que los flujos se muevan perpendiculares entre si, es decir, de flujo cruzado

Otro intercambiador común es el de coraza y tubos, las formas difieren de acuerdo al número de pasos del fluido por los tubos y por la coraza, la forma mas simple de este tipo de intercambiador implica un solo paso por tubo y coraza como se indica en la figura 1.1

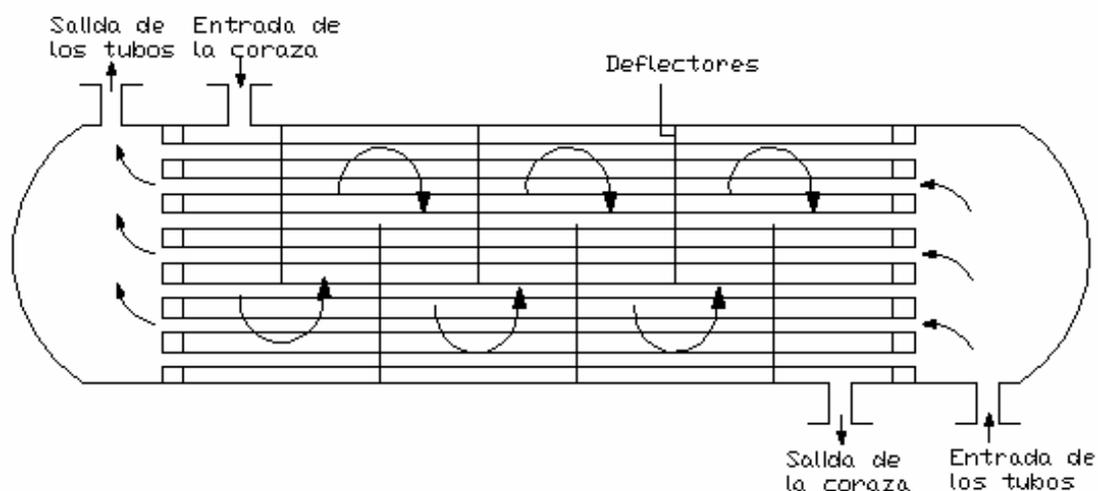


FIGURA 1.1 Intercambiador de calor de tubos y coraza de un paso por la coraza y un paso por los tubos

Para aumentar el coeficiente de convección del fluido del lado de la coraza se instalan deflectores con el fin de aumentar la velocidad del flujo, estos pueden ser de varios pasos por el tubo y la coraza. En la figura 1.2, se indica intercambiadores de calor de tubo y coraza de un paso por la coraza y dos pasos por los tubos y el intercambiador de calor de dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.

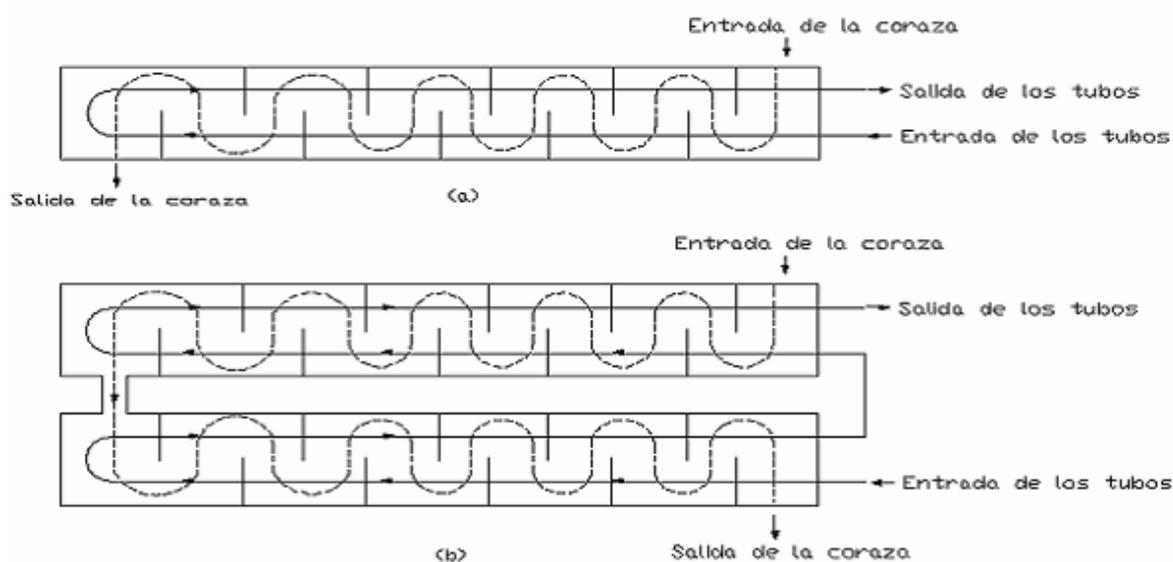


FIGURA 1.2 Intercambiador de calor de tubos y coraza, a) un paso por la coraza y dos pasos por el tubo; b) dos pasos por la coraza y dos pasos por los tubos.

Una clase especial e importante de intercambiadores de calor son los intercambiadores de calor compactos y de los que se hablara detalladamente a continuación.

1.2.2 INTERCAMBIADOR DE CALOR COMPACTO.

Los intercambiadores de calor compactos (ver figura 1.3) son intercambiadores que están funcionando cerca de un siglo, este tipo de intercambiadores se emplean principalmente en el procesamiento de gas natural y tienen gran aplicación cuando los fluidos están a temperaturas por debajo de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos dispositivos tienen complejos arreglos de tubos con aletas o placas con aletas y se usa normalmente cuando uno de los fluidos es un gas o tienen un coeficiente de convección pequeño. El modo de intercambio de calor depende de la altura de las aletas, número de pasos y longitud y ancho de las placas separadoras de aletas.

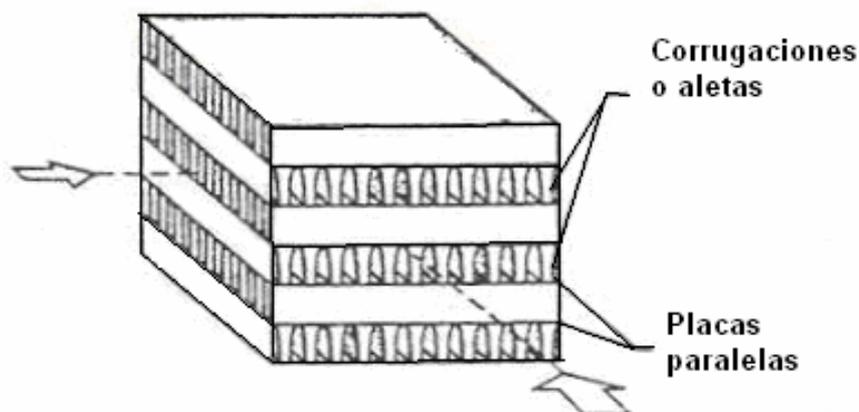


FIGURA 1.3 Intercambiador de calor compacto.

1.2.3 DESETANIZADOR.

El desetanizador es un recipiente vertical que se encarga de separar el metano, el etano por calentamiento del gas natural. ⁽⁵⁾

1.2.4 DEBUTANIZADOR.

El debutanizador es en donde se realiza la separación del propano y butano por calentamiento del gas natural que ya ha pasado a través del desetanizador. ⁽⁵⁾

1.2.5 GAS NATURAL.

Es una mezcla de hidrocarburos, generalmente gaseosos presentes en forma natural en estructuras subterráneas. El gas natural consiste principalmente de metano (80%) y proporciones significativas de etano, propano y butano. Existirá siempre alguna cantidad de condensado y/o aceite asociado con el gas. ⁽¹⁵⁾

1.2.6 GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP).

El GLP está compuesto de propano, butano, o una mezcla de los dos, la cual puede ser total o parcialmente licuada bajo presión con objeto de facilitar su transporte y almacenamiento. El GLP puede utilizarse para cocinar, para calefacción o como combustible automotriz. ⁽¹⁵⁾

1.2.7 PROPANO.

Es un hidrocarburo familia de los alcanos, se encuentra en pequeñas cantidades en el gas natural, consistente de tres átomos de carbono y ocho de hidrógeno (C_3H_8); gaseoso en condiciones normales. A presión atmosférica el propano se licúa a $-42^{\circ}C$. ⁽¹⁶⁾

1.2.8 BUTANO.

Un hidrocarburo que consiste de cuatro átomos de carbono y diez átomos de hidrógeno (C_4H_{10}). Normalmente se encuentra en estado gaseoso pero se licúa fácilmente para transportarlo y almacenarlo. ⁽¹⁶⁾

1.2.9 RECIPIENTES A PRESIÓN

Un recipiente a presión es aquel que contiene fluidos a presiones internas superiores a la presión atmosférica, también se consideran recipientes a presión si su presión de funcionamiento es cercana al vacío o esta sometida a presiones externas.

1.3 FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE GAS E INTERCAMBIADOR GAS-LÍQUIDO

1.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL GLP. ⁽⁵⁾

Para hacer una descripción del proceso de obtención de GLP en la planta de gas del Complejo Industrial Shushufindi se pueden distinguir las siguientes etapas: separación, deshidratación, refrigeración de gas y líquidos de entrada secos y destilación. El proceso está calculado para obtener la mayor cantidad de propano, isobutano y butanos normales.

El proceso de obtención de GLP en la planta se describe a continuación y puede ser observado y comprendido de mejor manera empleando el *diagrama de flujo* en el Anexo N° 4.

El proceso inicia con la recolección del gas natural que llega de los pozos a un separador de entrada, en el cual se separan gas, hidrocarburos líquidos (que serán llamados únicamente líquidos) y agua. El agua es enviada al pozo de quemado; el gas y los hidrocarburos líquidos son inicialmente deshidratados y después enfriados por intercambio de calor con: gas residual frío proveniente de la parte alta del separador frío, líquido del separador frío y propano refrigerante en un enfriador de gas. El líquido condensado durante el enfriamiento del gas de entrada es extraído y enviado al desetanizador. El gas restante es enviado al sistema de gas residual.

El caudal de diseño de gas de entrada es: 708.000 Nm³/d (25.000 MSCF/D), a 38,6 Kg/cm² (550 psig) de presión, y 49°C (120°F) de temperatura, con un peso molecular de 30,05. El caudal de líquido es: 191 l/min. (50,5 gpm.) con un peso específico de 0,56.

1.3.2 SEPARACIÓN

Existen tres líneas de entrada de gas y tres líneas de entrada de líquido condensado, estas se juntan y entran en el separador de gas de entrada a una presión de 38,6 Kg./cm² (550 psig), y una temperatura de 49 °C (120 °F). Luego

de la separación, el agua es enviada al pozo de quemado, los hidrocarburos líquidos son bombeados a los deshidratadores de líquidos y el gas pasa a través de un filtro separador y es enviado a los deshidratadores de gas.

1.3.3 DESHIDRATACIÓN.

Existen dos equipos de deshidratación para los gases y dos para los líquidos. La deshidratación de gas y líquido se basan en el mismo principio, mientras el un equipo esta deshidratando el gas o liquido de entrada el otro se regenera (ver Figura 1.4).

Cada deshidratador tiene un tamiz, el cual retiene el agua contenida en las corrientes de entrada. La regeneración del tamiz se efectúa haciendo circular gas seco del sistema residual a través del deshidratador en sentido contrario al seguido para el secado, la temperatura del gas de regeneración es controlada por un calentador y la eleva a 260 °C (500 °F). Una vez que el deshidratador es secado se debe esperar un tiempo para que puede entrar en funcionamiento nuevamente, esto es gobernado por un contador de tiempo.

El agua extraída del deshidratador es arrastrada por el gas de regeneración caliente y enviada a un enfriador que hace que la temperatura de la corriente de gas de regeneración disminuya a 49 °C (120 °F), temperatura a la cual el agua se condensa y es separada; el gas de regeneración es devuelto a la corriente de gas residual.

Se ha fijado un ciclo de seis horas como periodo de deshidratación para el gas de entrada, que es el tiempo en que se hace la regeneración de los tamices. El gas deshidratado antes de entrar en los intercambiadores pasa por un filtro de polvo para eliminar cualquier partícula procedente de los tamices.

Se ha fijado un ciclo de 24 horas como periodo de deshidratación para los líquidos de entrada.

Un calentador de gas natural tipo baño de sal proporciona el calor necesario a las dos corrientes de gas de regeneración.

La deshidratación del gas y líquidos de entrada se realizan a una presión de 38,6 Kg./cm² (550 psig), y la regeneración a 29,5 Kg./cm² (420 psig). El gas de regeneración debe estar lo mas seco posible y contener la menor cantidad de hidrocarburos pesados, por esta razón el gas de regeneración se toma de la corriente de gas residual.

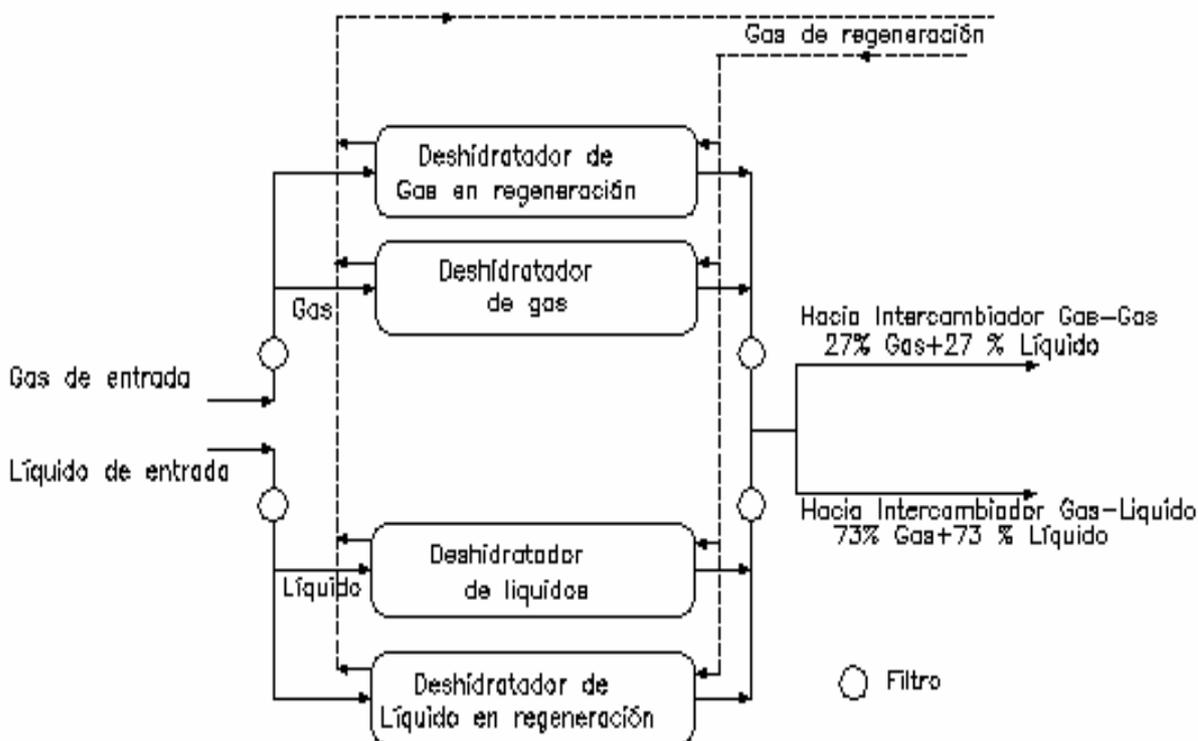


FIGURA 1.4 Deshidratación de líquidos y gases de entrada.

1.3.4 REFRIGERACIÓN DE GAS Y LÍQUIDOS DE ENTRADA SECOS

Luego de la deshidratación, los gases y los líquidos de entrada se combinan y dividen en dos corrientes para ser enfriadas. Aproximadamente el 27 % de la corriente de gas entrante, o sea 191.160 Nm³/d (6.750 MSCF/D), y el 27 % de la corriente de líquidos, o sea 51,5 l/min. (13,6 gpm), se unen y fluyen a través del intercambiador gas-gas. La temperatura de la corriente de gas líquido descende de 49 °C (120 °F) a -30 °C (-22 °F), mientras que la temperatura de gas residual de la planta pasa de -38 °C (-37 °F) a 38 °C (100 °F). Alrededor del 73 % de la corriente de gas entrante o sea 516 840 Nm³/d (18 250 MSCF/D), el 73 % de la corriente de líquidos o sea 139,5 l/min. (36,9 gpm) se unen y pasan a través del

intercambiador gas-liquido. La temperatura de la corriente desciende de 49 °C (120 °C) a -30 °C (-22 °F) mientras que la temperatura del líquido que alimenta al desetanizador aumenta de -40 °C (-40 °F) a 38 °C (100 °F). Por tanto el intercambiador gas-liquido actúa como precalentador de la alimentación del desetanizador.

Las dos corrientes gas-liquido se combinan y pasan a través del enfriador de gas de entrada. La temperatura de la corriente gas-liquido desciende de -30 °C (-22 °F) a -40 °C (-40 °F) por la refrigeración con propano en el enfriador de gas.

Seguidamente la corriente gas-liquido circula a través del separador frío, donde se separan gases y líquidos. El separador ha sido diseñado para trabajar a 37,6 Kg./cm² (535 psig) de presión y -40 °C (-40 °F) de temperatura. La corriente de gas correspondiente a la parte alta del separador frío, con un caudal de 257 967 Nm³/d (9.109 MSCF/D), y peso molecular de 22,30 y el gas perteneciente a la parte alta del acumulador de reflujo del desetanizador, con un caudal de 252 529 Nm³/d (8 917 MSCF/D) y peso molecular de 25,86, se juntan y entran al intercambiador gas-gas para efectuar el intercambio calorífico con la corriente gas-liquido. La corriente combinada de gases, pertenecientes al separador frío y al acumulador de reflujo del desetanizador, forma la corriente de gas residual de la planta. La temperatura de gas residual pasa de -38 °C (-37 °F) a 38 °C (100 °F) en el intercambiador de gas-gas.

La corriente de gas residual proporciona a la planta un caudal de gas combustible de 37 297 Nm³/d (1 317 MSCF/D) con peso molecular de 24,12.

Parte del gas residual pasa a través de los deshidratadores de gas y liquido como gas de regeneración y luego es enviado fuera de la planta a las estaciones central y sur.

1.3.5 DESTILACIÓN FRACCIONADA.

El líquido proveniente del separador frío pasa a presión a través del intercambiador gas-liquido y entra al desetanizador con un caudal de 1.000 l/min. (265,7 gpm) con un peso específico de 0,5018, la temperatura del liquido se

incrementa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{F}$) a $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($100\text{ }^{\circ}\text{F}$) a su paso por el intercambiador de calor.

Los gases de cabeza del desetanizador a una presión de 32 Kg./cm^2 (455 psig) y una temperatura de $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-2\text{ }^{\circ}\text{F}$), son condensados parcialmente mediante refrigeración con propano en el condensador del desetanizador y enviados al acumulador de reflujo del desetanizador. Los gases del acumulador de reflujo van al sistema de gas residual y el líquido es bombeado como reflujo nuevamente al desetanizador con un caudal de $592,4\text{ l/min.}$ ($156,5\text{ gpm}$) y un peso específico de $0,427$. La corriente de líquidos de la parte baja del desetanizador es extraída y enviada al rehervidor y luego enviada debutanizador.

Los gases de cabeza del debutanizador son totalmente condensados en un intercambiador de aire frío y enviados al acumulador de reflujo. Una parte del líquido del acumulador es devuelto al debutanizador como reflujo y el resto es bombeado por un regulador de presión al almacenaje de GLP, a través del enfriador de aire de producto. El caudal de diseño para el producto propano-butano es de 445 l/min. ($117,6\text{ gpm}$) con un peso específico de $0,532$.

Las colas del debutanizador son enviadas al rehervidor, y luego pasan a través de un enfriador y van al depósito de gasolina natural. Su valor de diseño es 116 l/min. ($30,61\text{ gpm}$) con un peso específico de $0,648$. Las condiciones de diseño para la base del debutanizador son: presión de 14 Kg./cm^2 (200 psig) y temperatura de $149\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($301\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Los rehervidores del desetanizador y del debutanizador son calentados por un sistema de aceite caliente. Es un circuito cerrado que consta de bombas, un calentador de gas natural y un tanque de expansión.

1.4 INTERCAMBIADOR DE CALOR GAS-LIQUIDO.

En la planta de gas del Complejo Industrial Shushufindi desde que la planta empezó a funcionar en el año de 1984, han existido tres intercambiadores, dos de los cuales han sido reemplazados por cumplir el tiempo de funcionamiento, el otro

fue sustituido al poco tiempo de funcionamiento debido a una rotura en el capa protectora.

El intercambiador de calor gas-liquido es del tipo compacto, estos intercambiadores tiene una gran área de transferencia por unidad de volumen, consta de una serie de pasajes del tipo placas con aletas, por los que circulan en contraflujo la corriente de gas mas liquido y gas condensado proveniente del separador frío a altas presiones, es por esto que intercambiador debe regirse a los códigos de recipientes a presión.

Las propiedades de los flujos que actúan en el intercambiador de calor se describen en la Tabla 1.1.

TABLA 1.1 Propiedades de los fluidos.⁽⁵⁾

	Flujo A	Flujo B
Fluidos	Gas natural	GLP
Fluido total	64955 lb./h	66553 lb./h
Vapor	54521 lb./h	
Líquido	10434 lb./h	66553 lb./h
Fluido vaporizado condensado	33570 lb./h	31746 lb./h
Gravedad específica	0,507	0,501
Capacidad calorífica	0,372 Btu/lb.°F	0,330 Btu/lb.° F
Temperatura de entrada	49 °C	-40 °C
Temperatura de salida	-30 °C	38 °C
Presión de operación.	550 psi	535 psi

CAPITULO 2.

MATERIALES Y DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

2.1 MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Debido a las condiciones de operación del intercambiador de calor, expuestas en el capítulo anterior, los materiales a emplearse en la construcción de este equipo deben tener ciertas características que deben ser: buenas propiedades mecánicas a bajas temperaturas, como excelente resistencia a la tensión, dureza, tenacidad y fatiga; buenas propiedades tecnológicas, como: maquinabilidad, soldabilidad, ductilidad, elasticidad; y, buenas propiedades físicas, como: conductividad térmica y poca dilatación.

Los metales y las aleaciones suelen dividirse en dos categorías: ferrosos y no ferrosos. Las aleaciones ferrosas están basadas en el hierro como constituyente principal, estas incluyen acero, acero inoxidable y diversas clases de hierro fundido. En las aleaciones no ferrosas intervienen materiales diferentes al hierro, como: aluminio, cobre, zinc, níquel, titanio, etc.

Los materiales que cumplen con los requerimientos expuestos anteriormente son los materiales no ferrosos, por sus buenas propiedades térmicas, por su alta resistencia a la corrosión, y, además, estos materiales no presentan temperatura de transición (dúctil a frágil) como el acero, así la tenacidad de los materiales citados es mejor a bajas temperaturas.

Los materiales empleados generalmente para construcción de intercambiadores de calor compacto son aleaciones en base de aluminio, estas aleaciones son recomendadas de acuerdo a la partes que forman el intercambiador según la norma ALPEMA⁽²⁾ que se describen en la siguiente Tabla 2.1

TABLA 2.1 Materiales empleados en la fabricación de intercambiadores de calor compactos ⁽²⁾

Componente	Especificación/Aleación
Aletas	SB-209 3003 3004
Aletas del distribuidor	SB-209 3003 3004
Barras laterales	SB-221 3003
Placas separadoras	SB-209 3003
Placas protectoras	SB-209 3003
Cabezales	SB-209, 241 3003 5052 5083 5454 6061
Boquillas	SB-209, 241 3003 5052 5083 5086 5454 6061 6063
Bridas	SB-247 5083 6061
Soportes	SB-209 5052 5083 6061 6063

Debido a que la norma ALPEMA⁽²⁾ recomienda únicamente aleaciones de aluminio para este tipo de intercambiadores, a continuación se hará una descripción de este material no ferroso, de sus aleaciones, de la clasificación de las aleaciones, así también como de las especificaciones, designación,

composiciones químicas, propiedades mecánicas y temple de las aleaciones recomendadas.

2.1.1 ALUMINIO.

El aluminio es un metal ligero, blando pero resistente, de aspecto gris plateado. Su densidad es de $2,70 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente un tercio de la del acero. Es muy maleable y dúctil y es apto para el mecanizado y la fundición. En este material se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad. ⁽⁶⁾

2.1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO

El aluminio puro es blando y frágil, pero sus aleaciones con pequeñas cantidades de cobre, manganeso, silicio, magnesio y otros elementos, que dependiendo de la proporción de estos aleantes, la aleación puede ser hasta treinta veces más resistentes que el aluminio puro, además, su relación resistencia-peso es excelente. ⁽⁶⁾

2.1.2.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio pueden subdividirse en dos grupos de acuerdo con el método de fabricación que son aleaciones para forja y aleaciones para fundición. Las aleaciones para forja, que se forman mediante deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras muy diferentes de las aleaciones para fundición, lo cual refleja las diferentes condiciones del proceso de manufactura, dentro de cada grupo principal las aleaciones se dividen en dos subgrupos: aleaciones tratadas térmicamente y aleaciones no tratadas térmicamente. Las primeras son endurecidas por envejecimiento, mientras que las segundas se endurecen por deformación, solución sólida o por dispersión.

Las aleaciones de aluminio se designan mediante el sistema de enumeración de la Tabla 2.2. El primer número especifica los principales elementos de aleación y los números restantes se refieren a la composición específica de la aleación.

TABLA 2.2 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio.⁽⁶⁾

Aleaciones para forja
Designación
1xxx Alum comercialmente puro (> 99 % AL)
2xxx Al-Cu
3xxx Al-Mo
4xxx Al-Si y Al-Mg-Si
5xxx Al-Mg
6xxx Al-Mg-Si
7xxx Al-Mg-Zn
Aleaciones fundidas
Designación
1xx.x Alum comercialmente puro
2xx.x Al-Cu
3xx.x Al-Si-Cu o Al-Mg-Si
4xx.x Al-Si
5xx.x Al-Mg
7xx.x Al-Mg-Zn
8xx.x Al-Sn

2.1.2.2 Designación de temple de las aleaciones de aluminio.⁽⁷⁾

Esta designación se utiliza para aleaciones de aluminio forjadas y fundidas, esta sigue a la aleación y se halla separada de esta por un guión. El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico, excepto para los temples en condición de recocido y aquellos en condición de fabricado sin tratamiento térmico se definen más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Los temples básicos son: F, condición de fabricado; H, endurecido por deformación; O, recocido; T, tratado térmicamente; W, tratados térmicamente en solución.

-F: Condición de Fabricado.- Aplicado a productos que adquieren algún temple como resultado de las operaciones de manufactura. No hay garantía de propiedades mecánicas.

-H: Endurecido por deformación.- Se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas mediante trabajado en frío solamente. El temple -H es seguida por dos o más dígitos. El primero indica la combinación específica de las operaciones básicas que son:

-H1: Endurecido por deformación solamente. El segundo dígito designa la cantidad de trabajo frío realizado, cuyo número 8 representa la condición de dureza total, una dureza media es -H14, una dureza de un cuarto es -H12, etc.

Los temple extraduros se designan con el 9. Un tercer dígito se emplea a menudo para indicar el grado de control del temple o para identificar un conjunto de propiedades mecánicas específicas.

-H2: Endurecido por deformación y luego recocido parcialmente. Se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro, la resistencia deseada se obtiene mediante recocido parcial. La cantidad residual de trabajo en frío se designa mediante el mismo método que los de la serie -H1.

-H3: Endurecido por deformación y luego estabilizado. Empleado en aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades. Uno o más dígitos indica el grado de endurecimiento por deformación remanente después del tratamiento de estabilización.

-O: Recocido, recristalizado.- Es el temple más suave de los productos de aleación forjados.

-T: Tratado Térmicamente. Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temple estables. El temple -T va de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas. Las variaciones deliberadas de las condiciones, que dan lugar a características significativamente distintas para el producto, se indican añadiendo uno o más dígitos a la designación básica:

-T2: Recocido (solo productos fundidos)

-T3: Tratados térmicamente a solución y luego trabajado en frío.

-T4: Tratados térmicamente a solución y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estables.

-T5: Solo envejecido artificial. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.

-T6: Tratados térmicamente y en solución luego envejecida artificialmente.

-T7: Tratados térmicamente y en solución luego estabilizada: se aplica a productos en que las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva mas allá del punto de dureza máximo, proporcionando control de crecimiento y o esfuerzos residuales.

-T8: Tratados térmicamente en solución trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.

-T9: tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.

-T10: Envejecida artificialmente y luego trabajado en frío, lo mismo que en -T5 pero seguida por trabajo en frío a fin de mejorar la resistencia.

-W: Tratados Térmicamente en Solución. Es un temple inestable que se aplica a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico en solución. Debido al envejecimiento natural, esta designación es específica solo cuando se indica el periodo de envejecimiento.

2.1.2.3 Descripción de las especificaciones de los aluminios y aleaciones de aluminio.

Las especificaciones de los aluminios y aleaciones de aluminio se describen en el código ASME, Sección II⁽⁸⁾, donde se indica los alcances, documentos de referencias, terminología, información necesaria sobre las propiedades del material, manufactura, responsabilidades para el control de calidad, composición química, propiedades mecánicas del material, tratamiento térmico, pruebas y ensayos, revestimientos, tolerancias; estos contenidos varían de acuerdo a cada una de las especificaciones, a continuación se da una breve descripción de las especificaciones a emplearse en el intercambiador.

2.1.2.3.1 SB-209: Especificación para placas y platos de Aluminio y aleaciones de Aluminio.

Esta especificación se indica los requerimientos mínimos que deben tener el aluminio y aleaciones de aluminio en la fabricación de láminas planas, láminas roladas y platos, en esta parte se detalla el control de calidad, composiciones químicas, propiedades mecánicas y temple.

Los documentos de referencia que se dan en esta especificación para la realización de pruebas en aluminio y aleaciones de aluminio son basados en los ensayos indicados en las normas ASTM y ANSI.

La composición química de las láminas y placas deben ser conforme a los límites mostrados en la Tabla N° 1 del Anexo N° 1. El fabricante ha de analizar el producto tomando muestras en el momento de la fundición de los lingotes, o tomara muestras de productos terminados o semi-terminados.

La determinación de la composición química debe ser hecha de acuerdo con un método espectroquímico conveniente (métodos de prueba ASTM E 101, E 227, E 607, E 1251) o químico (E 34)

Una de las propiedades mecánicas a ser utilizadas en el diseño es el esfuerzo de tensión, el mismo que se detalla en la Tabla N° 2 del Anexo N° 1.

2.1.2.3.2 SB-241: Especificación para tubería sin costura y tubos extruidos sin costura de Aluminio y aleaciones de Aluminio.

Esta especificación cubre las propiedades de tubería sin costura y tubos extruidos sin costura de Aluminio y aleaciones de Aluminio para aplicaciones a presiones.

En esta especificación se indican los documentos de referencia para la realización de ensayos del aluminio y sus aleaciones, estos ensayos son en base a las normas ASTM y ANSI.

La composición química y las propiedades mecánicas para las aleaciones que comprenden esta especificación están dadas en la Tabla N° 3 y Tabla N° 4 del Anexo N° 1 respectivamente.

2.1.2.3.3 SB-247: Especificación para forjar Aluminio y aleaciones de Aluminio.

Esta especificación cubre las aleaciones, temple, propiedades mecánicas de las aleaciones forjadas manualmente y con matrices. Al igual que las especificaciones anteriores las pruebas a los materiales se realizan en base a las normas ASTM y ANSI. La composición química y las propiedades mecánicas de las aleaciones de esta especificación se indican en las Tablas N° 5 y N° 6 de el Anexo N° 1.

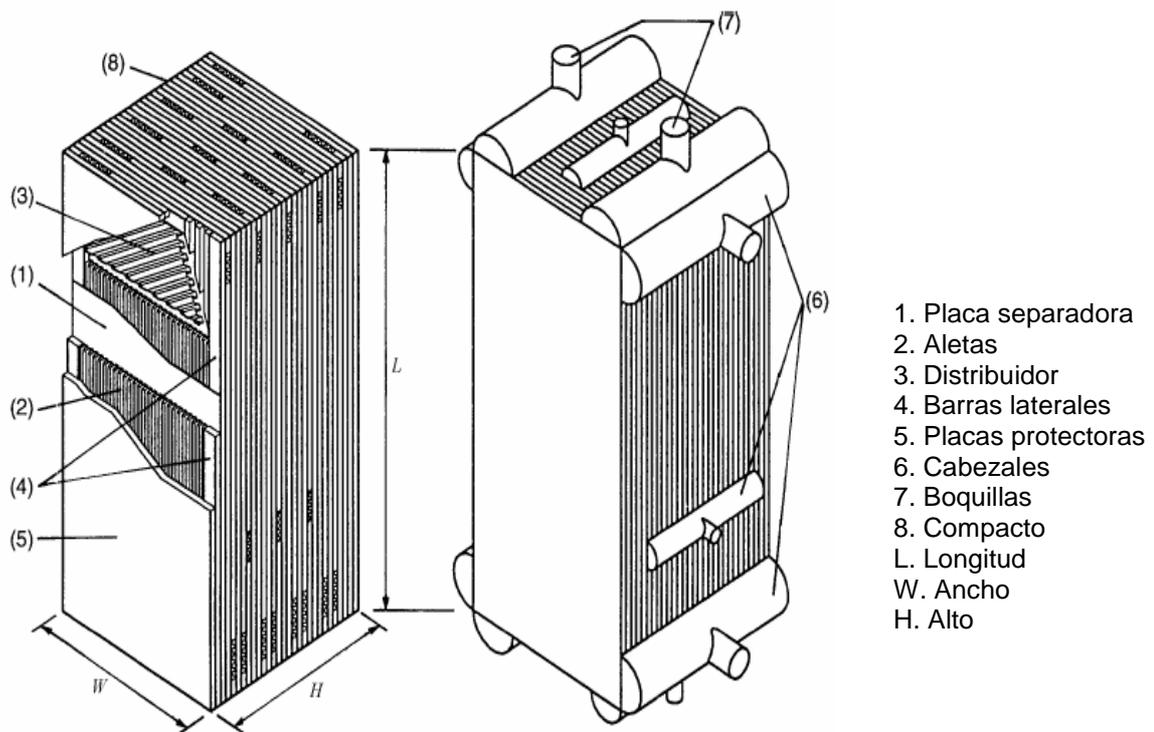


FIGURA 2.1 Esquema del intercambiador de calor compacto.⁽²⁾

2.2 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

2.2.1 INTRODUCCIÓN.

Un intercambiador de placas y aletas consiste de un bloque compacto de pasajes alternados de aletas corrugadas. Los pasajes son separados uno de otro por medio de placas que están sujetas en las partes laterales por medio de barras, los pasajes aleteados esta cubierto por placas protectoras. El ensamblaje del compacto y distribuidor del intercambiador es hecho con soldadura fuerte, los

cabezales y las boquillas que están a la entrada del distribuidor están unidos por soldadura de arco eléctrico. En la Figura 2.1 se indica un esquema del intercambiador con sus respectivas partes.

2.2.2 DISEÑO TÉRMICO Y CAÍDAS DE PRESIÓN

2.2.2.1 Diseño térmico

El diseño térmico del intercambiador es realizado con referencia a las normas ALPEMA ⁽²⁾; el diseño térmico de este tipo de intercambiadores se basa en dos conjuntos de arreglos de aletas que se encuentran unidos a ambos lados de una placa, este arreglo se denomina “arreglo simple” (ver Figura 2.2), por cada arreglo pasan alternadamente dos flujos. El procedimiento de cálculo y parámetros que intervienen en el análisis se detalla a continuación.

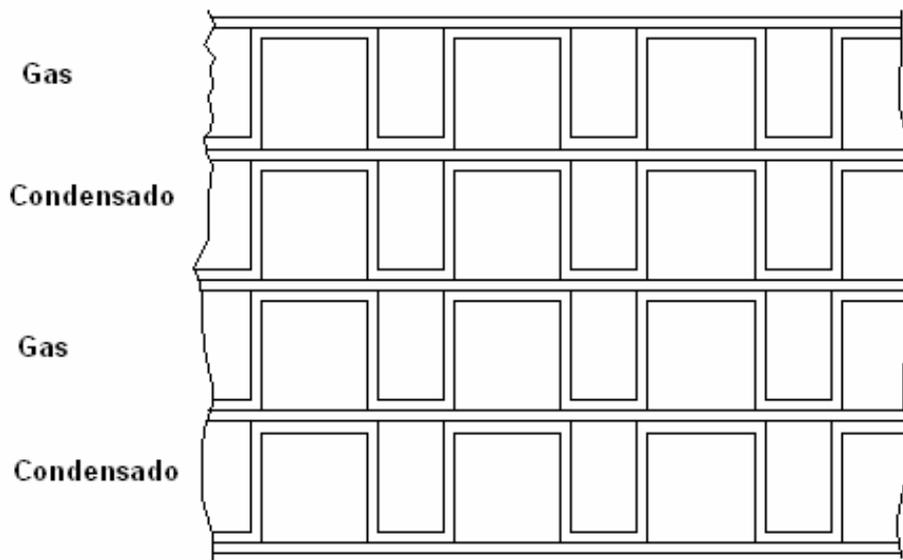


FIGURA 2.2 Arreglos de aletas simple.⁽²⁾

2.2.2.1.1 Parámetros de diseño térmico.

Para emprender el análisis termodinámico es necesario conocer las condiciones de operación del intercambiador y de los fluidos, estos parámetros intervienen directamente como variables en el estudio térmico y son:

2.2.2.1.2 *Propiedades físicas de los fluidos y materiales.*

Es importante conocer las propiedades físicas de los fluidos a las que están expuestas el momento del intercambio de calor, es decir, tener en cuenta sus propiedades a las presiones y temperaturas de funcionamiento, las propiedades físicas que intervienen son: la capacidad calorífica (C_p), viscosidad (μ), densidad (ρ) y la conductividad térmica (k) de los fluidos y materiales.

2.2.2.1.3 *Características dinámicas de los fluidos.*

Las características dinámicas a tener en cuenta son: caudal, flujo másico y velocidad.

2.2.2.1.4 *Dimensiones.*

También se debe considerar el espacio disponible dado por el cliente para colocar el aparato. La eficiencia del arreglo de aletas interviene directamente en el largo, ancho y altura del intercambiador.

2.2.2.1.5 *Procedimiento de cálculo.*

A continuación se describen los pasos que se deben seguir para el cálculo de la energía total transferida y el área mínima del arreglo de aletas requerida para transferir esa cantidad de calor entre los flujos.

2.2.2.1.6 *Cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de calor para cada flujo.*

El coeficiente de transferencia de calor para cada flujo puede ser estimado de acuerdo a la norma ALPEMA ⁽²⁾ con la ecuación 2.1.

$$h = \frac{jG_m C_p}{Pr^{2/3}} \quad (2.1)$$

El factor de Colburn es calculado de:

$$j = S_r P_r^{2/3} \quad (2.2)$$

El número de Stanton es obtenido de:

$$S_t = \frac{N_u}{P_r R_e} \quad (2.3)$$

El número de Prandtl puede ser obtenido de:

$$P_r = \frac{C_p \mu}{K_{gas}} \quad (2.4)$$

El número de Reynolds se calcula de:

$$R_e = \frac{G_m D_h}{N_{aletas}^o \mu} \quad (2.5)$$

El flujo másico es calculado a en base a la siguiente fórmula:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{ff}} = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{A_{ff}}{A_{fr}} \quad (2.7)$$

$$A_{fr} = W.H \quad (2.8)$$

$$A_{ff} = N_c I W \quad (2.9)$$

El calor específico es obtenido de la siguiente relación:

$$C_{pT} = Y_1 C_{p1} + Y_2 C_{p2} + Y_3 C_{p3} + Y_i C_{pi} \quad (2.10)$$

Donde:

Y: Es la fracción molar de los componentes del gas natural.

C_{pi}: Es la capacidad calorífica de cada uno de los elementos. (J/KgK)

h: Coeficiente de transferencia de calor. (W/m²K)

G_m: Flujo de masa (Kg/m²s)

j: Coeficiente de Colburn para un conducto entre aletas

N_c :	Número de canales	
L :	Altura de las aletas	(m)
K_{gas} :	Conductividad termica del gas	(W/mK)
\dot{m} :	Flujo másico de los flujos	(Kg/s)
μ :	Viscosidad dinamica	(Kg/m s)
C_{pT} :	Capacidad calorífica total	(J/KgK)
P_r :	Número de Prandtl	
S_t :	Número de Stanton	
R_e :	Número de Reynolds	
σ :	Relación entre el área de flujo libre para el área frontal	
A_{ff} :	Área de flujo libre.- Área transversal del intercambiador por donde circula cada fluido.	(m ²)
A_{fr} :	Área frontal.- Área total perpendicular al paso del flujo.	(m ²)

2.2.2.1.7 Coeficiente efectivo de transferencia de calor.

El coeficiente efectivo de transferencia de calor (h_0), es calculado con la siguiente relación:

$$\frac{1}{h_0} = \frac{1}{h} + r \quad (2.11)$$

Donde

r :	Factor de impureza	(m ² /W ^o K)
h :	Coeficiente de transferencia de calor	(W/m ² K)
h_0 :	Coeficiente efectivo de transferencia de calor	(W/m ² K)

2.2.2.1.8 Cálculo de la eficiencia de la aleta.

La eficiencia de aleta está dada por la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\tanh(m/2)}{m/2} \quad (2.12)$$

$$m = l * \left(\frac{2 * h_o}{K * t} \right) \quad (2.13)$$

Donde

- l: Altura de la aleta (m)
 K: Conductividad térmica del material de la aleta (W/mK)
 t: Espesor de la aleta (m)
 η: Eficiencia de la aleta

2.2.2.1.9 *Cálculo del área efectiva de transferencia para cada flujo.*

El área efectiva de transferencia puede ser estimada de la siguiente fórmula 2.14.

$$A = A_1 + \eta \phi A_2 \quad (2.14)$$

$$A_1 = (W - (N^{\circ}_{aletas} t))L \quad (2.15)$$

$$A_2 = N^{\circ}_{aletas} 2h / 2L \quad (2.16)$$

Donde:

- A: Área efectiva de transferencia. (m²)
 A₁: Área primaria de transferencia de calor. (m²)
 A₂: Área secundaria de transferencia de calor. (m²)
 W: Ancho del intercambiador (m)
 L: largo del intercambiador (m)
 h: Altura de la aleta (m)
 N^o_{aletas}: Número de aletas
 φ: Factor sin perforar (1-(porcentaje de perforación)/100)

2.2.2.1.10 *Superficie efectiva global de transferencia de calor.*

La superficie efectiva global de transferencia de calor puede ser calculada de:

$$\frac{1}{UA_d} = \frac{1}{\sum (h_o A)_w} + \frac{1}{\sum (h_o A)_c} \quad (2.17)$$

Donde:

- U: Coeficiente global de transferencia de calor entre flujos (W/m²K)
 A_d: Área estimada efectiva global de transferencia de calor (m²)

2.2.2.1.11 *Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica (MTD).*

Para el cálculo del MTD se emplea la siguiente relación:

$$MTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (2.18)$$

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

Donde:

- MTD: Diferencia de temperatura media logarítmica (°K)
 T_{h,i}: Temperatura de entrada del flujo caliente (°K)
 T_{h,o}: Temperatura de salida del flujo caliente (°K)
 T_{c,i}: Temperatura de entrada del flujo frío (°K)
 T_{c,o}: Temperatura de salida del flujo frío (°K)

2.2.2.1.12 *Cálculo del calor transferido*

El calor total transferido es estimado de:

$$Q = UA_d MTD \quad (2.19)$$

- U: Coeficiente global de transferencia de calor entre flujos (W/m²K)
 Q: Calor transferido (W)

2.2.2.1.13 *Estimación aproximada del volumen del compacto de transferencia de calor.*

Se puede obtener una cifra aproximada del volumen del compacto del intercambiador de calor de acuerdo con una fórmula dada en la norma ALPEMA⁽²⁾:

$$V = \frac{Q/MTD}{C} \quad (2.20)$$

Donde:

V:	Volumen requerido para el intercambiador de calor sin cabezales	(m ³)
Q:	Calor total transferido	(W)
MTD:	Diferencia de temperatura media logarítmica	(°K)
C:	Coeficiente: 100 000 Aplicación de hidrocarburos 50 000 aplicaciones de separación de aire.	(W/m ³ K)

2.2.2.2 Caídas de presión.

Se debe evaluar las caídas de presión debido a las diferentes secciones por donde circulan los fluidos y por la fricción que tienen con los elementos del intercambiador. Los puntos donde se debe analizar las pérdidas se indican en la figura 2.3 y son:

1. Pérdidas por expansión en la entrada del cabezal
2. Pérdidas por contracción en la entrada del distribuidor
3. Pérdidas de presión en el distribuidor de flujos de entrada
4. Pérdidas de presión en el área de transferencia
5. Pérdidas de presión en el distribuidor de flujos de salida
6. Pérdidas por expansión en el cabezal de salida
7. Pérdidas por contracción en la boquilla de salida.

Los fabricantes pueden hacer uso las experiencias para seleccionar el método mas apropiado para estimar las pérdidas de presión en los puntos citados anteriormente.

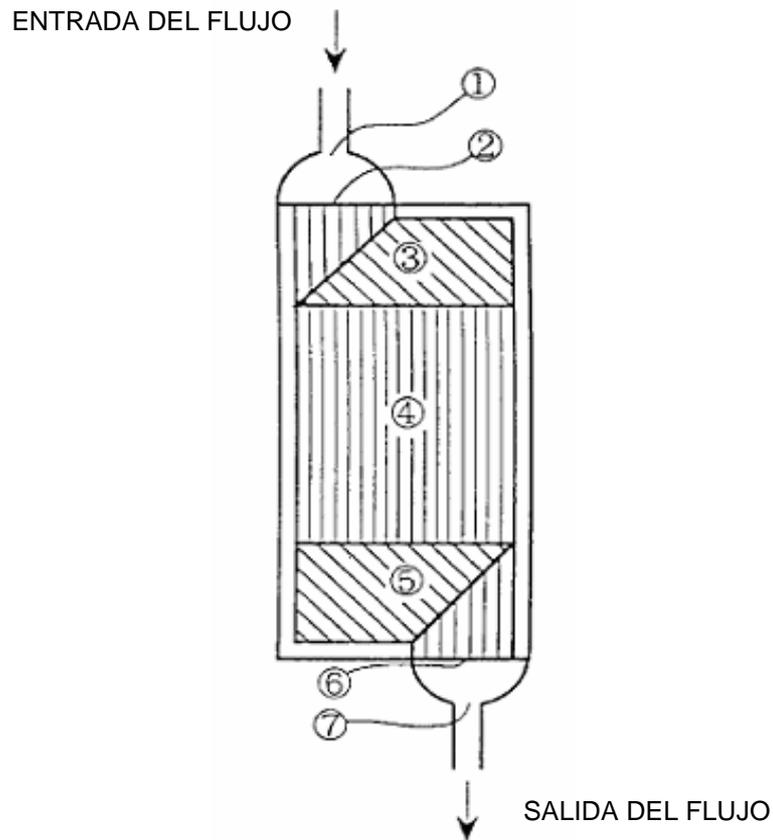


FIGURA 2.3 Puntos de pérdidas de presión.

Las pérdidas en los cabezales de entrada y salida, así como en las boquillas están dominadas por la ecuación de Bernoulli (ecuación 2.21). En esta parte se empleara el principio de conservación de mas que se indica en la ecuación 2.22

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_r = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.21)$$

$$P_1 A_1 V_1 = P_2 A_2 V_2 \quad (2.22)$$

Las pérdidas de presiones por fricción en los pasajes aleteados y pérdidas por cambio de dirección se basan en la siguiente ecuación.

$$\Delta P = 4f \left(\frac{l_p}{d_h} \right) \left(\frac{G_m^2}{2\rho} \right) + K \left(\frac{G_m^2}{2\rho} \right) \quad (2.23)$$

Donde:

f:	Factor de fricción	
l_p :	Longitud del pasaje	(m)
d_h :	Diámetro hidráulico de un canal	(m)
G_m :	Flujo másico	(Kg/m ² s)
ρ :	Densidad del fluido	(Kg./m ³)
ΔP :	Perdida totales de presión	(Pa)
H_r :	Perdidas por rozamiento	

2.2.3 DISEÑO MECÁNICO.

Los intercambiadores de placas y aletas son considerados como recipientes a presión, los cuales están normalizados según el código ASME, Sección VIII⁽¹⁾. El diseño mecánico de este intercambiador se basa en el análisis estructural de los siguientes componentes:

- La estructura formada por las aletas y placas separadoras.
- La estructura formada por el compacto y la capa exterior protectora.
- Cabezales, boquillas y bridas.
- Placa base y pedestal.
- Soldaduras

2.2.3.1 Análisis de la estructura formada por las aletas y placas separadoras.

Las aletas tienen una doble función, aparte de ayudar a la transferencia de calor entre los flujos, es la de soportar las cargas de presión como elementos estructurales sometidos a cargas de tensión. Las placas de separación de los flujos, deben soportar las fuerzas longitudinales y transversales producidas por la presión del fluido.

El arreglo de aletas que están entre las dos placas, se considera como un recipiente rectangular con más de tres elementos rígidos internos, cuando un recipiente a presión consiste de varias cámaras independientes operando a las mismas o diferentes presiones y temperaturas, cada conducto debe ser diseñado

para soportar las condiciones de operación y cada uno se considerara que esta sometido a presiones externas.

En el apéndice 13, "Vessels of noncircular cross section", del código ASME, sección VIII⁽¹⁾, se especifica las reglas y procedimiento de cálculo de recipientes cuadrangulares bajo estas condiciones, en el diseño de recipientes de sección no circular especifica que el diseño se basa en los esfuerzos de membrana y doblado, y estos no deben exceder el esfuerzo de fluencia del material.

2.2.3.1.1 Procedimiento de cálculo.

Los pasos para el cálculo del espesor de aletas, placas separadoras y barras laterales de acuerdo al código ASME, sección VIII⁽¹⁾, son detallados a continuación.

2.2.3.1.2 Cálculo del espesor de placas separadoras, barras laterales y aletas

Para el cálculo de estas dimensiones se considera el compacto como un recipiente con más de dos compartimentos(ver figura 2.4), para este caso, en el apéndice 13 del código ASME, sección VIII⁽¹⁾, considera que para este tipo de análisis debe tomarse en cuenta las fórmulas dadas para el caso en que se tiene tres compartimentos.

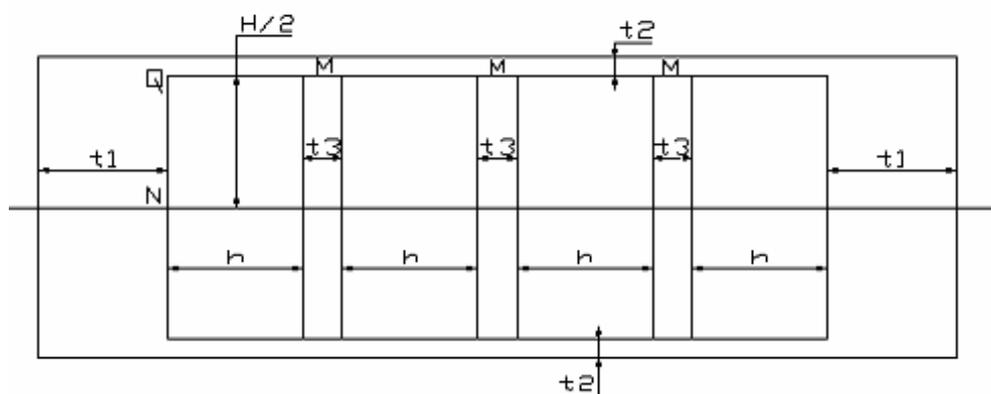


FIGURA 2.4 Esquema de pasaje aleteado.

Los puntos en donde se analizara los esfuerzos en los pasajes aleteados son la unión entre aletas y barras separadoras (punto M), unión entre barras laterales y placas separadoras (punto Q), y el esfuerzo producido en el centro de las barras

laterales (punto N). Las fórmulas empleadas para este cálculo se indican a continuación.

2.2.3.1.3 Cálculo del esfuerzo de membrana.

a) Esfuerzo en las barras laterales.

$$S_m = \frac{Ph}{2t_1} \left[3 - \left(\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right) \right] \quad (2.24)$$

b) Esfuerzo en las placas separadoras.

$$S_m = \frac{PH}{2t_2} \quad (2.25)$$

c) Esfuerzo en las aletas.

$$S_m = \frac{Ph}{2t_3} \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (2.26)$$

Esfuerzo de doblado

a) Esfuerzo en las barras laterales.

$$(S_b)_N = \frac{Pc}{24I_1} \left[-3H^2 + 2h^2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right] \quad (2.27)$$

$$(S_b)_Q = \frac{Ph^2 c}{12I_1} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right] \quad (2.28)$$

b) Esfuerzo en las placas separadoras.

$$(S_b)_M = \frac{Ph^2 c}{12I_2} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (2.29)$$

$$(S_b)_Q = \frac{Ph^2 c}{12I_2} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right] \quad (2.30)$$

2.2.3.1.4 Cálculo de los esfuerzos totales.

a) Esfuerzo en las barras laterales.

$$(S_T)_N = \frac{Ph}{2t_1} \left[3 - \left(\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right) \right] + \frac{Pc}{24I_1} \left[-3H^2 + 2h^2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right] \quad (2.31)$$

$$(S_T)_Q = \frac{Ph}{2t_1} \left[3 - \left(\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right) \right] + \frac{Ph^2 c}{12I_1} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right] \quad (2.32)$$

b) Esfuerzo en las placas separadoras.

$$(S_T)_M = \frac{PH}{2t_2} + \frac{Ph^2 c}{12I_2} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (2.33)$$

$$(S_T)_Q = \frac{PH}{2t_2} + \frac{Ph^2 c}{12I_2} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right] \quad (2.34)$$

c) Esfuerzo en las aletas.

$$(S_T)_M = \frac{Ph}{2t_3} \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (2.35)$$

2.2.3.1.5 Esfuerzos máximos.

Los esfuerzos totales calculados anteriormente para este tipo de arreglos no debe exceder el siguiente límite:

$$S_{adm} = 1,5.S.E \quad (2.36)$$

Donde:

P:	Presión interna de diseño	(Psi)
h:	Distancia entre aletas	(pulg)
H:	Alto de aletas	(pulg)
t ₁ :	Espesor de las barras laterales	(pulg)
t ₂ :	Espesor de las placas separadoras.	(pulg)
t ₃ :	Espesor de las aletas	(pulg)

K:	Parámetro del recipiente $(I_2/ I_1)\alpha$	(-)
α :	Parámetro del recipiente rectangular (H/h)	(-)
I_1 :	Momento de inercia del elemento de espesor t_1	(pulg ⁴)
I_2 :	Momento de inercia del elemento de espesor t_2	(pulg ⁴)
c:	Distancia desde el eje central al extremo del elemento	(pulg)
S_{adm} :	Esfuerzo admisible del material	(Psi)
S:	Esfuerzo máximo de tensión	(Psi)
E:	Eficiencia de soldadura	

2.2.3.2 Análisis de la estructura formada por el conjunto aleteado y la capa de protección.

Debido a que los espesores de las placas separadoras son pequeños es necesario protegerlas de golpes, polvo y medio ambiente colocando placas exteriores a los pasajes aleteados. Además, estas capas son empleadas como soporte de soldadura de los cabezales.

Existe un espacio entre el compacto y esta placa exterior por el cual no circula ningún fluido, el compacto y la placa exterior están unidos por pequeños miembros estructurales (ver Figura 2.5). El análisis que se hace para esta estructura es de igual forma que el estudio realizado anteriormente para la de aletas y placas separadoras.

Una consideración para este diseño puede ser el asumir que ingrese presión al área de nervios debido a fisuras en el compacto y puede tomarse la presión de diseño para este cálculo.

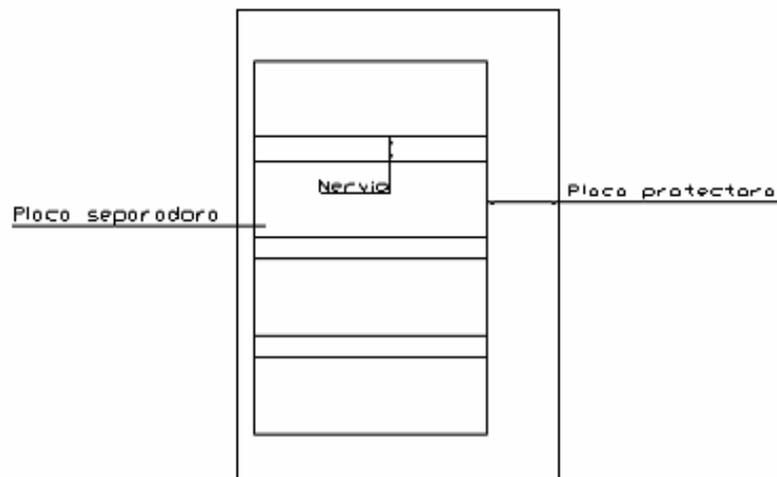


FIGURA 2.5 Esquema de pasaje aleteado y capa de protectora

2.2.3.3 Cabezales, boquillas y bridas.

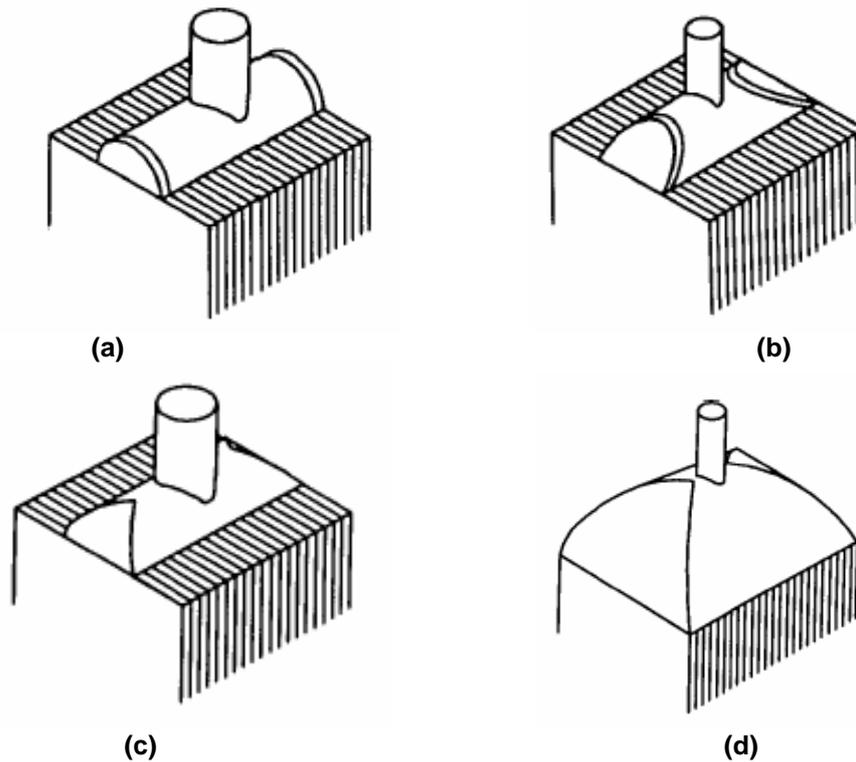
En esta sección se dará las pautas para el diseño de los cabezales y la selección adecuada de las boquillas y bridas que se emplean en el intercambiador de acuerdo a las normas establecidas para este tipo de accesorios.⁽²⁾

2.2.3.3.1 Cabezales.

Los cabezales tienen la forma de domos o cilindros cortados longitudinalmente por la mitad que tienen tapas soldadas en los extremos. Estos son hechos de tubería o formados por rolado de placas. Los tipos de cabezales para esta clase de intercambiadores se indican en la Figura 2.6

En este documento se empleará el cabezal del tipo semicilíndrico con terminaciones planas, y son fabricadas en base al código ASME, sección VIII⁽¹⁾.

Se pueden hacer dos consideraciones para el diseño del espesor de los cabezales y son:



- (a) Cabezales semicilíndricos con terminaciones planas
 (b) Semicilíndricos con terminaciones inclinadas;
 (c) Semicilíndricos con terminaciones curvas
 (d) Domo con terminaciones curvas.

FIGURA 2.6 Tipos de cabezales.⁽²⁾

Se pueden hacer dos consideraciones para el diseño del espesor de los cabezales y son:

La primera es considerar la mitad de una tubería como chaqueta (Figura 2.7) esto es en base al Nonmandatory Appendices EE del código ASME, sección VIII⁽¹⁾. En la que se recomienda utilizar la siguiente relación:

$$t = \frac{P_1 r}{0.85S_1 - 0.6P_1} \quad (2.37)$$

Donde:

- t: Mínimo espesor de la mitad de la tubería (pulg)
 r: Radio interior. (pulg)
 S₁: Esfuerzo de tensión permitido del material de la chaqueta. (Psi)
 P₁: Presión de diseño de la chaqueta (Psi)

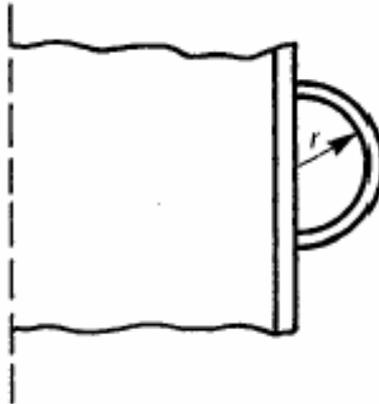


FIGURA 2.7 Esquema de una chaqueta.⁽¹⁾

Y la segunda forma para calcular el espesor de los cabezales es considerar el cabezal como un recipiente cilíndrico que soporte la presión de funcionamiento del aparato y luego dividirla longitudinalmente por la mitad. Esta consideración se hace en base a que únicamente el cabezal conduce el fluido que viene de la línea principal hacia el distribuidor.

Para calcular el espesor de pared mediante esta consideración se utiliza la siguiente relación:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (2.38)$$

Donde:

t:	Espesor de pared	(pulg)
P:	Presión de diseño	(Psi)
R:	Radio exterior de la boquilla o tubo menos el espesor de pared	(pulg)
S:	Esfuerzo de tensión del material	(Psi)
E:	Eficiencia de la junta	(-)

2.2.3.3.2 Boquillas.

Las boquillas son seleccionadas de tuberías estandarizadas de aluminio sin costura o pueden ser fabricadas por rolado de placas, estas están unidas a los

cabezales y las bridas en sus extremos, estas enlazan el distribuidor y la tubería de flujo principal.

Para el diseño o selección de las boquillas se debe hacer el análisis de acuerdo al código ASME, sección VIII⁽¹⁾, subsección A (UG-27) en la que se considera el tubo como si fuese un recipiente de presión, el espesor de pared de la boquilla se obtienen de la ecuación 2.38

En el acople entre la boquilla y el cabezal se deben analizar los momentos y fuerzas máximas que están actuando (ver Figura 2.8), estos momentos y fuerzas no deben sobrepasar las establecidas por las normas. Los pasos para calcular las fuerzas y momentos resultantes máximos se describen a continuación.

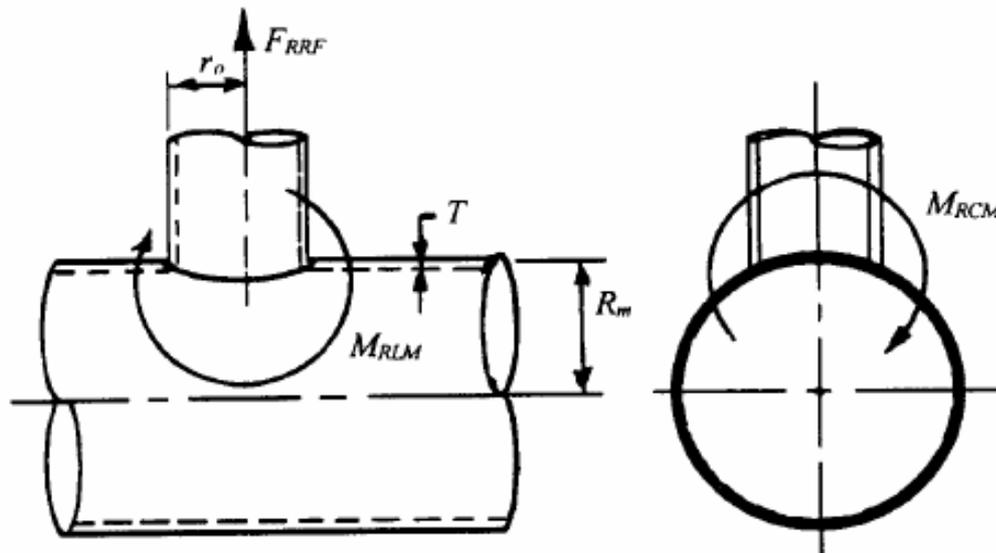


FIGURA 2.8 Fuerzas y momentos resultantes en una boquilla

2.2.3.3.3 Cálculo de los factores β y γ

$$\beta = 0.875 \left(\frac{r_0}{R_m} \right) \quad (2.39)$$

$$\gamma = \left(\frac{R_m}{T} \right) \quad (2.40)$$

2.2.3.3.4 Cálculo del esfuerzo de presión (σ)

$$\sigma = \left(\frac{2P}{T} \right) \left(R_m - \frac{T}{2} \right) \quad (2.41)$$

2.2.3.3.5 Cálculo del momento y fuerza resultante.

$$F_{RRF} = \left(\frac{R_m^2}{\alpha} \right) (S_y - \sigma) \quad (2.42)$$

$$M_{RCM} = \frac{R_m^2 r_o S_y}{\Sigma} \quad (2.43)$$

$$M_{RLM} = \frac{R_m^2 r_o}{\Delta} (S_y - \sigma) \quad (2.44)$$

El valor de F_{RRF} es F_{RF} y el menor momento entre M_{RCM} y M_{RLM} es M_{RM} .

Donde:

P:	Presión de diseño	(Psi)
r_o :	Radio exterior de la boquilla	(pulg)
R_m :	Radio exterior del cabezal.	(pulg)
T:	Espesor de pared del cabezal	(pulg)
S_y :	Esfuerzo de fluencia a la temperatura de diseño.	(Psi)
σ :	Tensión debido a la presión de diseño	(Psi)
S_o :	Esfuerzo de tensión del material del cabezal	(Psi)
α :	Factor adimensional	(-)
β :	Factor adimensional	(-)
γ :	Factor adimensional	(-)
Σ :	Factor adimensional	(-)
Δ :	Factor adimensional	(-)
F_{RRF} :	Fuerza radial máxima resultante	(Lb)
F_{RF} :	Fuerza máxima resultante	(Lb)
M_{RCM} :	Momento circunferencial máximo resultante	(Lb*pulg)
M_{RLM} :	Momento longitudinal máximo resultante	(Lb*pulg)

M_{RM} : Momento máximo resultante

(Lb*pulg)

Algunos valores de fuerza y momentos resultantes máximos de referencia pueden observarse en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3 Valores de momentos y fuerzas permitidas para una unión boquilla-cabezal.⁽²⁾

Boquillas (pulg.)	Boquillas (mm.)	Momento Resultante (N.m)	Fuerza Resultante (N)
2	50,8	60	405
3	76,2	165	750
4	101,6	330	1330
6	152,4	765	1800
8	203,2	1080	2770
10	254	1350	3370
12	304,8	1650	4500
14	355,6	1950	5400
16	406,4	2320	6450
18	457,2	2700	7500
20	508	3000	8250
24	609,6	3600	10300

2.2.3.3.6 Bridas.

Las bridas son los accesorios que unen las tuberías principales con las boquillas del intercambiador, estos accesorios para los recipientes a presión son seleccionados de acuerdo a normas establecidas⁽¹⁷⁾ en las que se especifica la geometría y dimensiones adecuadas de acuerdo al material y a las condiciones de trabajo a las presiones a las que están expuestas.

Las bridas que se emplearan en este tipo de intercambiador son fabricadas de aluminio de cuello soldable con caras planas (raised faces) con el fin de minimizar el número de soldaduras a la vez que se contribuye a disminuir la corrosión en la junta.

En la norma ASME B16-5, no está considerado el aluminio y sus aleaciones en el grupo de materiales, por esta razón es necesario hacer el dimensionamiento de las bridas. En el cálculo de la brida del tipo cuello soldable (welding neck), el único esfuerzo actuante sobre la brida es el esfuerzo tangencial, este esfuerzo debe ser menor o igual al máximo esfuerzo admisible del material de la brida.

$$S_T = \frac{YM_0}{t^2 B} \leq Sf \quad (2.45)$$

De la fórmula anterior se puede despejar t y determinar el mínimo espesor requerido para la brida.

$$t = \sqrt{\frac{YM_0}{S_T B}} \quad (2.46)$$

De donde:

$$Y = \frac{1}{K-1} \left(0,66845 + 5,71690 \frac{K^2 \log K}{K^2 - 1} \right) \quad (2.47)$$

$$K = \frac{A}{B} \quad (2.48)$$

$$M_0 = W \frac{(C - G)}{2} \quad (2.49)$$

$$W = \frac{(A_m + A_b) S_a}{2} \quad (2.50)$$

$$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_b} \quad (2.51)$$

$$W_{m1} = H + H_p \quad (2.52)$$

$$H = 0,785 G^2 P \quad (2.53)$$

$$H_p = 2 * b * 3,14 * G * m * P \quad (2.54)$$

$$A_{m2} = \frac{W_{m2}}{S_a} \quad (2.55)$$

$$W_{m2} = 3,14 * b * G * y \quad (2.56)$$

$$G = B + b \quad (2.57)$$

$$b = 0.5\sqrt{b_0} \quad (2.58)$$

$$b_0 = \frac{N}{2} \quad (2.59)$$

$$N = \frac{C - B - d_p}{2} \quad (2.60)$$

Para el valor de A_m se toma del mayor valor entre A_{m1} y A_{m2} .

$$A_b = \frac{A_m}{N^{\circ}_{\text{pernos}}} \quad (2.61)$$

Donde:

A:	Diámetro exterior de la brida.	(Pulg.)
B:	Diámetro interior de la brida.	(Pulg.)
W:	Carga del diseño del perno	(lb)
A_m :	Area total requerida de pernos.	(Pulg ²)
A_b :	Área del Perno	(Pulg ²)
S_a :	Esfuerzo permisible del perno	(Psi)
m:	Factor de empaque.	
H:	Fuerza hidrostática final	(lb)
G:	Diámetro nominal el empaque	(pulg)
P:	Presión de diseño	(Psi)
y:	Esfuerzo de tensión del empaque.	(Psi)
S_b :	Esfuerzo de tensión del perno a temperatura de diseño	(Psi)
S_a :	Esfuerzo de tensión del perno a temperatura ambiente	(Psi)
A_b :	Área de un perno.	(Pulg ²)
C:	Distancia entre pernos en la brida.	(Pulg)
d_p :	Diámetro nominal del perno	(pulg.)
N:	Ancho de contacto del empaque.	(pulg.)
S_T :	Esfuerzo máximo permisible del material de la brida	(Psi)
K:	Cociente entre el diámetro exterior e interior de la brida	
M_0 :	Momento total que actúa sobre la brida.	(lb*pulg)

W_{m1} :	Carga mínima requerida en el perno para las condiciones de operación.	(lb)
W_{m2} :	Carga mínima requerida en el perno para el asiento del empaque.	(lb)
H_p :	Carga total de compresión sobre la superficie de la junta.	(lb)
b :	Ancho efectivo del empaque	(pulg)
b_0 :	Ancho básico del asiento del empaque.	(pulg)

2.2.3.4 Análisis de las placas base, pedestal y pernos de anclaje.

2.2.3.4.1 Pedestal

El análisis del soporte del intercambiador de calor se lo realiza de igual manera que el diseño para una columna, las columnas son elementos sujetos a compresión y de acuerdo a relación de esbeltez se puede clasificar en tres grupos:

Bloques de compresión, cuando la relación de esbeltez es menor a 30

Columnas cortas, que son las columnas medianas utilizadas normalmente

Columnas largas, cuando su relación de esbeltez es entre 120 y 150.

La relación de esbeltez se obtiene de la fórmula 2.62

$$\lambda = \frac{kl}{r} \quad (2.62)$$

Las columnas largas y las cortas fallan, en general, por pandeo, por esta razón, es necesario comprobar que las columnas soporten las cargas críticas. El esfuerzo crítico en el elemento a compresión esta dado por la fórmula 2.63.

$$\sigma_{crit} = F_{crit} / A \leq S_y \quad (2.63)$$

$$n = \frac{F_{crit}}{F_{real}} \quad (2.64)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(d_e^2 - d_i^2) \quad (2.65)$$

Donde:

λ :	Relación de esbeltez	
K:	Coefficiente que depende del tipo de apoyo	
l:	Longitud real de la barra	(m)
r:	Radio de giro	(m)
F_{real} :	Fuerza del intercambiador sobre la columna de soporte	(N)
F_{crit} :	Fuerza critica a emplearse en el diseño	(N)
n:	Factor de seguridad	
d_e :	Diámetro exterior del tubo	(m)
d_i :	Diámetro interior del tubo	(m)
S_y :	Esfuerzo de fluencia del material	(Pa)

2.2.3.4.2 Cálculo de la placa base

Las placas base son el apoyo de la estructura y ayuda a soportar la carga total a la que están sometidas las columnas. Para obtener el espesor de la placa base se emplea la fórmula 2.66.

$$t_p = 2m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (2.66)$$

Donde:

f_p :	Presión sobre la placa base	(Psi)
F_y :	Esfuerzo mínimo de fluencia del material	(psi)
m:	Distancia entre el filo de placa base y la columna	(pulg)
t_p :	Espesor de la placa base	(pulg)

2.2.3.4.3 Pernos de Anclaje

El intercambiador esta sujeto a una base que tiene la altura para que el intercambiador empate sus boquillas a las líneas de flujo de la planta, por esta razón, el diámetro y número de los pernos estará dado de acuerdo a este sistema de anclaje existente en la planta de gas.

2.2.3.5 Soldaduras.

Según el párrafo UW-15 de la ASME VIII, la unión de aberturas, refuerzos y conexiones en los recipientes de presión, pueden ser unidas por arco eléctrico con electrodo revestido o con protección de gas.

Los cálculos de resistencia de las soldaduras en las boquillas no son requeridos⁽¹⁾ cuando se emplea juntas de acuerdo a la figura UW-16.1 esquemas a, b, c, d, e, f-1, f-2, f-3, f-4, g(x-1), g(y-1), g(z-1) que son uniones de penetración completa, tal como aparece en la tabla N° 3 del anexo N° 2.

Las tolerancias de los filetes a soldar se determinan en base a lo que se indica en las figuras: UW-13.1, UW-13.2, UW-13.3, UW-13.4, UW-13.5, UW-16.1 del código ASME sección VIII, división 1, subsección B, como se indica en la tabla N° 3 del anexo N° 2.

CAPITULO 3

DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

3.1 ANÁLISIS TÉRMICO.

En esta sección se desarrolla un ejemplo del procedimiento de cálculo térmico en base a las fórmulas establecidas en el literal 3.2.2 Además, se da una serie de consideraciones que se toma para determinar los valores de ciertas propiedades inmersas en el cálculo. En esta parte se determinará la energía total transferida y el área mínima del arreglo de aletas requerida para transferir esa cantidad de calor entre los flujos. Antes de iniciar el desarrollo del análisis se indicara los datos que se consideraran en el calculo y se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos para el desarrollo del ejemplo.

	Símbolo	Flujo A	Flujo B
Fluidos		Gas natural	GLP
Numero de canales		56	57
Altura de aletas	l	0.008 m	0.008 m
Largo del compacto	L	1.8 m	1.8 m
Espesor del compacto	H	0.6 m	0.6 m
Ancho del compacto	W	1.130 m	1.130 m
Paso de aletas	p	0.0035 m	0.004 m
Espesor de aletas	e	0.0006 m	0.0006 m
Flujo másico	\dot{m}	8.201 Kg/s	8.403 Kg/s
Capacidad calorífica	C_p	1557.49 J/KgK	1381.46J/KgK
Viscosidad dinámica	μ	1.2E-6 Kg/m s	1.2E-6 Kg/m s
Presión	P	710 psi	710 psi
Conductividad térmica	K_{gas}	0.0138 W/m ² K	0.0138 W/m ² K
Densidad	ρ	303.91 Kg/m ³	269.9 Kg/m ³

3.1.1 CÁLCULO DEL COEFICIENTE EFECTIVO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA CADA FLUJO.

El coeficiente de transferencia de calor para cada flujo se estima de la Fórmula 3.1.

$$h = \frac{jG_m C_p}{Pr^{2/3}}$$

Flujo de masa (G_m).- Es el flujo másico empleado en el cálculo se obtiene de la ecuación 2.6.

$$G_m = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}}$$

Entonces:

Flujo A:

$$\sigma = \frac{A_{fr}}{A_{ff}} = \frac{N_c * h * W}{W * H} = \frac{56 * 0,008 * 0,6}{0,6 * 1,130} = 0,396$$

$$G_m = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} = \frac{8,201}{0,396 * 0,678} = 30,511 \frac{Kg}{m^2 s}$$

Flujo B:

$$\sigma = \frac{A_{fr}}{A_{ff}} = \frac{N_c * h * W}{W * H} = \frac{57 * 0,008 * 0,6}{0,6 * 1,130} = 0,404$$

$$G_m = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} = \frac{8,403}{0,404 * 0,678} = 30,713 \frac{Kg}{m^2 s}$$

Capacidad calorífica a presión constante (C_p).- La capacidad calorífica es obtenida de la ecuación 2.10

$$C_{pT} = Y_1 C_{p1} + Y_2 C_{p2} + Y_3 C_{p3} + Y_i C_{pi}$$

$$C_{pT} = (0,092 * 0,527) + (0,103 * 0,199) + (0,127 * 0,409) + (0,462 * 0,388) + (0,06 * 0,342) + (0,11 * 0,390) + (0,021 * 0,382) + (0,024 * 0,386)$$

$$C_{pT} = 1.557,49 \frac{\text{J}}{\text{Kg.K}} = \left(0,372 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \right)$$

Donde:

Y: Es la fracción molar de los componentes del gas natural, que fue obtenida de una cromatografía que se realizó a los fluidos que pasan por el intercambiador, los resultados de la cromatografía se indican en la tabla N°4 del Anexo II.

C_{pi}: Es la capacidad calorífica de cada uno de los elementos que forman el gas, estos valores se obtienen de la Tabla N°5 del Anexo II. La capacidad calorífica está obtenida con la temperatura promedio entre la entrada y salida de cada fluido.

Los valores de capacidad calorífica total de cada gas se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de Capacidad calorífica

	Flujo A (J/Kg.°K)	Flujo B (J/Kg.°K)
C _{pT}	1556,6	1381,46

Número de Prandtl (P_r).- El número de Prandtl se obtiene de la ecuación 2.4.

Flujo A

$$P_r = \frac{C_p \mu}{K_{gas}}$$

$$P_r = \frac{1.557,49 \text{J/Kg.K} * 0,00000120 \text{Kg/ms}}{0,0138 \text{W/mK}} = 0,135$$

Flujo B

$$P_r = \frac{C_p \mu}{K_{gas}}$$

$$P_r = \frac{1.557,49 \text{ J/Kg.K} * 0,00000120 \text{ Kg/ms}}{0,0138 \text{ W/mK}} = 0,115$$

El número de Reynolds (R_e) es obtenido de la fórmula 2.5.

Flujo A

$$R_e = \frac{G_m D_h}{N_{aletas} * \mu} = \frac{30,511 * 0,00426}{171,4 * 0,0000012} = 631,372$$

$$N_{aletas} = \frac{W}{p} = \frac{0,6}{0,0035} = 171,4$$

Flujo B

$$R_e = \frac{G_m D_h}{N_{aletas} * \mu} = \frac{30,713 * 0,00477}{150 * 0,00000115} = 849,633$$

$$N_{aletas} = \frac{W}{p} = \frac{0,6}{0,004} = 150$$

Coefficiente de Colburn (j) es obtenido de la ecuación 2.2.

Para el flujo A:

$$j_A = S_t P_r^{2/3}$$

$$S_t = \frac{Nu}{P_r R_E}$$

$$S_t = \frac{4,79}{0,135 * 631,372} = 0,056$$

$$j_A = 0,056 * 0,135^{2/3} = 0,014$$

Para el flujo B

$$j_B = S_i P_r^{2/3}$$

$$S_i = \frac{Nu}{P_r R_E}$$

$$S_i = \frac{4.12}{0,115 * 849.633} = 0,042$$

$$j_B = 0,042 * 0,115^{2/3} = 0,0099$$

El coeficiente de transferencia de calor es:

Para el flujo A

$$h = \frac{j G_m C_p}{P_r^{2/3}} = \frac{0,014 * 30,511 * 1.557,49}{(0,135^{2/3})} = 2669,053 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Para el flujo B

$$h = \frac{j G_m C_p}{P_r^{2/3}} = \frac{0,00811 * 30,73 * 1.381,644}{(0,115^{2/3})} = 1791,944 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

El coeficiente efectivo de transferencia de calor (h_0), es calculado con la siguiente relación:

$$\frac{1}{h_0} = \frac{1}{h} + r$$

Entonces para:

Flujo A

Factor de impureza ⁽³⁾ $r = 0,0001 \text{ m}^2/\text{W}^\circ\text{K}$

$$h_0 = \frac{1}{(1/h) + r} = \frac{1}{(1/3064,674) + 0,0001} = 2106,750 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Flujo B

Factor de impureza ⁽³⁾ $r = 0,0002 \text{ m}^2/\text{W}^\circ\text{K}$

$$h_0 = \frac{1}{(1/h) + r} = \frac{1}{(1/1457,042) + 0,0002} = 1.319,169 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.1.2 CÁLCULO DEL ÁREA EFECTIVA DE TRANSFERENCIA PARA CADA FLUJO.

El área efectiva de transferencia puede ser estimada de la fórmula 2.14:

$$A = A_1 + \eta\phi A_2$$

Área primaria de transferencia de calor (A_1).- Se obtiene de la siguiente relación:

$$A_1 = (W - (N^{\circ}_{aletas} * t))L$$

Para el arreglo del flujo A.

$$A_1 = (0,6 - ((0,6/0,0035 * 0,0006))1,8 = 0,895 \text{ m}^2$$

Para el arreglo del flujo B.

$$A_1 = (0,6 - ((0,6/0,004 * 0,0006))1,8 = 0,918 \text{ m}^2$$

Área secundaria de transferencia de calor (A_2).- El área secundaria de transferencia esta dado por:

$$A_2 = N^{\circ}_{aletas} * 2 * h / 2 * L$$

Para el arreglo del flujo A.

$$A_2 = (0,6/0,0035) * 2 * 0,008 / 2 * 1,8 = 2,469 \text{ m}^2$$

Para el arreglo del flujo B.

$$A_2 = (0,6/0,004) * 2 * 0,008/2 * 1,8 = 2,160 \text{ m}^2$$

La eficiencia de aleta esta dada por:

$$\eta = \frac{\tanh(m/2)}{m/2}$$

$$m = l * \left(\frac{2 * h_o}{K * t} \right)$$

Entonces:

Flujo A

$$m = l * \left(\frac{2 * h_o}{K * t} \right) = 0,008 * \left(\frac{2 * 2345,772}{240 * 0,0006} \right) = 0,684$$

Flujo B

$$m = l * \left(\frac{2 * h_o}{K * t} \right) = 0,008 * \left(\frac{2 * 1128,258}{240 * 0,0006} \right) = 0,541$$

Para el arreglo de aletas del flujo A

$$\eta = \frac{\tanh(0,722/2)}{0,722/2} = 0,869$$

Para el arreglo de aletas del flujo B

$$\eta = \frac{\tanh(0,501/2)}{0,501/2} = 0,913$$

Factor sin perforar (ϕ): en este caso no se emplea aletas perforadas por lo que:

$$\phi = 1$$

Entonces

Para el flujo A

$$A = A_1 + \eta\phi A_2 = 0,895 + (0,869 * 2,469) = 3,039 \text{ m}^2$$

Para el flujo B

$$A = A_1 + \eta\phi A_2 = 0,918 + (0,913 * 2,960) = 2,889 \text{ m}^2$$

3.1.3 CALCULO DE LA SUPERFICIE EFECTIVA GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

La superficie efectiva global de transferencia de calor puede ser calculada de:

$$\frac{1}{UA_d} = \frac{1}{\sum (h_0 A)_h} + \frac{1}{\sum (h_0 A)_c}$$

$$\frac{1}{UA_d} = \frac{1}{\sum (2345,772 * 3,039)_A} + \frac{1}{\sum (1128,258 * 2,889)_B}$$

$$UA_d = 2.388,99 \text{ W / K}$$

3.1.4 CÁLCULO DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA (MTD).

Para el cálculo del MTD se emplea la ecuación 2.18. En la figura 3.1 se indica la distribución de temperaturas de los fluidos.

$$MTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_1 = T_{A,i} - T_{B,o} = 333 - 322 = 11^\circ K$$

$$\Delta T_2 = T_{A,o} - T_{B,i} = 232 - 222 = 10^\circ K$$

Entonces:

$$MTD = \frac{10 - 11}{\ln\left(\frac{10}{11}\right)} = 10,5^\circ K$$

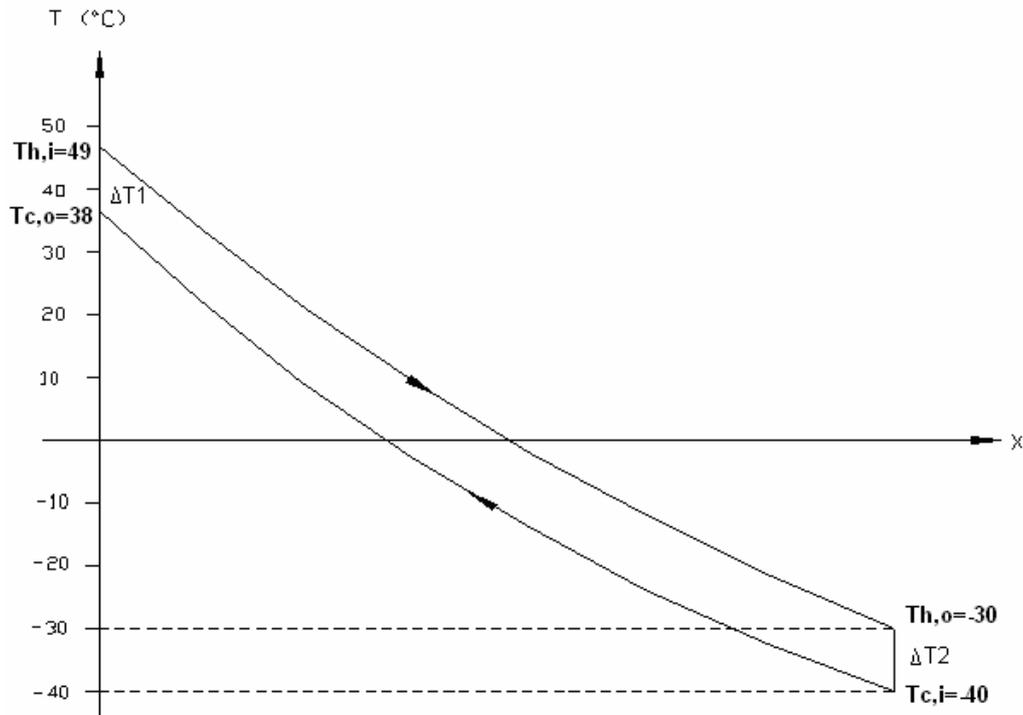


FIGURA 3.1 Distribución de temperaturas en el intercambiador.

3.1.5 CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO

El calor total transferido es estimado de:

$$Q = UA_d MTD$$

$$Q = 2.388,991 \text{ W/K} * 10,546 \text{ }^\circ K$$

$$Q = 25193,825 \text{ W}$$

Estimación aproximada del volumen del compacto del intercambiador de calor:

$$V = \frac{Q / MTD}{C}$$

$$V = \frac{(25193,825 * 56) / 10,546}{100000} = 1,3 \text{ m}^3$$

3.2 CAÍDAS DE PRESIÓN.

Se debe evaluar las caídas de presión debido a las diferentes secciones por donde circulan los fluidos y por la fricción que tienen con los elementos del intercambiador.

Las pérdidas de presión por expansión a la entrada de los cabezales (figura 3.2) se calcula con la ecuación de Bernoulli (ecuación 2.21).

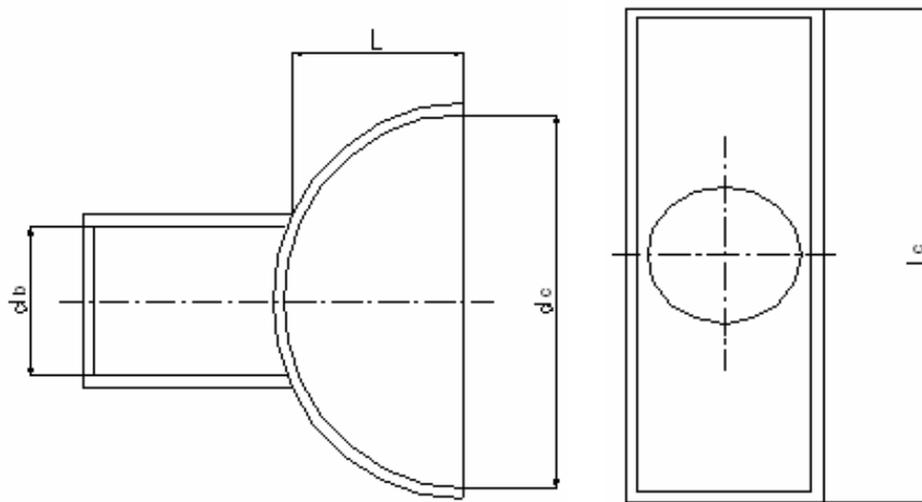


FIGURA 3.2 Esquema del cabezal.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - H_r = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$P_2 - P_1 = \rho \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} - H_r \right)$$

$$H_r = K_1 (V_1^2 / 2g)$$

$$P_2 - P_1 = \rho \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} - K_1 (V_1^2 / 2g) \right)$$

Entonces del principio de conservación de la masa se obtiene la velocidad V_2 .

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

$$V_2 = \frac{A_1 V_1}{A_2}$$

$$A_1 = \frac{\pi d_b^2}{4}$$

$$A_1 = \frac{\pi * 0,193^2}{4} = 0,029 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{8,201}{303,916} = 0,026 \text{ m}^3 / s$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1}$$

$$V_1 = \frac{0,0269}{0,029} = 0,916 \text{ m/s}$$

$$A_2 = l_c * d_c$$

$$A_2 = 1,017 * 0,2603 = 0,264 \text{ m}^2$$

Entonces el valor V_2 es:

$$V_2 = \frac{0,029 * 0,916}{0,246} = 0,101 \text{ m/s}$$

El coeficiente de expansión se obtiene de la siguiente relación:⁽¹⁰⁾

$$K = K' [1 - (d/D)^2]^2$$

Una aproximación para este cálculo es tomar el diámetro D (considerado para una tubería) como Diámetro hidráulico (D_h).

$$K = K' \left[1 - (d / D_h)^2 \right]^2$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(1,017 * 0,2603)}{2(1,017 + 0,2603)} = 0,414 \text{ m}$$

$$d / D_h = 0,193 / 0,414 = 0,467$$

El valor K' se obtiene mediante la siguiente relación ⁽¹⁰⁾

$$(D_h - d)2L = (0,414 - 0,193) / (2 * 0,130) = 0,848$$

Entonces: $K' = 1,10$

K' : Constante para cálculo del coeficiente de expansión. ⁽¹⁰⁾

$$K = K' \left[1 - (d / D_h)^2 \right]^2$$

$$K = 1,10 \left[1 - (0,467)^2 \right]^2 = 0,672$$

La caída de presión en el cabezal esta dado por:

$$P_2 - P_1 = \rho \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} - K_1 (V_1^2 / 2g) \right)$$

$$P_2 - P_1 = 303,9 \left(\frac{0,916^2}{2 \times 10} - \frac{0,101^2}{2 \times 10} - 0,672 \left(\frac{0,916^2}{2 \times 10} \right) \right)$$

$$P_2 - P_1 = 3,856 \text{ Pa} = (0,00055 \text{ Psi})$$

Para el cálculo de pérdidas de presión por reducción a la salida de los cabezales se realiza el mismo cálculo anterior con la única diferencia de que el valor de $K = 0,05$. ⁽¹⁰⁾

Entonces del Principio de conservación de la masa se obtiene la velocidad V_2 .

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1}$$

$$A_2 = \frac{\pi d_b^2}{4}$$

$$A_2 = \frac{\pi * 0,0971^2}{4} = 0,0074 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{8,201}{269,918} = 0,026 \text{ m}^3 / s$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2}$$

$$V_2 = \frac{0,026}{0,0074} = 3,638 \text{ m/s}$$

$$A_1 = l_c * d_c$$

$$A_1 = 1,017 * 0,26035 = 0,264 \text{ m}^2$$

Entonces el valor V_1 es:

$$V_1 = \frac{3,63 * 0,00741}{0,264} = 0,1019 \text{ m/s}$$

Entonces la caída de presión a la salida de los cabezales:

$$P_2 - P_1 = \rho \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} - K_1 (V_1^2 / 2g) \right)$$

$$P_2 - P_1 = 303,91 \left(\frac{0,1019^2}{2 \times 10} - \frac{3,638^2}{2 \times 10} - 0,05 \left(\frac{0,1019^2}{2 \times 10} \right) \right)$$

$$P_2 - P_1 = 190,95 \text{ Pa} = (0,0276 \text{ Psi})$$

Perdidas de presión en los canales aleteados.

$$\Delta P = 4f \left(\frac{l_p}{d_h} \right) \left(\frac{G_m^2}{2\rho} \right) + K \left(\frac{G_m^2}{2\rho} \right)$$

Para el flujo A

$$\Delta P = 4 * 0,283 \left(\frac{1,8}{0,00425} \right) \left(\frac{30,511^2}{2 * 303,916} \right) + 1 \left(\frac{30,511^2}{2 * 303,906} \right) = 264,115 \text{ Pa} = (0,0382 \text{ Psi})$$

Para el flujo B

$$\Delta P = 4 * 0,055 \left(\frac{1,8}{0,00477} \right) \left(\frac{30,713^2}{2 * 269,918} \right) + 1 \left(\frac{30,713^2}{2 * 269,918} \right) = 200,347 \text{ Pa} = (0,0290 \text{ Psi})$$

Las pérdidas totales de presión para cada uno de los flujos se obtienen haciendo una sumatoria en todos los puntos analizados, en la tabla 3.3 se indica los valores de la diferencia de valores totales.

Tabla 3.3 Valores de pérdidas totales de presión para cada flujo.

	Flujo A		Flujo B	
	Pa	Psi	Pa	Psi
Diferencia Total de Presión	458,92	0,066	250,79	0,0363

3.3 ANÁLISIS MECÁNICO

3.3.1 CÁLCULO DEL ESPESOR DE PLACAS DE DIVISIÓN, BARRAS LATERALES Y ALETAS

Una vez establecido el análisis térmico se debe verificar si las dimensiones establecidas en el diseño térmico satisfacen el diseño mecánico. El análisis se lo

realiza tomando una presión de diseño de 710 Psi. Las medidas que se analizarán y que fueron obtenidos en el diseño térmico se especifican en la Tabla 3.4 y el gráfico de estas dimensiones se indica en la Figura 3.3.

TABLA 3.4 Parámetros considerados en el análisis mecánico

Parámetro	mm	pulg.
t_1	10,00	0,39
t_2	2,00	0,08
t_3	0,60	0,02
$h (p-t_3)$	2,90	0,114
H	8,00	0,314

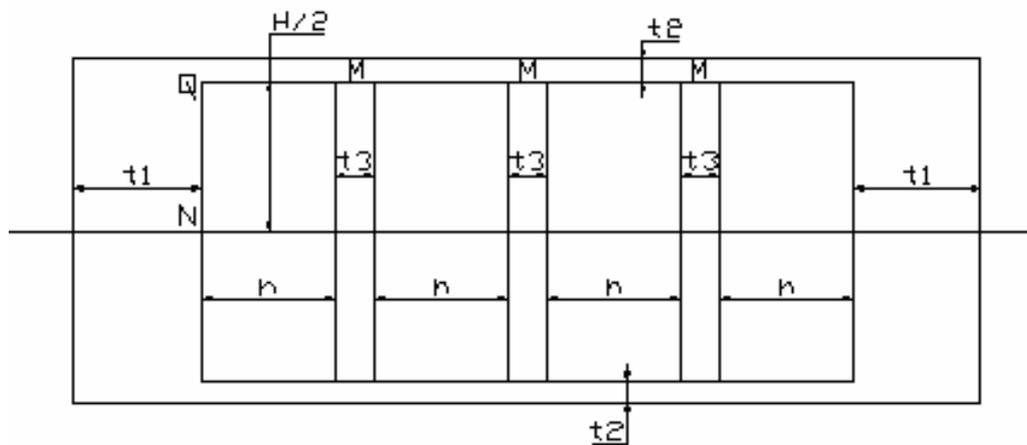


FIGURA 3.3 Gráfico de las dimensiones para el análisis mecánico de los pasajes aleteados

Las fórmulas empleadas para este cálculo se desarrollan a continuación.

3.3.1.1 Cálculo del esfuerzo de membrana.

En este cálculo interviene los factores K , α , C_1 , C_2 , I_1 , I_2 y se desarrollan a continuación.

Momento de inercia del elemento de espesor t_1 (I_1)

$$I_1 = \frac{bt_1^3}{12}$$

$$I_1 = \frac{1 * 0,39^3}{12} = 6,712E - 10 \text{ mm}^4 = (0,00509 \text{ pulg}^4)$$

Momento de inercia del elemento de espesor t_2 (I_2)

$$I_2 = \frac{bt_2^3}{12}$$

$$I_2 = \frac{1 * 0,079^3}{12} = 2,56E - 18 \text{ mm}^4 = (0,00004 \text{ pulg}^4)$$

El código ASME, Sección VIII⁽¹⁾ establece el valor de b igual a 1 pulg.

Parámetro del recipiente rectangular ($\alpha=H/h$)

$$\alpha = \frac{H}{h} = \frac{0,314}{0,114} = 2,76$$

Parámetro del recipiente ($k=(I_2/I_1) * \alpha$)

$$k = (I_2 / I_1) * \alpha = (0,00004 / 0,00509) * 2,76 = 0,022$$

Distancia desde el eje central al extremo del elemento t_1 (c_1)

$$c_1 = \frac{t_1}{2} = \frac{0,39}{2} = 0,0015 \text{ mm} = (0,197 \text{ pulg})$$

Distancia desde el eje central al extremo del elemento t_2 (c_2)

$$c_2 = \frac{t_2}{2} = \frac{0,079}{2} = 2,313E - 06 \text{ mm} = (0,039 \text{ pulg})$$

a) Esfuerzo en las barras laterales (t_1) (empleando la ecuación 2.24).

$$S_m = \frac{Ph}{2t_1} \left[3 - \left(\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right) \right]$$

$$S_m = \frac{710 \text{ psi} * 0,114 \text{ pulg}}{2 * 0,39 \text{ pulg}} \left[3 - \left(\frac{6 + 0,022(11 - 2,76^2)}{3 + (5 * 0,022)} \right) \right] = 743116,941 \text{ Pa} = (107,78 \text{ Psi})$$

b) Esfuerzo en las placas separadoras (empleando la ecuación 2.25)

$$S_m = \frac{PH}{2t_2}$$

$$S_m = \frac{710 * 0,314}{2 * 0,079} = 9790555,356 \text{ Pa} = (1420 \text{ Psi})$$

c) Esfuerzo en las aletas (empleando la ecuación 2.26).

$$S_m = \frac{Ph}{2t_3} \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right]$$

$$S_m = \frac{710 * 0,114}{2 * 0,02} \left[\frac{6 + 0,022(11 - 2,76^2)}{3 + (5 * 0,022)} \right] = 23105641,69 \text{ Pa} = (3351,19 \text{ Psi})$$

3.3.1.2 Cálculo del esfuerzo de doblado

a) Esfuerzo en las barras laterales (empleando la ecuación 2.27 y 2.28).

$$(S_b)_N = \frac{Pc_1}{24I_1} \left[-3H^2 + 2h^2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right]$$

$$(S_b)_N = \frac{710 * 0,197}{24 * 0,00509} \left[-3 * 0,314^2 + 2 * 0,114^2 \left(\frac{3 + 5 * 2,76^2 * 0,022}{3 + (5 * 0,022)} \right) \right]$$

$$(S_b)_N = -2095592,532 \text{ Pa} = (-303,94 \text{ Psi})$$

$$(S_b)_Q = \frac{Ph^2 c_1}{12I_1} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right]$$

$$(S_b)_Q = \frac{710 * 0,114^2 * 0,197}{12 * 0,00509} \left[\frac{3 + 5 * 2,76^2 * 0,022}{3 + 5 * 0,022} \right] = 254140,753 \text{ Pa} = (36,86 \text{ Psi})$$

- b) Esfuerzo en las placas separadoras (empleando la ecuación 2.29 y 2.30)

$$(S_b)_M = \frac{Ph^2c_2}{12I_2} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right]$$

$$(S_b)_M = \frac{710 * 0,114^2 * 0,039}{12 * 0,00004} \left[\frac{3 + 0,022(6 - 2,76^2)}{3 + (5 * 0,022)} \right] = 4904792,443 \text{ Pa} = (711,38 \text{ Psi})$$

$$(S_b)_Q = \frac{Ph^2c_2}{12I_2} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right)$$

$$(S_b)_Q = \frac{710 * 0,114^2 * 0,039}{12 * 0,00004} \left(\frac{3 + 5 * 2,76^2 * 0,022}{3 + (5 * 0,022)} \right) = 6352967,265 \text{ Pa} = (921,42 \text{ Psi})$$

3.3.1.3 Cálculo de los esfuerzos totales.

- a) Esfuerzo en las barras laterales (empleando la ecuación 2.31 y 2.32)

$$(S_T)_N = 107,781 + (-303,94) = -1352475,59 \text{ Pa} = (-196,16 \text{ Psi})$$

$$(S_T)_Q = 107,781 + 36,86 = 997257,695 \text{ Pa} = (144,64 \text{ Psi})$$

- b) Esfuerzo en las placas separadoras (empleando la ecuación 2.33 y 2.34)

$$(S_B)_M = 1420 + 711,38 = 14695347,8 \text{ Pa} = (2131,38 \text{ Psi})$$

$$(S_B)_Q = 1420 + 942,42 = 16143522,6 \text{ Pa} = (2341,42 \text{ Psi})$$

- c) Esfuerzo en las aletas (empleando la ecuación 2.35)

$$(S_T) = 24484593,2 \text{ Pa} = (3351,19 \text{ Psi})$$

3.3.1.4 Cálculo de los esfuerzos máximos.

Los esfuerzos totales calculados anteriormente para este tipo de arreglos no debe exceder esfuerzo admisible que se calcula empleando la ecuación 2.36.

$$S_{adm} = 1,5 * S * E$$

$$S_{adm} = 1,5 * 14000 * 0,5 = 72394951,6 \text{ Pa (10500 Psi)}$$

Donde:

S: Es el esfuerzo máximo de tensión de la aleación 3003, temple O.

E: Eficiencia de la junta para soldadura fuerte.

Los esfuerzos totales calculados anteriormente no exceden el esfuerzo admisible (S_{adm}) permitido por el código ASME VIII⁽¹⁾, por lo que se puede decir, que las dimensiones establecidas soportan la presión de diseño para el intercambiador de calor.

3.3.1.5 Análisis de la estructura formada por el compacto y la capa exterior de protección.

Este análisis se realiza de igual manera que el cálculo para determinar el espesor de aleta, placa separadora y barras laterales. Estos resultados satisfacen todas las ecuaciones para el diseño de recipientes de sección cuadrangular y se detallan en la Tabla 3.5 y su esquema se indica en la Figura 3.4

TABLA 3.5 Parámetros a considerar en el análisis mecánico de la capa protectora.

Parámetro	mm.
t ₁	10,00
t ₂ Placa Protectora	10,00
t ₃ Nervios	1,00
h Paso	25,00
H Altura	10,00

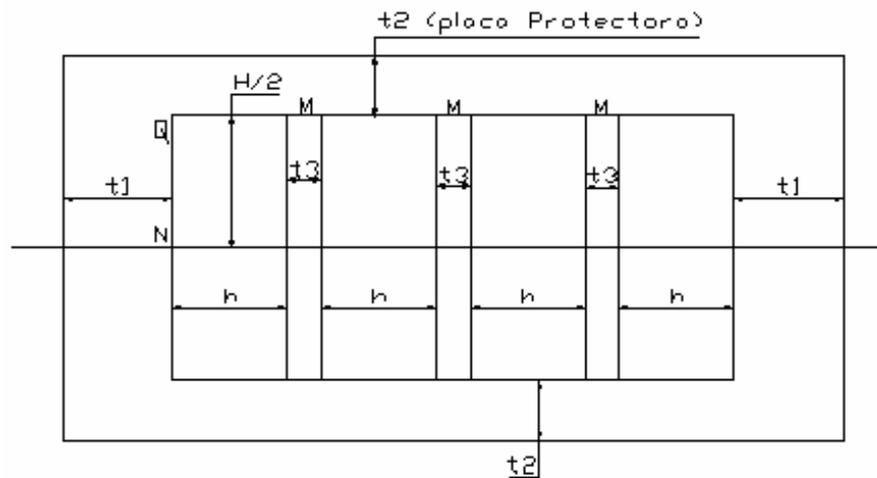


FIGURA 3.4 Gráfico de las dimensiones para el análisis mecánico de la capa protectora.

3.3.2 CABEZALES, BOQUILLAS Y BRIDAS.

3.3.2.1 Cabezales.

El cabezal se analizará como si fuera hecho de una mitad de un recipiente cilíndrico a presión. Para el análisis se considera la presión de diseño de $P = 710$ Psi, el radio interno del recipiente a presión de $R = 5,125$ pulg; $E=0,6$, como se indica en tabla N° 6 del anexo N° 2 y $S = 11400$ Psi, S es el esfuerzo admisible de la aleación 5083 temple O, que se muestra en la tabla N° 9 del anexo N° 2.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

$$t = \frac{710 * 5,125}{(11400 * 0,6) - (0,6 * 710)} = 14,224 \text{ mm} = (0,56 \text{ pulg} \approx 0,75 \text{ pulg})$$

3.3.2.2 Boquillas.

Para el cálculo del espesor de las boquillas se emplea la siguiente relación:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Los datos para este diseño son:

$R = 3,813$ pulg.

$S = 11400$ Psi; esfuerzo admisible de la Aleacion 5083, temple O.

$P = 710$ Psi

$E = 0,6$; eficiencia de la junta

Por lo tanto:

$$t = \frac{710 * 3,813}{(0,6 * 11400) - (0,6 * 710)} = 10,16 \text{ mm} = (0,4 \text{ pulg} \approx 1/2 \text{ pulg})$$

En el acople entre la boquilla y el cabezal se deben analizar los momentos y fuerzas máximas que están actuando. Los pasos para calcular las fuerzas y momentos resultantes máximos se describen a continuación.

3.3.2.2.1 Cálculo de los factores β y γ :

$$\beta = 0.875 \left(\frac{r_0}{R_m} \right)$$

$$\beta = 0.875 \left(\frac{4,31}{5,545} \right) = 0,68$$

$$\gamma = \left(\frac{R_m}{T} \right)$$

$$\gamma = \left(\frac{5,545}{0,4} \right) = 13,20$$

3.3.2.2.2 Cálculo del esfuerzo de presión (σ)

$$\sigma = \left(\frac{2P}{T} \right) \left(R_m - \frac{T}{2} \right)$$

$$\sigma = \left(\frac{2 * 710}{0,4} \right) \left(5,545 - \frac{0,4}{2} \right)$$

$$\sigma = 124363357 \text{ Pa} = 18037,38 \text{ Psi}$$

3.3.2.2.3 Cálculo del momento y fuerza resultante.

El valor de S_y (esfuerzo de fluencia) corresponde a la aleación 5083, temple O de la especificación SB 209, este valor esta dado en la tabla N° 2 del Anexo N° 1.

$$F_{RRF} = \left(\frac{R_m^2}{\alpha} \right) (S_y - \sigma)$$

$$F_{RRF} = \left(\frac{5,545^2}{40} \right) (18000 - 18037,38) = -127,797 \text{ N} = (-28,73 \text{ lbf})$$

$$M_{RCM} = \frac{R_m^2 r_o S_y}{\Sigma}$$

$$M_{RCM} = \frac{5,545^2 * 4,312 * 18000}{75} = 3595,542 \text{ N - m} = (31823,171 \text{ lbf - pulg})$$

$$M_{RLM} = \frac{R_m^2 r_o}{\Delta} (S_y - \sigma)$$

$$M_{RLM} = \frac{5,545^2 * 4,3125}{40} (18000 - 18037,381) = -14 \text{ N - m} = (-123,915 \text{ lbf - pulg})$$

El valor de F_{RRF} es F_{RF} y el menor momento entre M_{RCM} y M_{RLM} es M_{RM} .

Por lo tanto:

$$F_{RF} = (-28,734 \text{ lbf}) = -127.797 \text{ N}$$

$$M_{RM} = (-123,91 \text{ lb-pulg}) = -14 \text{ N-m}$$

Debido a que los diámetros de las líneas de entrada y de salida del intercambiador ya están establecidos en la planta, únicamente se comprueba que las fuerzas y momentos obtenidos no sobrepasen los valores máximos recomendados en la Tabla 2.3. El cálculo del resto de boquillas se lo realiza de manera similar al ejemplo anterior.

3.3.2.3 Bridas.

Para determinar las dimensiones básicas de las bridas se deben seguir los requerimientos del código ASME, Sección VIII⁽¹⁾, Apéndice II. La geometría de las bridas se toma como base las establecidas como estándar. El procedimiento de cálculo se describe a continuación.

$$S_T = \frac{YM_0}{t^2 B} \leq Sf$$

De la ecuación anterior se puede despejar t y determinar el mínimo espesor requerido para la brida.

$$t = \sqrt{\frac{YM_0}{S_T B}}$$

De donde:

$$Y = \frac{1}{K-1} \left(0,66845 + 5,71690 \frac{K^2 \log K}{K^2 - 1} \right)$$

Relación entre el diámetro exterior e interior

Diámetro exterior de la brida (A).- A = 15 pulg

Diámetro interior de la brida (B).- B = 7,63 pulg

$$K = \frac{A}{B}$$

$$K = \frac{15}{7,63} = 1,97$$

$$Y = \frac{1}{1,97-1} \left(0,66845 + 5,71690 \frac{1,97^2 \log 1,97}{1,97^2 - 1} \right) = 3,03$$

$$M_0 = W \frac{(C-G)}{2}$$

$$W = \frac{(A_m + A_b)S_a}{2}$$

Tomando como material de pernos SA-193; $S_a = 25000$ Psi; $S_b = 25000$ Psi

$$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_b}$$

$$W_{m1} = H + H_p$$

$$H = 0,785 * G^2 * P$$

$$H = 0,785 * 9,81^2 * 710 = 53691,88$$

$$H_p = 2 * b * 3,14 * G * m * P$$

$$H_p = 2 * 0,52 * 3,14 * 9,81 * 6,5 * 710 = 148662,82$$

$$W_{m1} = 53691,88 + 45742,41 = 202354,70$$

El valor de A_{m1} es:

$$A_{m1} = \frac{202354,70}{25000} = 8,09$$

$$A_{m2} = \frac{W_{m2}}{S_a}$$

$$W_{m2} = 3,14 * b * G * y$$

$$W_{m2} = 3,14 * 0,52 * 9,81 * 6500 = 104692,13$$

$$A_{m2} = \frac{25770,37}{25000} = 4,18$$

Para el valor de A_m se toma del mayor valor entre A_{m1} y A_{m2} .

$$A_m = A_{m1} = 8,09$$

A_b : Se obtiene de la siguiente relación:

$$A_b = \frac{A_m}{N^{\circ}_{\text{pernos}}}$$

$$A_b = \frac{3,97}{12} = 0,33$$

Entonces:

$$W = \frac{(A_m + A_b)S_a}{2}$$

$$W = \frac{(3,97 + 0,33)25000}{2} = 109608,79$$

C es la Distancia entre pernos. C=13 pulg.

G es diámetro nominal el empaque,

$$G = B + b$$

$$B = 7,63 \text{ pulg.}$$

b se obtiene de la siguiente relación:

$$b = 0.5\sqrt{b_0}$$

$$b_0 = \frac{N}{2}$$

$$N = \frac{C - B - d_p}{2}$$

d_p es el diámetro del perno, $d_p = 1$ pulg.

$$N = \frac{13 - 7,63 - 1}{2} = 2,2 \text{ pulg}$$

$$b = \frac{2,2}{2} = 1,1$$

$$b = 0.5\sqrt{1,1} = 0,52$$

$$G = B + b$$

$$G = 7,62 + 0,52 = 9,8$$

El valor de M_0 es:

$$M_0 = W \frac{(C - G)}{2}$$

$$M_0 = 109608,79 \frac{(13 - 9,81)}{2} = 19721,768 \text{ N - m} = (174552,01 \text{ lb/pulg})$$

Reemplazando los valores en la primera ecuación el valor de t es:

$$S_T = \frac{YM_0}{t^2 B}$$

El esfuerzo máximo permitido de la brida se toma del Tabla N° 9 del Anexo 2, y se considera un aluminio de la especificación SB-209, aleación 5083 con temple O. Entonces: $S_T = 11400$ Psi

$$t = \sqrt{\frac{3,03 * 174552,01}{11400 \cdot 7,63}} = 63,5 \text{ mm} = (2,468 \text{ pulg} \approx 2.5 \text{ pulg})$$

3.3.3 ANÁLISIS DE LA PLACA BASE, PEDESTAL Y PERNOS

3.3.3.1 Cálculo del pedestal.

Primeramente se empieza calculando la esbeltez con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{kl}{r}$$

Entonces:

$$k = 2; \text{ (empotrado en un solo lado)}$$

$$l = 0.482 \text{ m.}$$

$$r = \sqrt{\frac{d_e^2 + d_i^2}{16}}$$

$$r = \sqrt{\frac{0,323^2 + 0,304^2}{16}} = 0,111 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{2 * 0,482}{0,111} = 8.67$$

De esta relación se obtiene la esbeltez menor que 30, por lo que esta columna resulta ser un bloque a compresión, esto significa que no es necesario analizar el pandeo, debido a que la flexión en el cuerpo no es inminente.

$$\sigma_{crit} = F_{crit} / A \leq S_y$$

$$n = \frac{F_{crit}}{F_{real}}$$

La fuerza real $F_{real} = (62000 \text{ lbf.}) = 28181,81 \text{ N}$

$$n = 6$$

$$F_{crit} = nF_{real}$$

$$F_{crit} = 6 * 28181,81 = 16909 \text{ N}$$

$$A = \frac{\pi}{4}(d_e^2 - d_i^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(0,323^2 - 0,304^2) = 0,0094 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$\sigma_{crit} = 16909 / 0,0094 = 1797734,12 \leq 124105631 \text{ N/m}^2$$

3.3.3.2 Cálculo de la placa base

Para obtener el espesor de la placa base se emplea la fórmula 2.66.

$$t_p = 2m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}}$$

$$f_p = \frac{F_{crit}}{A_{base}} = \frac{16909}{0,36 * 0,36} = 130530 \text{ N/m}^2$$

$F_y = 124105631 \text{ (N/m}^2\text{)}$; aleación 5083, temple O de la especificación SB 209

$$m = 0,0180$$

$$t_p = 2 * 0,0180 \sqrt{\frac{130530}{124105631}} = 0,0053 \text{ m} \approx 5.3 \text{ mm}$$

Para que el intercambiador pueda tener la altura para las conexiones de las bridas, es necesario que la placa base tenga como mínimo un espesor de 12,7 mm.

3.3.3.2.1 Pernos de Anclaje

El soporte para la base del intercambiador de calor esta construido en la planta de gas, por esta razón, para el anclaje del intercambiador los pernos que se emplearan son 4 pernos de diámetro 22 mm.

3.4 DIMENSIONES DEL INTERCAMBIADOR.

3.4.1 DIMENSIONES DEL ESPESOR DE LAS PLACAS SEPARADORAS, BARRAS LATERALES Y ALETAS

Las dimensiones de las placas separadoras, barras laterales se muestran en la tabla 3.6.

TABLA 3.6 Dimensiones de las placas separadoras, aletas, barras laterales.

Elemento	L (mm)	a (mm)	e (mm)
Barra	2200	8	10
Placa separadora	2200	600	2
Placa protectora	2200	600	10

Las dimensiones de las aletas (Figura 3.5) se indican en la Tabla 3.7.

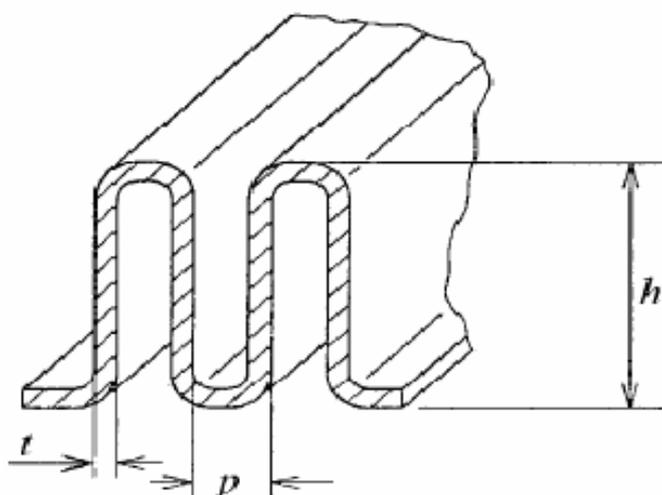


FIGURA 3.5 Gráfico de las dimensiones de las aletas ⁽²⁾

TABLA 3.7 Dimensiones de los cabezales.

Elemento	p (mm)	h (mm)	T (mm)
Aletas flujo A	3,5	8	0,6
Aletas flujo B	4,0	8	0,6
Nervios (placa protectora)	27	10	2

3.4.2 CABEZALES, BOQUILLAS Y BRIDAS.

3.4.2.1 Cabezales.

Todos los cabezales son de igual tamaño, (se indica el esquema de las dimensiones de los cabezales en la figura 3.6) esto debido a que soportan las mismas presiones de trabajo. En la Tabla 3.8 se dan las dimensiones obtenidas de los cálculos realizados.

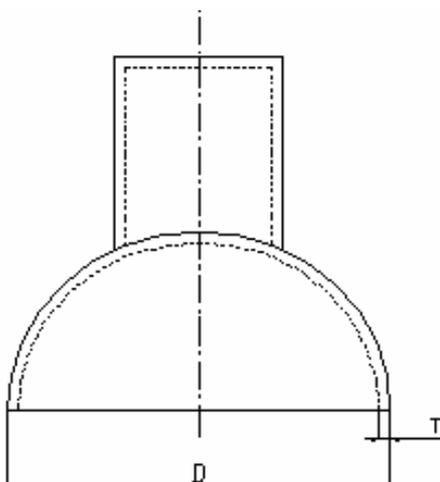


FIGURA 3.6 Esquema de las dimensiones de los cabezales

TABLA 3.8 Dimensiones de los cabezales.

FLUJO	ENTRADA	SALIDA
	Diámetro. x Espesor(mm)	Diámetro. x Espesor (mm)
A-Natural Gas	279 x 19,1	279 x 19,1
B-(LPG)	279 x 19,1	279 x 19,1

3.4.2.2 Boquillas.

En la Tabla 3.9 se indican las dimensiones de las boquillas, así como la longitud de la boquilla a emplearse en el intercambiador.

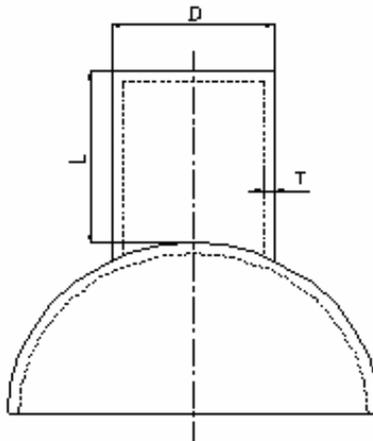


FIGURA 3.7 Esquemas de las dimensiones de las boquillas.

TABLA 3.9 Dimensiones de las boquillas.

Flujo	Diámetro de boquillas (D) (Pulg.)	Espesor de pared (T)		Longitud de la boquilla (L)	
		Pulg.	mm.	Pulg.	mm.
A-entrada	8	0,5	12,7	7,1	181
A-salida	4	0,337	8,55	8,8	223
B-entrada	6	0,432	10,97	8,0	203
B-salida	6	0,432	10,97	7,6	193
C	1	0,179	4,54	3,5	90

3.4.2.3 Tubo distribuidor de metanol.

Es un tubo por donde circula metanol a alta presión, para la limpieza del distribuidor y pasajes aleteados, el diseño se lo realiza de igual manera como si fuera una boquilla(ver figura 3.8). En el siguiente cuadro se especifica las dimensiones de este tubo distribuidor.

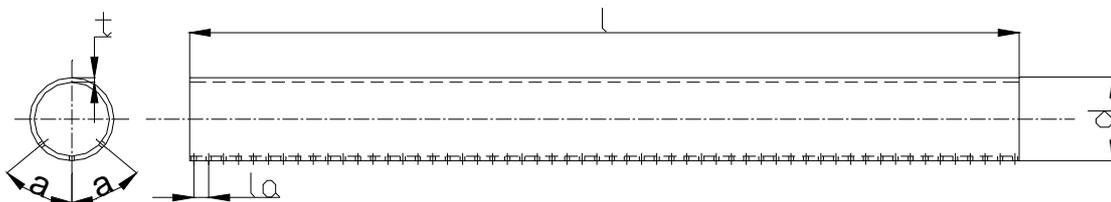


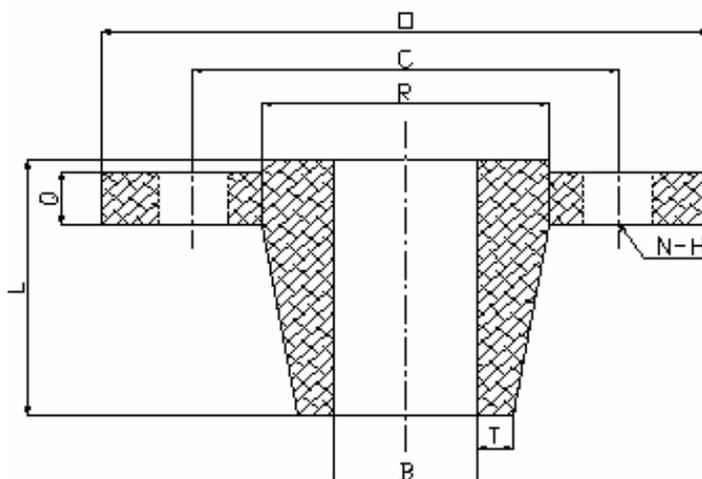
FIGURA 3.8 Esquema del tubo distribuidor de metanol

TABLA 3.10 Dimensiones del tubo distribuidor de metanol

Longitud (l)		Distancia entre agujeros (l _a)		Diámetro (t)		Angulo (a)	Espesor (t)	
mm.	pulg.	mm.	pulg.	mm.	Pulg	-	mm.	pulg.
1010	39,7	18	0,71	50,8	2	50°	5,5	0,21

3.4.2.4 Bridas

Las dimensiones de las bridas a utilizar se presentan en la Tabla 3.11, las dimensiones están tabuladas en base a la figura 3.9.

**FIGURA 3.9** Esquema de las dimensiones de las bridas**TABLA 3.11** Dimensiones de las bridas

CONEXIÓN	DESCRIPCIÓN	O mm	B mm	T mm	R mm	Q mm	L mm	C mm	N-H mm
A-ent.	ASME 300#RF WN-8	381	193	12,7	270	67	137	330	25
A-sal.	ASME 300#RF WN-4	254	97	8,6	157	45	99	200	22
B-ent./sal.	ASME 300#RF WN-6	318	146	11	216	57	119	270	22
C-entr. metanol	ASME 300#RF WN-1	124	24	4,5	51	30	75	89	19

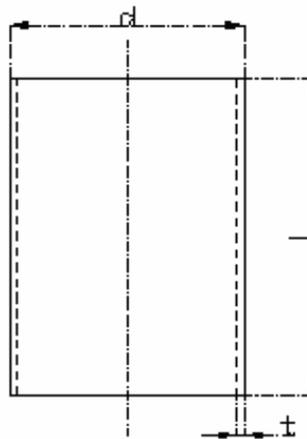
3.4.3 DIMENSIONES DE LA PLACA BASE, PEDESTAL Y PERNOS DE ANCLAJE.

3.4.3.1 Dimensiones del Pedestal

Las dimensiones de la columna (figura 3.10) sobre la que se asienta el intercambiador se indican en la Tabla 3.12

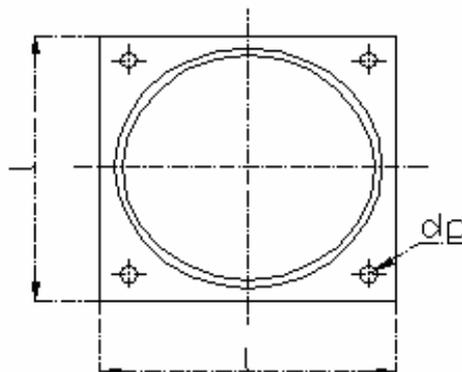
TABLA 3.12 Dimensiones del pedestal.

Longitud (l)		Diámetro(d)		Espesor de pared (t)	
mm	Pulg	mm	Pulg	Mm	pulg
482	18.97	324	12.75	9,5	0.375

**FIGURA 3.10** Esquema dimensiones del pedestal.

3.4.3.2 Placas base y pernos de anclaje

Las dimensiones de las placas se especifican en la tabla 3.13.

**FIGURA 3.11** Esquema de dimensiones de la placa base**TABLA 3.13** Dimensiones de placas base

	Longitud (l)		Espesor(e)		Diámetro de pernos (d_p)	
	mm	pulg.	mm	pulg.	Mm	pulg.
Placa A	360	14,17	12,7	0,5	22	0,88
Placa B	432	17	12.7	0.5	-	-

CAPITULO 4.

ELABORACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR Y CONTROL DE CALIDAD.

4.1 ELABORACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Una vez establecidos los materiales y las dimensiones en la parte del diseño, en este capítulo se dará a conocer una serie de indicaciones y recomendaciones para realizar el ensamblaje del intercambiador de calor, como se detalla en el anexo N° 3. Se hablará en principio del ensamblaje de cada uno de los componentes del intercambiador, indicándose de cada uno la preparación previa del material, el armado de sus partes y el control de calidad.

Para elaboración de los procesos de fabricación se considerará tres subconjuntos que forman el intercambiador, estos se enumeran a continuación:

- Compacto y capas protectoras.
- Cabezales, boquillas y bridas.
- Pedestal y placas base.

4.1.1 COMPACTO Y CAPAS PROTECTORAS.

El compacto está formado por varias partes, estas son aletas, placas separadoras y barras laterales que son las que tienen doble función, una de ellas es transferir calor entre los flujos y la otra es soportar las presiones de trabajo. Las capas protectoras y los nervios que las sujetan son para contrarrestar golpes, polvo y otros agentes externos que puedan dañar al compacto.

4.1.1.1 Trazo y corte de los materiales.

Todos los elementos que conforman el compacto y las placas protectoras se obtienen de planchas de aluminio de aleación 3003 TO, por lo que la única diferencia de preparar los materiales son las dimensiones de cada uno de ellos.

Luego de la recepción de los materiales, se realiza el trazo y corte de las placas. El corte debe ser realizado por medios mecánicos, de tal manera que se obtenga la cantidad mínima de defectos, y la remoción de aristas vivas sea fácil de realizar.

4.1.1.2 Ensamblaje del compacto.

El ensamblaje del compacto se lo realiza por soldadura fuerte, ya que los espesores de las partes que lo forman son pequeños y porque los espacios reducidos de las aletas impiden la realización de otro tipo de unión.

La soldadura fuerte une materiales calentándolos en presencia de un material de aporte que tienen un cambio a fase líquida por encima de 450 °C (840 °F), pero por debajo del cambio a fase sólida de los metales bases.

Los tipos de soldadura fuerte se pueden realizar de diferente manera y pueden ser con soplete, en horno, por inducción, por resistencia y por inmersión.

4.1.1.2.1 Soldadura fuerte con soplete.

Es un método en el que para alcanzar la temperatura de soldadura se usa uno o más sopletes de gas. El gas combustible (acetileno y propano) se puede quemar con aire, aire comprimido u oxígeno.

4.1.1.2.2 Soldadura fuerte en horno.

Es un método que permite hacer varias juntas al mismo tiempo, las juntas son colocadas en un horno a temperatura intermedia entre el punto de fusión del metal base y el del metal de aportación. Esta soldadura se pueden realizar en hornos con atmósfera protegida con aire seco o gases inertes o en hornos al vacío de 1×10^{-6} Torr.

4.1.1.2.3 Soldadura fuerte por inducción.

Las piezas a ser unidas se colocan dentro o cerca de una bobina que transporta corriente alterna. Esto hace que la temperatura de fusión del material de aporte sea alcanzada.

4.1.1.2.4 Soldadura fuerte por resistencia.

Se lo realiza mediante el flujo de una corriente eléctrica que circula a través de los electrodos y de la unión que se va a soldar, las piezas que forman la unión se convierten en parte del circuito eléctrico

4.1.1.2.5 Soldadura fuerte por inmersión.

La soldadura fuerte por inmersión consiste en sumergir las piezas en un baño de fundente líquido o baño de metal fundido siendo colocado el metal de aportación cerca de las juntas a efectuar.

La soldadura en baño de fundente líquido consiste en colocar en un recipiente metálico o de cerámica, el fundente que será derretido por calor que puede aplicarse externamente con un soplete o internamente con un elemento de calefacción por resistencia eléctrica.

En cambio el baño de metal fundido consiste en calentar un crisol de grafito hasta la temperatura requerida para mantener el metal de aporte en estado fluido. Una capa de fundente cubre el metal de aporte fundido.

Una vez analizados todos los métodos anteriores, para el ensamblaje del compacto se recomienda en nuestro medio hacerlo en un horno con atmósfera protegida, porque se puede realizar todas las juntas al mismo tiempo, se puede mantener control efectivo de temperatura y en especial porque sería fácil adecuar un horno usado en la industria para la unión de las juntas.

Para realizar la unión de las juntas en el compacto se debe tener presente algunas recomendaciones como la limpieza de las piezas, el material de aporte, fundentes, gas de protección, tipos de juntas y la forma de las piezas a soldarse. Estos parámetros se detallan a continuación:

4.1.1.2.6 *Materiales de aporte.*

Según el Manual de Soldadura fuerte⁽¹¹⁾ los materiales de aporte para uniones de aluminio y aleaciones de aluminio (1060, 1100, 3003, 3004, 3005, 5005, 5050, 6053, 6061, 6062, 6063) son BAlSi-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Los BAlSi-2, 3, 4, 5 son usable en soldadura al horno y por inmersión. Los BAlSi-3, 4, 5 también se pueden usar en el braceado con soplete; el material de aporte BAlSi-2 esta disponible únicamente en laminas y es usado específicamente en los procesos de soldadura por horno y por inmersión; los BAlSi-6, 7, 8 son emplean en la soldadura de aluminio en horno al vacío.

Las composiciones químicas, rangos de temperatura para la soldadura y las formas en las se encuentran los materiales de aporte se especifican la Tabla N° 7 del Anexo N° 1. En este proceso siguiendo las recomendaciones dadas por el manual de soldadura fuerte ⁽¹¹⁾ se empleara el material de aporte BaSi-4, en forma de polvo.

4.1.1.2.7 *Fundentes*

Los fundentes son usados cuando la soldadura se produce en un ambiente abierto o que contienen oxígeno, empiezan a activarse antes de que la temperatura de soldadura sea alcanzado y se derriten en el rango de temperatura de acuerdo al tipo de fundente, el fundente penetra la película de óxido, excluye al aire y ayuda a la capilaridad del material de aporte sobre el metal base.

Los fundentes recomendados ⁽¹¹⁾ para la soldadura fuerte de las aleaciones de aluminio son los denominados del Tipo 1. Su rango de temperatura es de 371-643 °C, y pueden ser fluoruros o cloruros de sodio, potasio y litio, la forma de este fundente es en polvo.

4.1.1.2.8 *Atmósferas protectoras.*

Se emplea nitrógeno o cualquier gas inerte.

4.1.1.2.9 Juntas para soldadura fuerte

El manual de soldadura fuerte ⁽¹¹⁾ recomienda para la unión de aleaciones de aluminio los tipos de juntas que se indican en la figura 4.1.

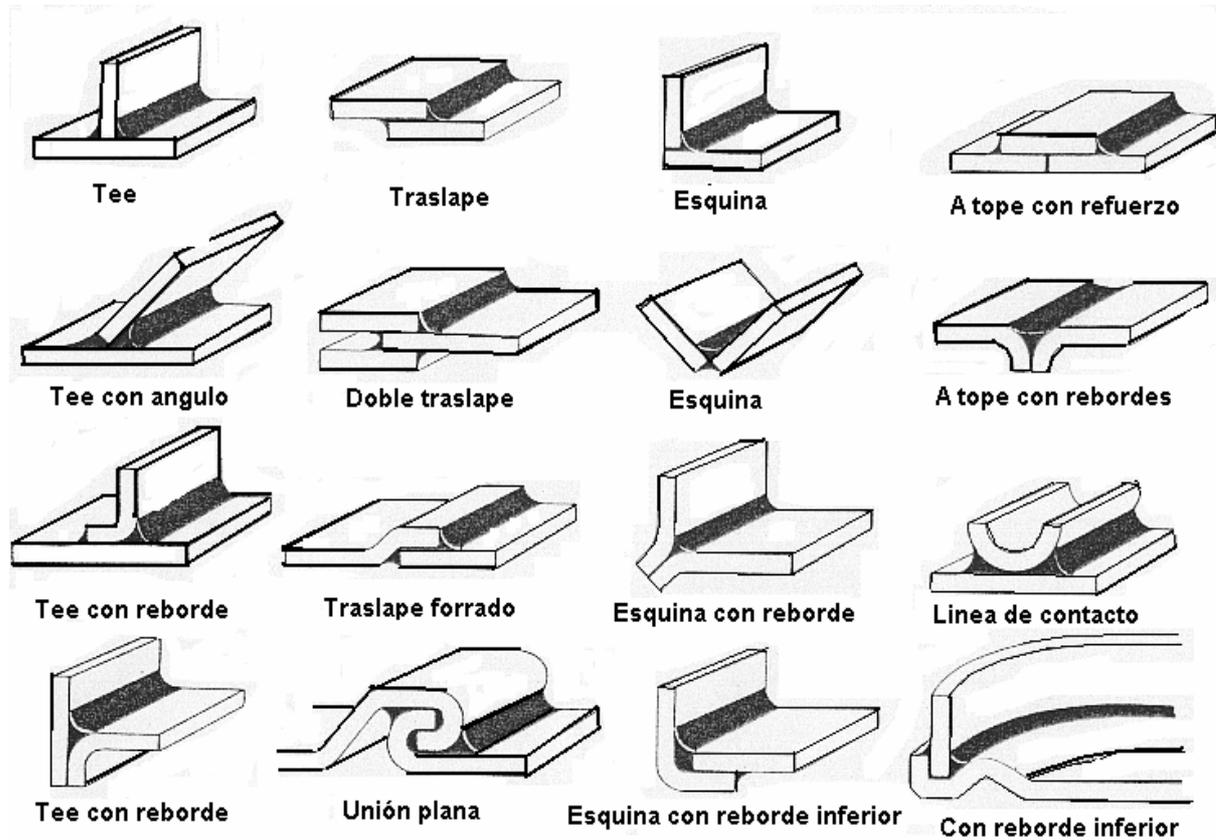


FIGURA 4.1 Juntas recomendadas para soldadura fuerte de aleaciones de aluminio.

EL tipo de junta que se empleara en la soldadura del compacto es la del tipo “línea de contacto”, que se puede apreciar en la figura 4.1.

4.1.1.2.10 Proceso de ensamblaje.

Para ensamblar el compacto para la soldadura se debe seguir los siguientes pasos:

4.1.1.2.11 Limpieza de las piezas.⁽¹¹⁾

Una vez que los elementos que conforman el compacto han sido preparados, estos se deben desengrasar y decapar cuidadosamente siguiendo los siguientes pasos:

Desengrase: Con solvente o vapor

Baño 1: En hidróxido de sodio al 5% a 60 °C, alrededor de 60 segundos

Lavado: Con agua fría

Baño 2: 50 % de ácido nítrico, durante 10 segundos

Enjuague: Con agua fría o caliente

Escurrido y Secado.

Luego de realizada la limpieza es importante manipularlas con cuidado las piezas para no ensuciarlas.

4.1.1.2.12 Ensamblaje.

Para el ensamblaje del compacto se dan a continuación los pasos a seguir, estos son ilustrados en el Plano DM-2142-002 en el Anexo N° 4.

- Se coloca la capa protectora en forma horizontal.
- Colocar el material de aporte en los lugares a realizarse la unión, asegurándose que cubra las partes a ser unidas.
- Se coloca las barras laterales y el conjunto de nervios de sujeción de la capa protectora.
- Verificar que los nervios, placa protectoras, barras laterales y el material de aporte estén alineados de tal manera que se asegure la capilaridad del material de aporte.
- Los elementos deben sujetarse para evitar que se desalineen.
- Colocar un nuevo conjunto de láminas de material de aporte sobre los nervios y barras laterales.

- Sobre esta se debe colocar las placas separadoras y se repite los pasos anteriores, pero en lugar de los nervios se debe colocar las aletas para los flujos A y B alternadamente hasta completar el número de pasajes establecidos para cada uno.

4.1.1.2.13 Proceso de Soldadura Fuerte

Una vez ensamblado el compacto, este está listo para ser soldado en el horno, el horno debe estar lleno del CO₂ o de cualquier gas inerte asegurando que no quede oxígeno en el interior que pudiese causar oxidación.

Según el material de aporte seleccionado (BAISi-4), el rango de temperatura de soldadura fuerte es de 577-582 ° C, la temperatura de soldadura debe ser alcanzada lentamente con el fin de que todos los elementos tengan la misma temperatura.

Cuando la temperatura de soldadura sea alcanzada, esta tiene que mantenerse el tiempo necesario para que todas las juntas sean unidas.

El horno junto con el compacto debe enfriarse lentamente, de tal manera que no se produzca un tratamiento térmico en el material o en las soldaduras.

Finalmente realizar una limpieza en los conductos.

4.1.2 CABEZALES, BOQUILLAS Y BRIDAS.

4.1.2.1 Introducción.

En esta parte se indicara los requerimientos para la construcción y armado de estos elementos que en conjunto serán unidos al compacto.

4.1.2.1.1 Cabezas.

Para la construcción de los cabezales se deben seguir los pasos que se indican a continuación.

- Los cabezales se los fabrica de laminas de aluminio de aleación 5083 TO. Por tanto es indispensable trazar y cortar los cabezales de acuerdo a las dimensiones que se indican en los planos.
- Se rolan las láminas dándoles la forma semicilíndrica de acuerdo a los planos.
- Los cabezales deben tener aberturas en las que irán conectadas y soldadas las boquillas, estas aberturas son realizadas por fresado y deben ajustarse al diseño de la junta a emplearse, tal como se indica en el plano DM-2142-002 en el anexo N° 4.

4.1.2.1.2 Boquillas y bridas

Las boquillas serán fabricadas a partir de tubos de medidas estándares, éstas deben ser cortadas de acuerdo a las medidas establecidas en el diseño y dejarlas listas para las soldaduras de acuerdo a lo que se indica en los planos.

Las bridas serán adquiridas de acuerdo a las dimensiones obtenidas en el cálculo que se realizo en el capítulo anterior y que están tabuladas en el plano DM-2142-001.

4.1.2.1.3 Ensamblaje.

Para realizar la unión de estas partes se debe seguir lo estipulado en los planos de ensamblaje, que se diseñan en base a recomendaciones de la Norma ASME sección VIII⁽¹⁾.

Los materiales de estos elementos son de aluminio, por lo que las juntas pueden unirse por soldadura de arco eléctrico, la soldadura se puede realizar con cualquiera de los procesos recomendados en la Subseccion B, Parte UW, Párrafo UW 27 que podrían ser: soldadura con electrodo revestido (SMAW), soldadura eléctrica con protección de gas (GMAW) o soldadura con electrodo no consumible (GTAW), estos deben cumplir con la calificación tanto del soldador como el procedimiento de soldadura a usarse de acuerdo al Sección IX del código ASME.

Se recomienda realizar la unión de partes sometidas a altas presiones el proceso GTAW para el pase de raíz y como pases complementarios o de relleno el proceso GMAW.

Las juntas indicadas en los planos de ensamblaje, son únicamente recomendaciones según el Manual de soldadura de la AWS.⁽¹³⁾

4.1.3 PEDESTAL, PLACAS BASE Y PERNOS DE ANCLAJE.

El pedestal y las placas base son fabricados de aluminio 5083 temple O. Para la construcción del pedestal y la placa se debe trazar, cortar en base a las dimensiones establecidas en el diseño, en el caso del pedestal, la plancha debe ser rolada como se indica en los planos.

4.2 CONTROL DE CALIDAD.⁽¹⁾

El ensamble descrito anteriormente debe cumplir con los requerimientos de control de calidad de acuerdo al código ASME, Sección VIII⁽¹⁾, aquí se hará una descripción de los métodos de inspección para los recipientes de presión.

4.2.1 EXAMINACIÓN VISUAL

Se debe realizar una inspección visual antes, durante y después de las soldaduras. Previa a la unión de las juntas se debe verificar que no existan protuberancias superficiales de los materiales, que los elementos estén alineados correctamente, que las superficies libres de rebabas y que no haya presencia de óxido.

Durante la Soldadura el inspector debe controlar que los procedimientos de soldadura sean realizados correctamente, es decir, verificar todos los parámetros presentes en los WPS, PQR, WPQ.

Luego de la soldadura se verificara que las tolerancias estén de acuerdo a lo estipulado, que no existan fallas en la soldadura como socavaciones, grietas, faltas de fusión, etc.

4.2.2 RADIOGRAFÍA

En el párrafo UW 11 del código ASME Sección VIII, División 1, subsección B, indica que en recipientes o intercambiadores por el que pasen sustancias letales, se debe realizar una inspección radiográfica total en las soldaduras.

Las radiografías serán realizadas con equipos y personal calificado de acuerdo a la Sección V del código ASME.

4.2.3 TINTAS PENETRANTES

Otro método de evaluar las fallas es el denominado de tintas penetrantes, que consiste en detectar fallas que no son perceptibles al ojo humano por medio de colorantes, esta evaluación se realiza en base al artículo 6 “Examinación por tintas penetrantes” del código ASME sección V.

4.2.4 PRUEBA DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Los recipientes fabricados deben ser probados hidrostáticamente para detectar fugas y determinar la capacidad de operación a las condiciones de funcionamiento. El procedimiento para la realización de esta prueba se indica en el código ASME, sección VIII, división 1, UG – 99, en la que estipula que los recipientes diseñados para soportar presiones internas deben someterse a la prueba hidrostática, esta presión es igual a 1.3 veces la máxima presión de trabajo permitida (MAWP) multiplicado por la relación más baja de esfuerzos.

$$P = 1.3 \times \text{MAWP} \times \text{Relación más baja de esfuerzos}$$

$$P = 1.3 * 710 (\text{psi}) * 1 = (923 \text{ psi})$$

Donde:

$$\text{Relación de esfuerzos} = \frac{S_a \text{ a temp. de prueba}}{S_a \text{ a temp. de diseño}}$$

S_a = Esfuerzo Admisible del Material.

La prueba hidrostática debe ser realizada a todo el recipiente luego de que, el recipiente este casi construido por completo, excepto las partes que necesiten de la prueba hidrostática para su instalación o ensamblaje y de que todos los requerimientos previos a la prueba hidrostática estén concluidos.

En el caso del intercambiador de calor se tienen cámaras adyacentes que operan independientemente, para este caso el código recomienda que la prueba hidrostática se la realice a cada cámara como un recipiente separado.

La temperatura del metal recomendada durante la prueba hidrostática debe mantenerse por lo menos 17°C (30°F) sobre la mínima temperatura del metal de diseño, pero no debe exceder los 48°C (120°F) para minimizar el riesgo de fractura frágil. La presión de prueba no debe ser aplicada hasta que el recipiente y su contenido estén a la misma temperatura.

Para la prueba se requiere que de acuerdo a la posición del aparato en la que se va a realizar el ensayo, se realicen aberturas en las partes mas altas del equipo, para que el aire contenido en el interior escape del recipiente mientras este se llena.

Antes de aplicar la presión, el equipo debe ser examinado y comprobar que todas las instalaciones estén bien sujetas, se debe verificar que el recipiente a ser examinado este limpio y que las escalas de los manómetros hayan sido comprobados por lo menos a 1,5 veces la presión a utilizar.

La presión hidrostática debe incrementarse gradualmente en el recipiente hasta que la mitad de la presión de prueba sea alcanzada, luego la presión debe ser incrementada en pasos de aproximadamente un décimo de la presión de trabajo hasta que la presión de la prueba sea alcanzada. La presión se mantendrá luego de cada incremento durante el tiempo suficiente para que el observador realice las inspecciones, y deberá descargarse a cero para determinar si existe algún esfuerzo permanente luego de los incrementos de presión.

La inspección visual debe ser hecha a todas las juntas y conexiones. Esta inspección debe realizarse a una presión no menor a la presión de prueba dividida

por 1,3. Durante la inspección visual en las juntas soldadas no debe existir presencia de humedad o goteo.

4.2.5 PRUEBA NEUMÁTICA

La prueba neumática puede reemplazar a la prueba hidrostática a menos que la prueba neumática se aplique cuando el recipiente no haya sido diseñado para soportar la fuerza que ejerce al estar lleno de agua, o donde no se pueda realizar la prueba hidrostática.

La presión de prueba neumática (P) deberá ser mínimo 1.1 veces MAWP multiplicada por la relación más baja de esfuerzos:

$$P = 1.1 \times \text{MAWP} \times \text{Relación más baja de esfuerzos}$$

$$P = 1.1 \times 710(\text{psi}) \times 1 = (781 \text{ psi})$$

Donde:

$$\text{Relación de esfuerzos} = \frac{S_a \text{ a temp. de prueba}}{S_a \text{ a temp. de diseño}}$$

S_a = Esfuerzo Admisible del Material.

La temperatura del metal durante la prueba neumática debe mantenerse al menos 17°C (30°F) sobre la temperatura mínima de diseño para minimizar el riesgo de fractura frágil, pero no deberá exceder los 48°C (120°F).

La presión en el recipiente deberá ser gradualmente incrementada a no más que la mitad de la presión de prueba. Después de esto, la presión de la prueba se aumentará en los pasos de aproximadamente un-décimo de la presión de la prueba hasta que la presión de la prueba requerida se ha alcanzada. Luego se debe reducir la presión en un valor igual a la presión de prueba dividido para 1.1 dando un tiempo suficiente para permitir la inspección. Esta prueba debe ser hecha para todos los recipientes que contengan sustancias letales. En el caso de no existir fugas la prueba realizada será aprobada

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- El procedimiento de construcción del intercambiador de calor es específicamente desarrollado en base a los requerimientos de la planta de gas.
- El cálculo térmico se lo realizó en base a ecuaciones dadas en la norma ALPEMA, que son las mismas que están desarrolladas en libros de transferencia de calor, empleando como modelo básico un arreglo de aletas.
- La geometría de los pasajes aleteados puede variar de acuerdo al espesor, alto y paso de las aletas, es decir, pueden existir varias soluciones para el arreglo de aletas para un mismo problema.
- Una de las mayores dificultades que se presentan en este tipo de intercambiadores durante la operación es el taponamiento de los conductos, una explosión puede producirse por la filtración de agua en los gases, el agua puede solidificarse en el momento de atravesar el intercambiador.
- El coeficiente de transferencia de calor es elevado con respecto a los parámetros típicos de estos valores, debido al cambio de fase que presentan los flujos al pasar por el intercambiador.
- Las bridas se calculan porque el aluminio no se considera en los grupos de los materiales de la norma ASME B16-5, que es la norma donde se selecciona las bridas de acuerdo a la presión de trabajo.
- El coeficiente de transferencia de calor es menor para los gases que para los líquidos, por lo que el paso de las aletas para cada uno de los fluidos es diferente, es por esto, que se existe mayor número de aletas en el pasaje del gas de entrada a ser condensados.
- En este documento los fluidos que pasan a través de los pasajes están en forma laminar, en el caso que existan turbulencias únicamente se debe obtener los valores que dependen de este tipo de flujo, empleando ecuaciones específicas para cuando el flujo es turbulento.

- Las juntas y procedimientos de unión de las partes del intercambiador en este proyecto son únicamente recomendaciones, previo a la construcción los procesos de soldadura y los soldadores deben ser calificados, de acuerdo a los parámetros y pruebas que se estipulan en el código ASME Sección IX.

CAPITULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

- Se logra alcanzar el objetivo principal que es la elaboración del proceso de fabricación de un intercambiador de calor que se planteó al inicio proyecto, permitiendo recopilar información y datos tecnológicos con los que se realiza la construcción de este tipo de intercambiadores.
- El proyecto realizado, es trascendental porque permite iniciar el desarrollo de una “tecnología propia”, estableciendo los parámetros técnicos necesarios para la construcción de intercambiadores de calor compactos del tipo placas y aletas.
- Este documento permitió conocer, entender y aplicar conceptos de ingeniería, código ASME y norma ALPEMA, básica para el dimensionamiento y construcción de intercambiadores de calor de placas y aletas sometidos a presión.
- El proceso de fabricación que se plantea tiene como fundamento principal la posibilidad de desarrollar la construcción de este intercambiador en instalaciones dentro del País y de esta manera evitar la importación de equipos industriales, permitiendo así, reducir los gastos de mantenimiento.
- En la presente investigación se desarrolló conceptos básicos de selección de materiales que pueden ser utilizados, partes del intercambiador que pudieran ser seleccionadas y/o fabricadas, pruebas técnicas a ser implementadas y recomendaciones de procesos de soldadura GTAW, GMAW y soldadura fuerte, permitiendo ser un documento de consulta y referencia para el usuario.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Se debe exigir al fabricante o al proveedor de los materiales una certificación del material que cumpla con las especificaciones de la ASME Sección II. en el que se indique el análisis químico y las propiedades mecánicas del material.
- Para poder realizar el diseño se deben realizar algunas suposiciones coherentes a fin de facilitar el desarrollo del dimensionamiento.
- Es recomendable en este tipo de intercambiadores por las pequeñas dimensiones de los pasajes aleteados acoplar boquillas de metanol para su limpieza y evitar taponamientos.
- Es importante evitar golpes en el intercambiador, ya que por sus pequeñas dimensiones en los pasajes aleteados pueden ocurrir deformaciones o daños irreparables.
- Es importante colocar dispositivos que controlen la presión de entrada de los flujos al intercambiador, con el fin de evitar que las presiones de trabajo no superen las presiones de diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ASME**; Sección VIII “Boiler and Pressure Vessel Code”; División 1” Rules for Construction of Pressure Vessels”; USA; 1998.
2. **ALPEMA**; “The Standards of the Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger Manufacturer’s Association”; 2000.
3. **INCROPERA, F**; “Fundamentos de Transferencia de Calor”; Prentice Hall; Mexico; 1999.
4. **PERRY**; “Manual del Ingeniero Químico”; McGraw-Hill; México; 1990.
5. **Manual de Operación de la Planta de Gas**; Complejo Industrial Shushufindi
6. **ASKELAND,D**; La Ciencia e Ingeniería de los Materiales; Grupo Editorial Iberoamerica; México; 1987.
7. **AVNER, S**; Introducción a la Metalurgia Física; McGraw-Hill; México; 1979.
8. **ASME**; Sección II “Material”; Parte B “Nonferrous Material Specification”; USA; 1995.
9. **MEGYESY, E**; “Pressure Vessel Handbook”; USA; 2001
10. **MARKS**; “Manual del Ingeniero Mecánico”; McGraw-Hill; México; 1981.
11. **AWS**; “Brazing Manual”; McGraw-Hill; USA; 1976
12. **ASME HANDBOOK**; “Metals Propieties”; McGraw-Hill; New York; 1954.
13. **AWS**; “Manual de Soldadura”; McGraw-Hill; México; 2000
14. **KAYS, W. AND LONDON, A.**; "Compact Heat Exchangers", McGraw Hill, New York, 1964.
15. **www.pemex.com**
16. **CHANG, R.**; “Química”; McGraw-Hill; México; 2003
17. **ASME B16-5**; Pipe Flanges and Flanged Fittings”; USA; 1996

ANEXOS