

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE
DESTILACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES
ESÉNCIALES, USANDO LOS MÉTODOS DE
HIDRODESTILACION, ARRASTRE CON VAPOR Y
DESTILACIÓN AGUA / VAPOR**

**HARBAY ALEXIS LIZARAZO MARTÍNEZ
RUBEN DARIO FONTECHA CUADROS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE
DESTILACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES
ESÉNCIALES, USANDO LOS MÉTODOS DE
HIDRODESTILACION, ARRASTRE CON VAPOR Y
DESTILACIÓN AGUA / VAPOR**

**HARBey ALEXIS LIZARAZO MARTÍNEZ
RUBEN DARIO FONTECHA CUADROS**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Directores

Dra. Elena Stachenko

Escuela de química

Ing. Omar Gelvez Arocha

Escuela de Ingeniería Mecánica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico:

A Dios por brindarme fortaleza y sabiduría,

A mis padres por el gran amor que me brindan en todo momento,

A mis hermanos por todo el apoyo recibido,

A mi tío David Lizarazo por toda su ayuda,

A Diana Orduz por su apoyo constante y comprensión,

A nuestros directores por su desinteresada colaboración,

A mis compañeros de Ingeniería Mecánica por su invaluable amistad.

HARBEY ALEXIS LIZARAZO MARTÍNEZ

DEDICATORIA

*Este trabajo de grado lo dedico a quienes
siempre me apoyaron:
A Maria Luisa Cuadros Mancipe
mi madre, por el constante apoyo en
las decisiones que he tomado, por
mostrarme el camino de la rectitud y por
ser quien es, "Mi ejemplo de vida"; A
Sandra Milena, Libia, Robinsón y Yesenia mis hermanos,
por sus enseñanzas y apoyo incondicional.
A mis familiares y amigos, por permitirme
formar parte de sus vidas,
Y sobre todo A DIOS, por ponerme aquí.*

RUBEN DARIO FONTECHA CUADROS.

AGRADECIMIENTOS

A todos los que de una u otra forma colaboraron con la elaboración de este proyecto, nuestros directores Dra. Elena Stachenko, Ing. Omar Armando Gelvez Arocha, codirector Dr. Jairo Rene Martínez, al grupo CENIVAM, así como también a nuestros compañeros Mario Alexander Malagón Vela y Roque Quiroga Vargas.

LOS AUTORES

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 <i>OBTENCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES.....</i>	2
1.2 <i>HIDRODESTILACIÓN O DESTILACIÓN CON AGUA.....</i>	3
1.3 <i>DESTILACIÓN AGUA / VAPOR.....</i>	4
1.4 <i>DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR.....</i>	5
1.5 <i>RECOMENDACIONES PARA EL PROCESO DE DESTILACIÓN.....</i>	6
1.6 <i>GENERALIDADES DE LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN.....</i>	7
1.7 <i>FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN.....</i>	11
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR	15
2.1 <i>FACTORES DE DISEÑO.....</i>	15
2.2 <i>CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO.....</i>	18
2.3 <i>DISEÑO DEL CUERPO DEL DESTILADOR.....</i>	27
2.4 <i>DISEÑO DEL CARTUCHO.....</i>	36
2.5 <i>DISEÑO DEL DISTRIBUIDOR DE VAPOR.....</i>	39
2.6 <i>DISEÑO DEL CUELLO DE CISNE.....</i>	42
2.7 <i>CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR.....</i>	45
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR.....	47
3.1 <i>DISEÑO TÉRMICO.....</i>	47
3.2 <i>DISEÑO MECÁNICO.....</i>	81
3.3 <i>CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR.....</i>	103
4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR DE ACEITES ESENCIALES.....	111
4.1 <i>DISEÑO DEL SEPARADOR DE ACEITES ESENCIALES.....</i>	112
4.2 <i>Construcción del separador.....</i>	116
RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	121
ANEXOS.....	123
<i>Anexo A. Tabla de propiedades mecánicas acero AISI 304.....</i>	123
<i>Anexo B. Tubería de cobre tipo K, L Y M, Norma ASTM B-88.....</i>	125
<i>Anexo C. Empaques.....</i>	126

<i>Anexo D. Valores de esfuerzos permitidos, UHA 23</i>	<i>127</i>
<i>Anexo F. Especificaciones para la fabricación de los equipos</i>	<i>129</i>
<i>Anexo G. CENIVAM.....</i>	<i>131</i>
<i>Anexo H. Fotos de construcción.....</i>	<i>134</i>
<i>Anexo I. Fotos equipo de destilación.....</i>	<i>136</i>

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Posibles flujos para el proceso agua vapor	13
Tabla 2. Composición acero AISI 304	27
Tabla 3. Datos del proceso	49
Tabla 4. Constantes para el cálculo del factor de transferencia	55
Tabla 5. Espesores mínimos de cascos de intercambiadores	88
Tabla 6. Cálculo de la placa portatubos	92
Tabla 7. Cálculo de la brida en el casco	98
Tabla 8. Cálculo de la brida en los cabezales	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Hidrodestilador	3
Figura 2. Destilación agua - vapor	4
Figura 3. Destilación arrastre por vapor	5
Figura 4. Equipo de destilación industrial	7
Figura 5. Alambique	8
Figura 6. Condensador	10
Figura 7. Destilador y separador de aceites.	11
Figura 8. Piso a desnivel como solución a la altura del equipo.	20
Figura 9. Plataforma elevada como solución a la altura del equipo.	20
Figura 10. Base en concreto soportando el cuerpo del equipo para destilación agua - vapor	21
Figura 11. Equipo de evaporación de agua mediante chaqueta de vapor tipo marmita	21
Figura 12. Equipo de arrastre con vapor con sellado en la parte inferior.	22
Figura 13. Cuerpo del destilador dividido en tres secciones, base (1), cartucho (2) y cuello de cisne (3).	23
Figura 14. Disposición final	24
Figura 15. Diseño definitivo del equipo de destilación	25
Figura 16. Cálculo de la lámina del fondo.	34

Figura 17. Diseño del cartucho	36
Figura 18. Oreja de izaje para el cartucho	38
Figura 19. Detalle constructivo distribuidor de vapor	41
Figura 20. Cuello de cisne.	42
Figura 21. Dispositivo de cierre	44
Figura 22. Construcción del destilador.	45
Figura 23. Zonificación del condensador	47
Figura 24. Combinación adecuada de diámetros casco-tubo.	49
Figura 25. Geometría del arreglo de 30° en los tubos	50
Figura 26. Corte del bafle.	51
Figura 27. Factor J_i en función de Re para un arreglo a 30°, con parámetro L_{tp}/D_t	56
Figura 28. Separación entre bafles	57
Figura 29. Geometría del área transversal del Condensador.	60
Figura 30. Designación de intercambiadores.	84
Figura 31. Diseño mecánico del condensador.	85
Figura 32. Configuraciones de los bafles	89
Figura 33. Valores recomendados del corte del bafle	90
Figura 34. Bridas del casco	98
Figura 35. Brida en los cabezales	100
Figura 36. Construcción del condensador	102

Figura 37. Tolerancias de fabricación.	103
Figura 38. Tolerancias generales en medidas y posiciones	105
Figura 39. Separadores de aceites esenciales pesados y ligeros.	111
Figura 40. Separador de aceites ligeros.	112
Figura 41. Medidas del separador de aceites esenciales.	114
Figura 42. Separador de aceites del tipo vaso florentino.	115
Figura 43. Tubos del recipiente separador.	117

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tabla de propiedades mecánicas acero AISI 304	121
Anexo B. Tubería de cobre tipo K, L, M, norma ASTM B-88	123
Anexo C. Empaques	124
Anexo D. Valores de esfuerzos permitidos, UHA 23 sección VIII CODE ASME	125
Anexo E. Factores geométricos involucrados en el cálculo de esfuerzos sobre las bridas	126
Anexo F. Especificaciones para la fabricación de los equipos	127
Anexo G. CENIVAM	129
Anexo H. Fotos de construcción	132
Anexo I. Planos	133

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE DESTILACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESÉNCIALES, USANDO LOS MÉTODOS DE HIDRODESTILACION, ARRASTRE CON VAPOR Y DESTILACIÓN AGUA / VAPOR. *

AUTORES:

Harbey Alexis Lizarazo Martínez**

Rubén Dario Fontecha Cuadros

PALABRAS CLAVES:

Aceites esenciales, hidrodestilación, destilación agua/vapor, destilación arrastre con vapor, alambique, diseño, construcción.

DESCRIPCION

La producción de aceites esenciales es una actividad de gran tradición en muchos países y tienen una amplia comercialización en el mercado mundial, dado que la flora nativa, los frutos, las hortalizas, las hojas de árboles, he incluso las malezas sirven de materia prima para su elaboración, este mercado se constituye en una importante opción de negocios para nuestro país y una alternativa para el agro Colombiano.

Con el fin de determinar variables necesarias para la construcción de plantas de extracción a nivel industrial, es necesaria la construcción de un equipo de pruebas a nivel de planta piloto que junto con los datos de laboratorio permita obtener unas bases sólidas para el crecimiento de esta industria; siendo este un patrón que servirá para futuras construcciones de equipos de destilación en diferentes regiones de nuestro país ya que según estudios de la producción de aceites esenciales se obtiene una rentabilidad alta buscando iniciar esta nueva industria.

El equipo diseñado y construido producto de este proyecto, logra en un mismo alambique realizar extracciones con los métodos mas utilizados a nivel tanto industrial como artesanal, estos métodos son: hidrodestilación, destilación agua/vapor y destilación por arrastre con vapor, este es un equipo del tipo cartucho desmontable con capacidad para 50kg. de material vegetal.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Ing. Omar Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION A DISTILLATION EQUIPMENT FOR ESSENTIAL OILS EXTRACTION, USING THE METHODS OF HYDRODISTILLATION, WATER DISTILLATION AND STEAM DISTILLATION *

AUTHORS:

Rubén Dario Fontecha Cuadros
Harbey Alexis Lizarazo Martínez**

KEY WORDS:

Essential oils, hydrodistillation, water distillation, steam distillation, still, design, construction.

DESCRIPTION:

The production of essential oils is an activity of great tradition in many countries and has a wide commercialization in the world market, due to the native flora, fruits, vegetables, leaves of trees and shrub even serve as raw material for its elaboration, this market is constituted in an important option of thr business for our country and an alternative for the Colombian agriculture.

With the purpose of determining necessary variables for the construction of extraction plants at industrial level, it is necessary the construction of tests equipment at a level pilot plant together with the laboratory data allow obtaining some solid bases for the growth of this industry; It is a pattern that will serve for constructions future of equipments distillation in different regions our country according to studies of the essential oils production is obtained a high profitability looking for to begin in this new industry.

The designed and built equipment product by this project, achieves in only one still to carry out extractions with the most used methods at industrial levels as handmade, and these methods are: hydrodistillation, water distillation, steam distillation, it is a equipment of the type collapsible cartridge with capacity for 50kg. vegetal material.

* Degree Work

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gelvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

La producción de derivados de plantas medicinales y aromáticas es una actividad de gran tradición en muchos países, lo que no ocurre en Colombia a pesar de su abundante biodiversidad, pues se le ha dado más importancia a cultivos como el café o el banano, los cuales en la medida en que han perdido rentabilidad han afectado la calidad de vida de la población campesina que muchas veces opta por cultivos ilícitos debido a la falta de oportunidades o de cultivos alternativos que le ayuden a mejorar sus condiciones, creando así nuevos conflictos.

Los Aceites Esenciales tienen amplia comercialización en el mercado mundial, se estima en unos 85 mil millones de dólares anuales; la mayor parte de los aceites se extraen de vegetales de distintas zonas agro climáticas. La flora nativa, las frutas, las hortalizas, las hojas de árboles y arbustos e incluso las malezas sirven de materia prima para su elaboración. De ahí que sean una opción de negocios para diferentes lugares en nuestro país.

La naciente industria de los aceites esenciales en nuestro país, apoyada por un grupo de entusiastas investigadores a la cabeza del CENIVAM⁹ y como producto de 15 años de trabajo, liderados por la profesora Elena Stashenko, el cual ha sido apoyado por importantes entidades públicas y privadas dentro de las que se encuentran 10 grupos de investigación, 5 universidades públicas, una fundación, 2 industrias privadas y entidades como Colciencias

⁹ Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales – CENIVAM

han alcanzado un punto en el cual se han realizado gran cantidad de estudios a nivel de laboratorio, pero en este momento es necesario determinar variables que se puedan extrapolar a nivel industrial y no es posible (o practico) hacerlo a través de pruebas de laboratorio, para ello es necesario diseñar y construir un equipo en el que se puedan realizar las pruebas a nivel de planta piloto, además de permitir la destilación de los primeras cosechas. Este equipo de destilación también será usado para la capacitación de empresarios, campesinos y comunidad en general, interesados en incursionar en la cadena productiva de aceites esenciales en sus diferentes etapas.

Es de aquí donde se busca diseñar y construir un equipo de destilación para la extracción de aceites esenciales que reúna tres métodos de destilación como son: hidrodestilación, arrastre con vapor y destilación agua /vapor, ya que actualmente en nuestro país no se cuenta con diseños ni equipos construidos para este propósito.

La capacidad de este equipo de destilación será de 50kg, suficiente para realizar pruebas a nivel piloto con el fin de poder extrapolar los resultados obtenidos a equipos de mayor capacidad.

En el diseño y construcción de estos equipos se tendrán en cuenta factores como son: las normas internacionales, manuales técnicos, libros y demás literatura necesaria para el diseño que serán aplicadas a procesos de transferencia de calor, manejo de materiales y dimensiones reglamentarias para ello; así como la experiencia y casos de diseño exitosos con

recomendaciones técnicas de equipos construidos y que se encuentran en operación en regiones de Tasmania, Australia.

Los materiales a seleccionar estarán sometidos a ambientes corrosivos y debido a que estos productos de corrosión pueden alterar la calidad del aceite obtenido, adquiere importancia una correcta selección; así como el costo, la facilidad de conformado y adquisición de dichos materiales en el mercado local.

Se cumplirá así con los objetivos de este trabajo de grado diseñando y construyendo un equipo de destilación, un condensador y un recipiente recolector que trabajaran bajo los métodos de hidrodestilación, arrastre con vapor y destilación agua / vapor de tipo cartucho desmontable con capacidad para 50 kg. de material vegetal; así como la elaboración de sus respectivos planos.

Este trabajo de grado servirá de guía y estandarte en el diseño y fabricación de dichos equipos, contribuyendo de esta forma con la misión de la Universidad Industrial de Santander de respaldar la investigación y el agro colombiano.

1. GENERALIDADES DE LA DESTILACIÓN

Los Aceites Esenciales o esencias vegetales son productos químicos que forman las esencias odoríferas de un gran número de vegetales. El término aceite esencial se aplica también a las sustancias sintéticas similares preparadas a partir del alquitrán de hulla, y a las sustancias semisintéticas preparadas a partir de los aceites naturales esenciales.

Los aceites esenciales son líquidos volátiles, en su mayoría insolubles en agua, pero fácilmente solubles en alcohol, éter y aceites vegetales y minerales. Por lo general no son oleosos al tacto. Pueden agruparse en cinco clases, dependiendo de su estructura química: alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas y lactonas y óxidos.

Los aceites esenciales se utilizan para dar sabor y aroma al café, el té, los vinos y las bebidas alcohólicas. Son los ingredientes básicos en la industria de los perfumes y se utilizan en jabones, desinfectantes y productos similares. También tienen importancia en medicina, tanto por su sabor como por su efecto calmante del dolor y su valor fisiológico.

Entre las industrias que utilizan Aceites Esenciales se encuentran las dedicadas a la producción de perfumes, cosméticos, plásticos, textiles, pinturas, papelería, alimentos, licores, medicamentos, biocidas, disolventes, tabacos y cigarrillos. El rendimiento de esencia obtenido de una planta varía de unas cuantas milésimas por ciento de peso vegetal hasta 1 e incluso 3%. La composición de una esencia puede cambiar con la época de la recolección, el

lugar geográfico o pequeños cambios genéticos. En gimnospermas y angiospermas es donde aparecen las principales especies que contienen aceites esenciales, distribuyéndose dentro de unas 60 familias. Son particularmente ricas en esencias las pináceas, lauráceas, mirtáceas, labiáceas, umbelíferas, rutáceas y asteráceas.

1.1 OBTENCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

Los aceites esenciales proceden de las flores, frutos, hojas, raíces, semillas y corteza de los vegetales. El aceite de espliego, por ejemplo, procede de una flor, el aceite de pachulí, de una hoja, y el aceite de naranja, de un fruto. Los aceites se forman en las partes verdes (con clorofila) del vegetal y al crecer la planta son transportadas a otros tejidos, en concreto a los brotes en flor.

Se desconoce la función exacta de un aceite esencial en un vegetal; puede ser para atraer los insectos para la polinización, o para repeler a los insectos nocivos, o puede ser simplemente un producto metabólico intermedio.

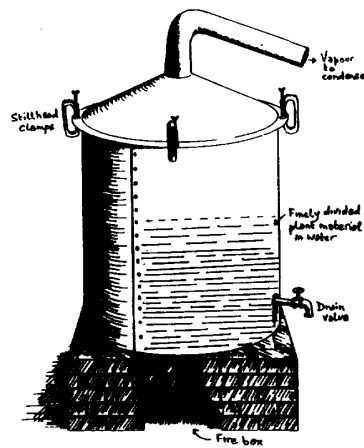
Existen diferentes métodos de obtención de aceites esenciales a partir de plantas aromáticas:

- Destilación con agua o hidrodestilación.
- Destilación con agua /vapor.
- Destilación por arrastre con vapor.
- Destilación previa maceración.
- Destilación sometida a una degradación térmica.
- Expresión.

1.2 HIDRODESTILACIÓN O DESTILACIÓN CON AGUA

El principio de destilación con agua es llevar a estado de ebullición una suspensión acuosa de un material vegetal aromático, de tal manera que los vapores generados puedan ser condensados y colectados. El aceite que es inmisible en agua, es posteriormente separado.

Figura 1. Hidrodestilador

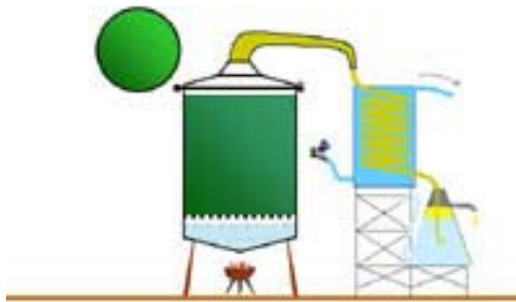


Este sistema de extracción es particularmente empleado en zonas rurales que no cuentan con instalaciones auxiliares para la generación de vapor. En la hidrodestilación el material siempre debe encontrarse en contacto con el agua. Un factor de especial importancia a considerar es de que, si el calentamiento del alambique es de fuego directo, el agua presente en el alambique deberá ser suficiente y permanente para llevar a cabo toda la destilación a fin de evitar el sobrecalentamiento y carbonización del material vegetal, dado que este hecho provoca la formación de olores desagradables en el producto final. El material vegetal en el alambique debe ser mantenido en constante agitación a fin de evitar aglomeraciones o sedimentación del

mismo en el fondo del recipiente, lo cual puede provocar su degradación térmica.

1.3 DESTILACIÓN AGUA / VAPOR

Figura 2. Destilación agua - vapor



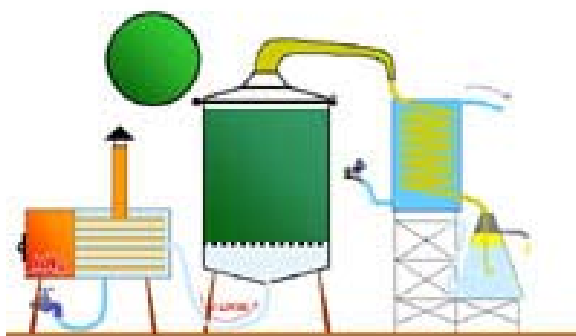
En este caso el vapor puede ser generado mediante una fuente externa o dentro de su propio cuerpo del alambique, aunque separado del material vegetal. Las hierbas se colocan sobre un fondo perforado o criba ubicado a cierta distancia del fondo de un tanque llamado retorta.

La parte mas baja de esta contiene agua hasta una altura algo menor que el nivel de la criba. El calentamiento se produce con vapor saturado que se provee de una fuente de calor que compone el equipo, fluye mojado y a presión baja, penetrando a través del material vegetal.

Si la cantidad de agua contenida en el alambique no es suficiente para sostener el proceso de destilación, es conveniente utilizar un sistema de cohobación a través del cual, el agua ya condensada es retornada al cuerpo del alambique para volver a ser calentada.

1.4 DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR

Figura 3. Destilación arrastre por vapor



La destilación por arrastre con vapor, es similar al anterior, pero en el fondo de la retorta no hay agua. La presión del vapor es una de las variables de trabajo, que se selecciona para el tipo de material vegetal a procesar. Este método de destilación puede considerarse el más sencillo, seguro e inclusive, el más antiguo, ya que se menciona en textos tan antiguos como la Biblia. Técnicamente el proceso está ligado a la producción de alcohol y está basado en que la mayor parte de las sustancias olorosas que se encuentran en una materia vegetal y pueden ser arrastradas por el vapor de agua. La destilación por arrastre con vapor que se emplea para extraer la mayoría de los aceites esenciales es una destilación de mezcla de dos líquidos inmiscibles y consiste, en resumen en una vaporización a temperaturas inferiores a las de ebullición de cada uno de los componentes volátiles por efecto de una corriente directa de vapor agua, el cual ejerce la doble función de calentar la mezcla hasta su punto de ebullición y disminuir la temperatura de ebullición por adicionar la

tensión de vapor, del vapor que se inyecta a la de los componentes volátiles de los aceites esenciales. Los vapores que salen del cuello de cisne se enfrían en un condensador donde regresan a la fase líquida, los dos productos inmiscibles, agua y aceite esencial y finalmente se separan en un separador o vaso florentino

En la destilación por arrastre con vapor, el vapor húmedo o seco se produce por separado en una caldera y se inyecta por la parte inferior del recipiente que contiene el material vegetal. La ventaja de este tipo de destilación “seca” es que es relativamente rápida, consume menos energía y causa menos transformaciones químicas a los componentes lábiles o reactivos de los aceites esenciales.

1.5 RECOMENDACIONES PARA EL PROCESO DE DESTILACIÓN

Es conveniente realizar la destilación inmediatamente después de cosechado el vegetal, y realizar un oreado o un desecado al aire que le quite algo de humedad. En el vegetal, los aceites esenciales se almacenan o sitúan en glándulas, conductos, sacos o pelos glandulares o simplemente reservorios dentro del vegetal, por lo que conviene hacer un desmenuzamiento del material a destilar para exponer esos reservorios a la acción del vapor de destilación.

El espesor del material, reducido, permite también una mejor vaporización y destilación, así como una aceleración del proceso. En lo que respecta a las partes de la planta que se va a destilar, las flores, hojas y partes blandas o delgadas pueden tratarse sin ningún tratamiento previo. Las semillas o frutos deben ser triturados con rodillos lisos, cuya separación en la maquina

depende del grosor de aquellos y también del grado de desmenuzamiento que se necesite. Las raíces, tallos y otros materiales leñosos, se cortaran en trozos pequeños o en astillas.

1.6 GENERALIDADES DE LOS EQUIPOS DE DESTILACIÓN

El equipo para destilar debe ser tal que permita la operación más conveniente cualquiera que sea el material vegetal del que se quieran destilar sus esencias.

En cambio, las dimensiones del equipo siempre deberán estar en concordancia con las cantidades de hierbas producidas y del tiempo disponible para su destilación.

Figura 4. Equipo de destilación industrial



1.6.1 Principales componentes. El primero, la retorta, alambique o cartucho, es donde se deposita el material a destilar.

Consiste en un tanque cilíndrico de un diámetro igual o algo inferior a la altura, que tiene en la parte superior una tapa que debe poder ser asegurada y su cierre debe ser hermético.

Figura 5. Alambique



Preferentemente del centro de esta tapa sale un tubo llamado "cuello de cisne" que es el conductor de los vapores hacia el condensador. La retorta se construye en diversos materiales de chapa cuyo espesor es también variable según el trabajo, pero es preferible que sea de acero inoxidable. En el fondo de la retorta se coloca la criba que soporta el material por destilar. Los tubos de conexión deben ser amplios y de acuerdo a la rapidez de destilación, más grande cuanto más veloz sea esta.

Debajo de la parrilla o criba, se encuentra el tubo de entrada de vapor, cuidando que entre el fondo y el tubo la distancia sea lo suficientemente grande, como para evitar que se produzca aquí la condensación de agua. La distribución del vapor se asegura por la disposición en espiral o en cruz, de la prolongación del tubo alimentador, que tiene también, una serie de agujeros chicos en la parte superior y a lo largo del mismo, dándole así uniformidad a la distribución. En el fondo de la retorta, hay una válvula de drenaje de capacidad suficiente como para permitir que cualquier cantidad de agua que se condense dentro de la carga y gotee hacia el fondo, pueda ser extraída durante la destilación.

Un alambique bien construido debe ser hermético; para esto deberá cuidarse el ajuste de las juntas y el cierre de la tapa. La carga de material no debe estar comprimida. El objeto principal es buscar que el vapor atraviese correctamente la masa vegetal y que no se deslice por las paredes de la retorta.

Debido a que el vapor se difunde por los lugares que le oponen menos resistencia, no son recomendables los cestos de alambres o perforados, pues el vapor tiende a dirigirse a través de las mallas y entre los costados del cesto y la retorta. Los mejores cestos son los que tienen costados de chapa sin agujeros, pero con el fondo perforado. El empleo de cestos ayuda a la carga y descarga del material, sobre todo en alambiques grandes.

La carga y descarga del alambique es un punto importante. Ahorra tiempo el contar con grúas y que el lugar de cultivo esté cercano al de la planta de

destilación. Después del cartucho continúa el condensador, allí vuelve a su estado líquido el vapor y los productos volátiles.

El condensador es un intercambiador de calor que no solo debe condensar el vapor destilado, si no también garantizar que el condensado salga a una temperatura en la cual el aceite esencial y el agua se separen adecuadamente. Corre agua fría que entra por la parte inferior y asciende en sentido contrario a los vapores de agua y aceite esencial que circulan por los tubos.

Figura 6. Condensador



Su diseño y construcción se rige bajo la aplicación de dos asociaciones norteamericanas. La norma TEMA (Tubular Exchange Manufactures Association) y por la sociedad ASME (American Society of Mechanical Engineers).

Finalmente tenemos los separadores de aceite esencial, llamados también frascos florentinos, son aquellos dispositivos destinados a realizar la separación del aceite esencial del vapor de agua condensado que se utilizó para su extracción del material vegetal.

Cuando la velocidad del condensado es demasiado alta como para dar tiempo a una buena separación de la esencia, o cuando hay demasiada turbulencia en la caída del líquido condensado, se suelen emplear más de un frasco separador, colocados en serie para lograr una mayor eficiencia.

1.7 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN

Figura 7. Destilador y separador de aceites.



Para llevar a cabo exitosamente el proceso se requiere: agua, electricidad y combustible, en este caso gas natural que será tomado directamente de la red domiciliaria y alimentará tanto la caldera, como los quemadores ubicados en la parte baja del destilador.

Del mismo modo hay que pensar en una serie de construcciones o instalaciones accesorias al destilador mismo, como son la sala de caldera, depósitos de materiales, depósitos de material vegetal a procesar o procesado, y del producto terminado, depósitos de agua, torre de

enfriamiento, accesorios para la descarga del material vegetal así como la disposición de una báscula. Para la carga y descarga del material vegetal y teniendo en cuenta que 50 kg (sin tener en cuenta el peso del cartucho), se hace necesaria la construcción de una grúa con el propósito de facilitar dicha operación.

Dependiendo del material a destilar seleccionamos el método de destilación apropiado: hidrodestilación, destilación agua /vapor o arrastre con vapor luego procedemos a llenar el cartucho o alambique con el material que se busca destilar, el cartucho tiene una capacidad de 50 Kg.

Para el método de hidrodestilación; se debe llenar el cartucho de agua sumergiendo el material vegetal hasta la tercera parte; y observando el nivel de agua a través del visor ubicado en el cuerpo del cartucho; procedemos a tapar el cartucho asegurándolo con el cuello de cisne mediante el apriete de las mariposas para evitar fugas y usamos la llama de los quemadores para generar vapor

En el método de agua/vapor se procede similar solo que llenamos el alambique con menor cantidad de agua ya que en este método las plantas no deben estar sumergidas y usando también quemadores como fuente generadora. Solo en el método de arrastre con vapor se hace necesario el uso de la caldera como generadora de vapor ya que este método se requiere mayores flujos de vapor.

El vapor ingresa al condensador axialmente a los tubos sin mezclarse con el agua de enfriamiento, recorriendo los tubos hasta condensarse y podrá salir del condensador por el cabezal posterior, mientras tanto el agua que ingresa

en contraflujo al cuerpo principal riega los tubos y saldrá al otro extremo del mismo.

Finalmente encontramos el separador o vaso florentino el cual es el encargado de separar el hidrosol del aceite esencial; se hace necesario graduar la salida del hidrosol dependiendo el tipo de material a ser destilado.

El hidrosol que se recolecta tiene bajas cantidades del aceite y puede ser separado mediante otro método de separación para poder tener un mayor aprovechamiento del proceso.

Los tiempos de destilación son netamente dependientes del método de destilación a utilizar sabiendo así que la producción de vapor en los métodos de hidrodestilación y destilación agua/vapor gastarán un mayor tiempo de extracción ya que tienen una producción de vapor mucho menor comparado con el método de arrastre con vapor que usa vapor proveniente de caldera y cuya duración de extracción depende de que flujo o cantidad de vapor se este inyectando.

En cada proceso podemos regular el flujo acorde a lo requerido; en la siguiente tabla podemos ver cómo varía la cantidad de calor a extraer y el caudal de agua requerido para condensar el vapor acorde al flujo de vapor que es suministrado por la caldera.

Tabla 1. Posibles flujos para el proceso agua vapor

	FLUJO VAPOR (caldera)¹⁰	CANTIDAD DE CALOR A EXTRAER	CAUDAL DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
--	---	--	---

¹⁰ Flujos de vapor de caldera Teknik serie No. 553 – M1251 capacidad 6 HP.

BHP	(kg/s)	(lib/hora)	(W)	Btu/h	Q _{KG/S}	Q _{GAL/MIN}
6	0,026	207	64669	220523	1,03	16,33
5	0,022	172	53891	183769	0,94	14,84
4	0,017	137	43113	147015	0,75	11,87
3	0,013	103	32335	110261	0,56	8,90
2	0,009	69	21556	73508	0,37	5,94
1	0,004	34	10778	36754	0,19	2,97

1.7.1 Seguridad en la operación. Durante la operación del alambique y la caldera se debe considerar que cuando se trabaja con ciertos aceites esenciales, estos pueden provocar problemas dermatológicos (dermatitis o alergias), es conveniente tener cuidado, principalmente en la etapa de descarga, al momento de retirar el cuello de cisne, con los vapores que emanan del interior del equipo de destilación; del mismo modo la presencia de elementos calientes y el hecho de estar trabajando con vapor, se constituyen en elementos de riesgo para lo cual recomendamos el uso de equipos de protección personal: gafas de seguridad, guantes, pecheras, etc.¹¹

¹¹ Tomado del libro del libro Arnaldo Bandoni, Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR

En el planeamiento, diseño y posterior construcción de una planta de destilación, el adecuado diseño de los equipos de proceso es un factor importante en la funcionalidad de dicha planta, incluso a nivel piloto, pues es aquí donde se pueden visualizar los requerimientos de materiales, accesorios, servicios públicos y personal, necesarios para el óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles, por lo tanto, el diseño de los equipos requiere de habilidades para el manejo de procesos industriales, conocimiento de los materiales disponibles en la zona, para una correcta selección, como también, conocimiento de los métodos de fabricación. “No hay una cosa que pueda considerarse como un diseño perfecto y permanente, debido a la posibilidad de encontrar materiales nuevos o más baratos para la construcción y debido al cambio de especificaciones técnicas o económicas bajo las cuales se diseño el equipo original. Es necesario que el diseño sea técnicamente seguro, económicamente próximo al óptimo y que ofrezca condiciones de seguridad para el personal”¹²

2.1 FACTORES DE DISEÑO

2.1.1 Volumen del Alambique. El equipo de destilación a construir deberá tener una capacidad de 50 kg de material vegetal, capacidad dada como requerimiento de diseño, lo cual se estima suficiente como para procesar la biomasa producida por un terreno de 5 hectáreas.¹³

¹² Foust y Col., 1985

¹³ Cálculo aproximado, véase Bandoni pagina. 176

Para determinar el volumen requerido del alambique resulta muy valioso evaluar la densidad aparente del material vegetal que se va a destilar, este se puede estimar midiendo el peso del material que ocupa un volumen determinado, esta cantidad varia entre $280\text{kg}/\text{m}^3$ y $200\text{kg}/\text{m}^3$ cuando se trabaja con hojas. El valor que se usó en los cálculos de diseño fue de $200\text{kg}/\text{m}^3$, con el fin de garantizar el cumplimiento de la capacidad solicitada. En el diseño del cartucho deberá tenerse en cuenta que un alambique por lo general debe ser cargado como máximo gasta un 80% de su capacidad total, pues el material vegetal aumenta su volumen en forma considerable por absorción de agua, del mismo modo es muy importante el grado de compactación que puede tener el material; pues si se compacta demasiado se favorece la formación de vías por donde fluye el vapor y no se agota bien todo el material, por otro lado, si la compactación es insuficiente, se desperdicia capacidad en el destilador.

En el caso de que el material a extraer tienda a compactarse demasiado (como en el caso de flores o frutos con alto contenido de aceite) se hace necesaria la construcción de un sistema separador, como pueden ser bandejas perforadas a diferentes alturas o un sistema de agitación.¹⁴ Para facilitar el proceso extractivo; pueden ser necesarios la maceración o molienda previa del material.

2.1.2 Demanda de vapor. El flujo de vapor de agua para la extracción de aceites esenciales proviene de un generador de vapor. La capacidad de un generador de vapor se expresa en caballos de caldera, para definir este término se dice que un generador de vapor tiene una capacidad de un caballo

¹⁴ Este sistema no forma parte del alcance y objetivos del proyecto y no será diseñado ni construido, se menciona a manera de información en caso de ser requerido.

de caldera, cuando es capaz de producir 15.65 Kg/h de vapor saturado a 100C, utilizando agua de alimentación a la misma temperatura. La demanda de vapor es definida por:¹⁵

$$D_v = C_{mat} * F_a$$

D_v : Demanda de vapor (ml/min)

C_{mat} : Cantidad de Material Vegetal (kg)

F_a = Factor de aproximación (ml/min.kg)

El factor de aproximación que puede variar según el autor entre 5 - 15 ml de condensado por minuto por kilogramo de material vegetal.

Por lo tanto:

$$D_v = (50kg) * (15 \text{ ml/min.Kg})$$

$$D_v = 750 \text{ ml/min}$$

Masa de vapor requerida por hora:

$$D_{vh} = D_v * \rho_{\text{agua}} * \frac{60\text{min}}{h} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}$$

$$D_{vh} = 750\text{ml/min} * \frac{1\text{g}}{\text{mL}} * \frac{60\text{min}}{h} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}$$

$$D_{vh} = 45\text{kg} / h$$

Capacidad del generador (C_g) :

¹⁵ Cálculo tomado del libro de Bandoni Armando, página 194 Edición 2000.

$$C_g = \frac{D_{vh}}{15.65 \text{ kg/h}}$$

$$C_g = \frac{45 \text{ kg/h}}{15.65 \text{ kg/h}}$$

$$C_g = 2.9 \text{ Caballos de Caldera o BHP.}$$

La capacidad del generador de vapor se ajusta a un tamaño comercialmente superior y debido a que el destilador es una planta de pruebas y que no solo se destilarán hojas y material blando sino también servirá para destilar semillas, tallos y raíces se requieren unos flujos mayores, adicionalmente se piensa adquirir un secador a vapor y no se descarta la compra de otros elementos que también funcionarán con vapor, por estas razones se selecciona una caldera de capacidad 6 B.H.P. marca Teknik serie No. 553 – M1251; comprada para este propósito.

2.1.3 Localización. La ubicación del equipo de destilación también debe ser considerada, pues ya que se cuenta con unas instalaciones existentes se debe procurar la mejor localización, buscando facilitar y reducir el transporte de la biomasa desde el exterior hacia el equipo, así como el cargue y descargue del mismo; se debe considerar la cercanía de las conexiones eléctricas, de gas, agua y vapor, así como la facilidad de cargue y descargue del material.

2.2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

En cuanto al diseño se refiere es importante tener en cuenta que este será un equipo para realizar pruebas piloto a escala semi-industrial lo que implica una gran diversidad de plantas a destilar, haciendo posible que en la práctica se realicen destilaciones de varias plantas en un mismo día, esto implica que

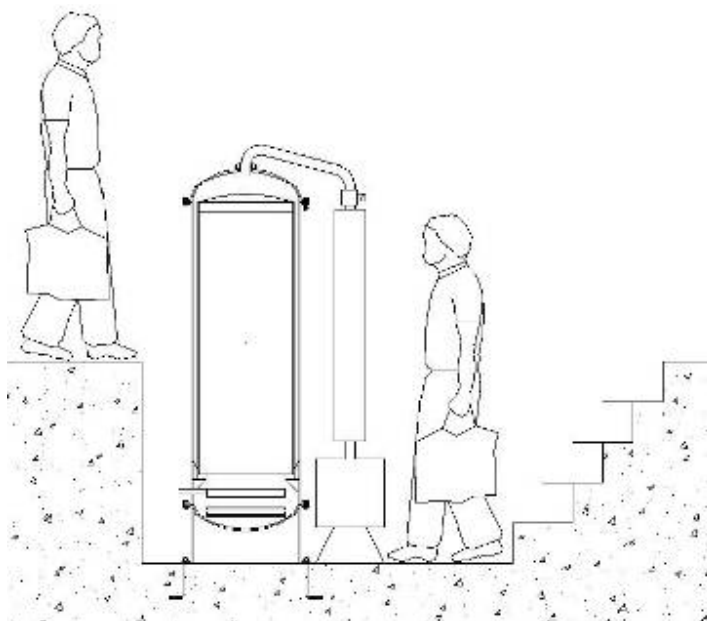
el equipo debe ser fácil de lavar y limpiar una vez terminada cada destilación para iniciar un nuevo procedimiento en el menor tiempo posible.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el equipo de destilación estará ubicado en una zona de laboratorios con personas a su alrededor realizando diferentes tareas, esto implica la reducción al máximo de la transferencia de calor por parte del equipo hacia el ambiente, evitando de esta forma deteriorar la comodidad de las personas que trabajan o se encuentran cerca de esta zona.

La eficiencia energética es otro aspecto de gran importancia para cualquier proceso ya sea a nivel artesanal o industrial es importante que este sea económicamente viable siendo el consumo de energía una de las principales variables a controlar, las pérdidas de energía serán reducidas al máximo disponiendo el arreglo de los quemadores de gas de la forma más eficiente posible, recuperando calor siempre que el proceso lo permita y sobretodo evitando las pérdidas del mismo a través de las tuberías de vapor provenientes de la caldera, así como las pérdidas de calor a través del cuerpo del destilador, estas razones sumadas a las mencionadas en el numeral anterior hacen imperativo el adecuado aislamiento térmico de el equipo en general.

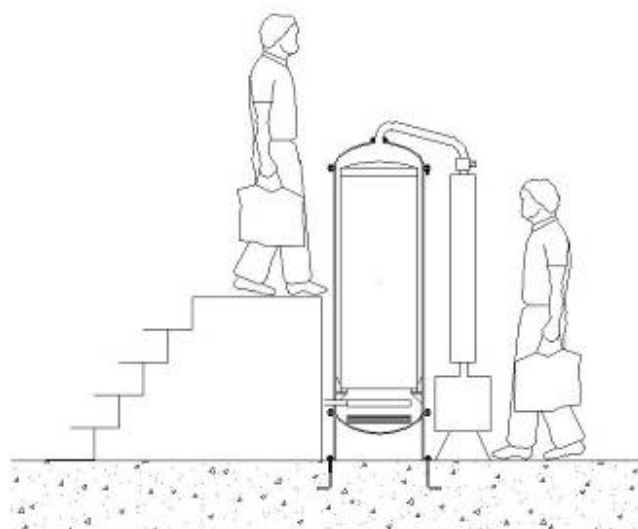
2.2.1 Evolución del proceso de diseño. Dentro del proceso de diseño se consideró la posibilidad de usar un desnivel en el piso, particularmente útil al inicio del proyecto, ya que se pedía que el vapor debía atravesar como mínimo 1.3 m de distancia vertical de material vegetal, razón por la cual el diseño era considerablemente alto.

Figura 8. Piso a desnivel como solución a la altura del equipo.



También se pensó en usar una plataforma inclinada como se muestra a continuación

Figura 9. Plataforma elevada como solución a la altura del equipo.



2.2.2 Alternativas Consideradas. A través del proceso de diseño, fueron evolucionando los sistemas de sellado, conducción de fluidos, calentamiento del agua para convertirla en vapor, así como forma y dimensiones del cartucho.

Figura 10. Base en concreto soportando el cuerpo del equipo para destilación agua - vapor

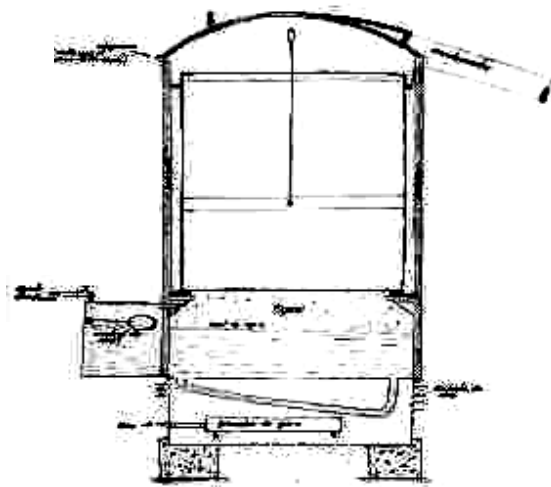


Figura 11. Equipo de evaporación de agua mediante chaqueta de vapor tipo marmita

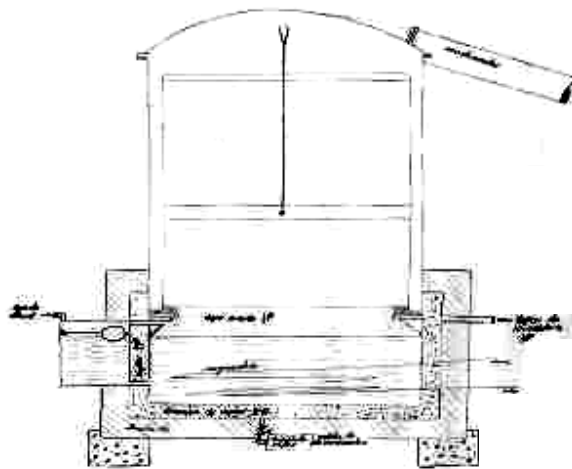
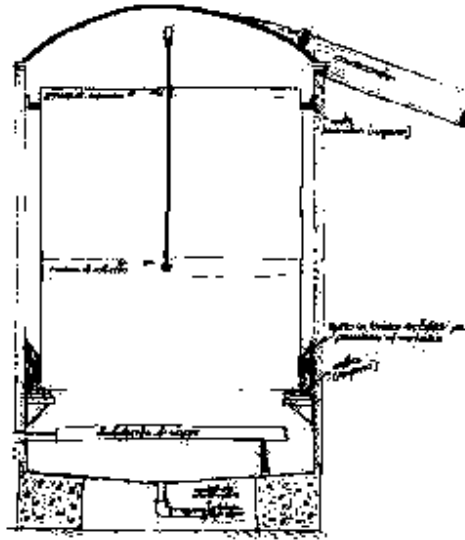


Figura 12. Equipo de arrastre con vapor con sellado en la parte inferior.

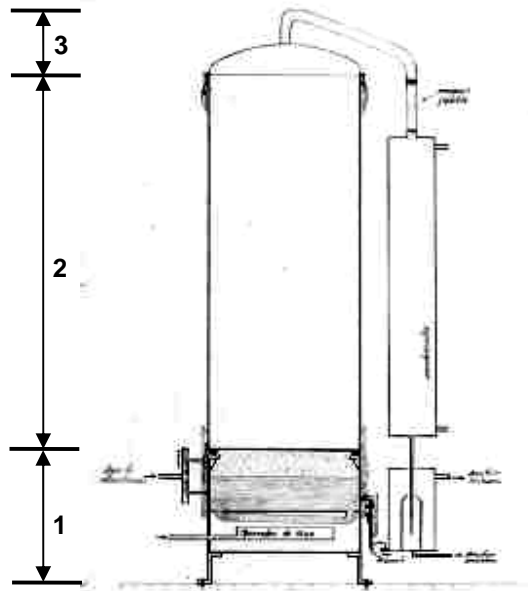


Las figuras mostradas anteriormente son algunos de los bocetos realizados a lo largo del proceso. Dentro de las alternativas o posibles variaciones encontradas en el proceso de diseño también se encuentra el uso de una base con dos horquillas sobre las cuales se suspendería el equipo permitiéndole volcarse para ser descargado.

Esta opción fue descartada debido a la dificultad que presentaba el proceso de carga, teniendo en cuenta que al usar este sistema el destilador debía estar conformado por un solo cuerpo, esta misma razón hace técnicamente inconveniente el conexionado de tuberías de gas y vapor así como de las válvulas de control, además de las complicaciones de diseño y aumento en el esfuerzo físico por parte del operario.

También existe la opción de diseñar el equipo dividido en 3 cuerpos principales como se muestra en la figura.

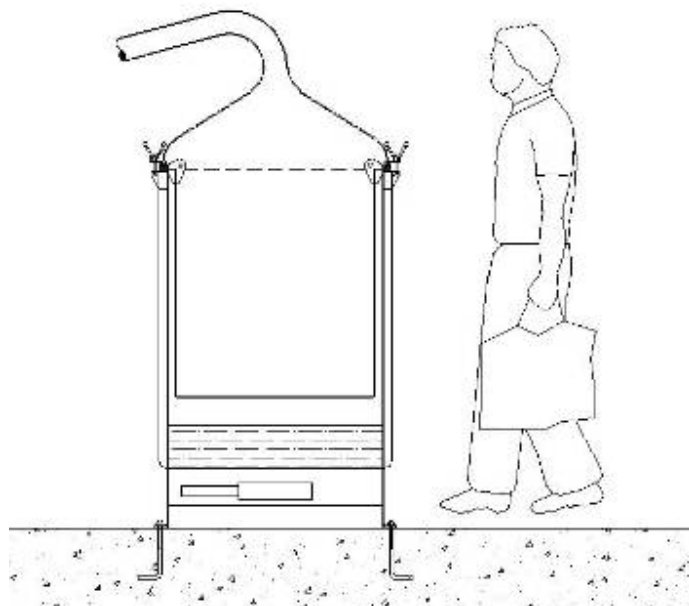
Figura 13. Cuerpo del destilador dividido en tres secciones, base (1), cartucho (2) y cuello de cisne (3).



Esta solución brinda mayor practicidad en la carga y descarga del material a destilar ya que se reduce considerablemente la altura a la que se debe elevar el cartucho para ser ubicado en el equipo y es ideal para destilación agua vapor, pues facilita la limpieza del recipiente que contiene el agua, pero es inconveniente cuando el cartucho debe ser parcialmente inundado de agua como es el caso de la hidrodestilación, por otra parte el cartucho deberá llevar consigo el aislante térmico, lo que producirá su rápido deterioro con el uso.

2.2.3 Disposición final. Finalmente se optó por un equipo constituido por 3 partes, base, cartucho y cuello de cisne, pero a diferencia del diseño anterior, las paredes de la base se extienden hacia arriba hasta igualar la altura del cartucho de la forma mostrada en la figura.

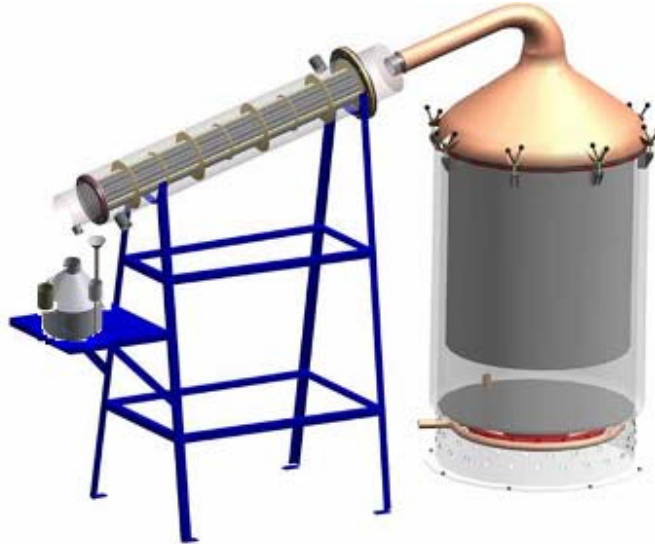
Figura 14. Disposición final



Esta alternativa tiene el inconveniente de requerir de una mayor elevación del cartucho en el momento de la carga y descarga de material, pero presenta la ventaja de tener un cartucho más sencillo, liviano y económico permitiendo la construcción de un segundo cartucho en caso de que el volumen de material a destilar lo requiera, pudiendo este segundo cartucho ser limpiado y cargado mientras el primero se encuentra en operación agilizando de esta forma el proceso.

Otra ventaja de poner el aislante térmico en el recipiente principal es que es posible usar un espesor de aislante mayor, minimizando de esta forma las pérdidas de calor, con este diseño puede realizarse sin problema la hidrodestilación pues permite inundar completamente el equipo, incluso es posible el uso de dispositivos de monitoreo y control de nivel a lo largo de toda su altura útil.

Figura 15. Diseño definitivo del equipo de destilación



La disposición inclinada del intercambiador de calor permite la recolección del aceite e hidrosol producidos durante el proceso a una altura cómoda para la persona que opera el alambique.

2.2.4 Selección de los materiales. La selección de los materiales de construcción del destilador es un aspecto fundamental en el correcto funcionamiento del equipo de destilación y determinante en costo final del equipo.

Como requerimientos de diseño tenemos que los aceites esenciales son una sustancia que se podría contaminar fácilmente con productos de corrosión, favoreciendo la oxidación de los aceites, cambiar su color, o produciendo su polimerización o degradación química, en general, disminuyendo considerablemente su calidad con la consecuente disminución de precio en el mercado, adicionalmente los aceites contienen sustancias que pueden corroer materiales que generalmente no presentan este problema, aunque en muchos casos son usados en la construcción del cuerpo del alambique aceros al

carbono comunes o láminas galvanizadas por ser más económicas, y es básicamente esta relación costo calidad la que determina la elección de los materiales, en este caso se busca obtener aceites de la mayor calidad posible sin incurrir en costos excesivos.

Por esta razón consideramos usar una mezcla de cobre, (incluso latón o bronce) y aceros inoxidable por ser estos los materiales con los que mejores resultados se obtienen y su uso estará limitado por su costo, disponibilidad en el mercado y ductilidad. Dentro de los latones, vale la pena considerar los latones para trabajo en frío, dentro de los cuales se encuentran: los latones rojos (por su alto contenido de cobre) y los latones amarillos (20 al 36% de Zn), comercialmente estas aleaciones son conocidas como:

- ADMIRALTY: 71% Cu; 28% Zn; 1% Sn.

- ALUMINUM BRASS: 76% Cu; 28% Zn; 2% Al.

Estas aleaciones en general son resistentes a la corrosión en medios acuosos. También podemos considerar los latones para trabajo en caliente, en los que destaca la aleación conocida como METAL MUNTZ (60% Cu; 40% Zn), que tienen una mayor dureza y resistencia que las aleaciones anteriormente mencionadas.

Debido a los altos precios que tiene el cobre en la actualidad y a la dificultad en la consecución de este material en láminas limitaremos su uso a la construcción de cuello de cisne, por requerir de un material de alta ductilidad, pues debe ser elaborado a mano por la dificultad de su forma. El resto del cuerpo del equipo será elaborado en acero inoxidable de la serie 300,

particularmente el acero AISI 304¹⁶ (designación UNS S30400), este es un acero austenítico Cr-Ni, presenta una mejor resistencia a la corrosión que el 302, aceptable ductilidad y capacidad de formado. Esencialmente no magnético. Bajo carbono, lo que implica menores precipitaciones de carburos en las zonas afectadas por la soldadura y una menor susceptibilidad a la corrosión ínter granular, resistente a la mayoría de las sustancias ácidas oxidantes, básicamente esta compuesto de la siguiente forma:

Tabla 2. Composición acero AISI 304

Acero AISI 304	
Elemento	Porcentaje
C	Máx. 0.08%
Cr	18% a 20%
Fe	66.345% a 74%
Mn	Máx. 2%
Ni	8% a 10.5%
P	Máx. 0.045%
S	Máx. 0.03%
Si	Máx. 1%

2.3 DISEÑO DEL CUERPO DEL DESTILADOR

2.3.1 Cálculo del espesor del casco cilíndrico. Para el cálculo del espesor del casco cilíndrico se analizarán las cargas a las que está sometido de la siguiente forma:

¹⁶ Ver anexo A, Tabla de propiedades mecánicas acero AISI 304

- Carga estática.
- Carga sísmica.
- Presión interna.

El espesor calculado en cada análisis corresponde exclusivamente a la carga específica que se está considerando y por lo tanto estos tres resultados deberán ser sumados para obtener el espesor requerido. Una vez determinado este espesor deberá ser comparado con el requerido para garantizar la estabilidad elástica para de esta forma escoger el valor mayor.

2.3.2 Espesor requerido para garantizar la estabilidad elástica. Un recipiente sujeto a compresión axial puede fallar por inestabilidad de dos formas:

1. Por deformación de todo el recipiente.
2. Por deformación local.

En los recipientes de pared delgada puede tener lugar la deformación local a una carga unitaria menor que la requerida para producir la falla del recipiente completo. El ovalamiento del casco es un factor de gran importancia en la inestabilidad resultante, para estos cálculos usaremos las fórmulas usadas por Wilson y Newmark¹⁷ para la investigación de la estabilidad elástica.

Sea:
$$S_{EE} = 1500000 * \frac{t}{R} \leq \frac{1}{3} \text{Puntodecedencia}$$

¹⁷ Wilson, W. M. y Newmark N. M.: The Strength of Thin Cylindrical Shells as Columns, Eng. Exp. Sta., Universidad de Illinois, Boletín 255, 1973

Dado que el valor del esfuerzo de fluencia (S_y), para el acero AISI 304 (SA 240 grado 304), es de 30,000psi.¹⁸

Tenemos que: $S_{EE} \leq 10,000 \text{ psi}$

Como $R=381\text{mm} \cong 15 \text{ in}$

Entonces el espesor requerido para lograr la estabilidad elástica:

$$t = \frac{S * R}{1500000} = \frac{10000 * 15}{1500000} = 0.10\text{in} \cong 2.54\text{mm}$$

2.3.3 Cálculo del espesor para resistir las cargas a las que esta sometido.

Espesor requerido por carga estática:

Masa estimada del quipo: 230.02kg.

Masa estimada de agua (calculada en la situación crítica en que el equipo sea usado como hidroddestilador y este esté completamente lleno de agua): 471.7kg

Masa total del equipo completamente lleno de agua: 701.72kg

Espesor requerido en la base debido al peso del recipiente cargado:

$$t = \frac{W}{D * \pi * S * E}$$

¹⁸ Tabla AHA-2 norma ASME div. 2, no se confunda este valor con el de esfuerzo permisible dado en la tabla UHA-23 div. 1 de la misma norma.

Donde:

W: Peso del recipiente en la condición crítica ($701.72\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2 = 6883.8732\text{N}=1547.56\text{lbf}$)

D: Diámetro exterior del faldón (recipiente exterior) = $0.756\text{m}=29.7638\text{in}$

E: Eficiencia de la soldadura = 0.6 para juntas a tope de un solo cordón sin tira de respaldo.¹⁹

S: Esfuerzo del material = 18750psi para el acero SA-240 grado 304.²⁰

$$t = \frac{1547.5562\text{lbf}}{29.7638\text{in} * \pi * 18750\text{psi} * 0.6} = 0.002\text{in} = 0.037\text{mm}$$

Espesor requerido por carga sísmica:

Las cargas en un recipiente bajo fuerzas sísmicas son semejantes a las que hay en una viga en voladizo cuando la carga se incrementa uniformemente hacia el extremo libre. El método de diseño que se sigue se basa en la norma ANSI 85.1-1982 y en el UNIFORM BUILDING CODE de 1985 (UBC).

Para realizar el cálculo del espesor de la lámina debido a la carga sísmica es necesario determinar el periodo de vibración del equipo a diseñar.

¹⁹ Eugene F. Megyesy pag. 142

²⁰ ASME BOILER AND PRESURE VESSEL CODE SECTION VIII, Tabla UHA-23 Pág. 154.

2.3.4 Cálculo por vibración²¹. El periodo de vibración debe limitarse, ya que los periodos naturales de vibración largos pueden producir la falla por fatiga. El periodo permitido se ha calculado en base a la deformación máxima permitida.

$$\text{Sea: } T = 0.0000265 * \left(\frac{H}{D}\right)^2 * \sqrt{\frac{w * D}{t}}$$

Donde: H = 1.82m = 5.97ft (altura del recipiente incluyendo la base).

D = 0.823m = 2.7ft (diámetro exterior del recipiente).

W = 6883.8732N = 1547.56lbf (peso del recipiente).

w = 259.2228lbf (peso del recipiente por pie de altura).

t = 0.00147m = 4.8228*10⁻³ft (espesor del faldón en la base).

$$\text{Entonces: } T = 0.0000265 * \left(\frac{5.97}{2.7}\right)^2 * \sqrt{\frac{259.2228 * 2.7}{4.8228 * 10^{-3}}} = 0.0494$$

Fuerza cortante total:

$$V = Z * I * K * C * S * W$$

Donde: Z = factor sísmico UBC=1

I = Coeficiente de importancia de ocupación (usar 1.0 para recipientes)

K = Factor de fuerza horizontal (usar 2.0 para recipientes)

$$C = \text{Coeficiente numérico: } C = \frac{1}{15 * \sqrt{T}} = 0.3$$

S = Coeficiente numérico para calcular la resonancia de la estructura en el lugar, como estas no son conocidas y T ≤ 2.5 calculamos S con la fórmula:

²¹ Freese, C. E. ; Vibration of vertical pressure vessel, Artículo técnico ASME, 1959, Megyesy Pág. 58

$$S = 1.2 + 0.24 * T - 0.048 * T^2 = 1.2117$$

W = Masa del recipiente: 1880.07lb

Por lo tanto: $V = 1 * 1 * 2 * 0.3 * 1.2117 * 1880.07 = 1366.85$

Máximo periodo de vibración permitido (T_a):

$$T_a = 0.8 * \sqrt{\frac{W * H}{V * g}} = 0.8 * \sqrt{\frac{1547.56 * 5.97}{1366.85 * 32.2}} = 0.3665$$

Con esto calculamos la carga sísmica

Sea:

Momento:
$$M = \left[F_t * H + \langle V - F_t \rangle * \left\langle \frac{2 * H}{3} \right\rangle \right]$$

$F_t = 0$ para $T \leq 0.7$

$$M = \frac{1366.85 * 2 * 5.97}{3} = 5440.06lb * ft$$

- **Cortante en la base:** dicho efecto cortante es el esfuerzo cortante sísmico total que actúa horizontalmente en la base del recipiente. Se supone que una parte de la fuerza sísmica, horizontal y total, V, se aplica en la parte superior del recipiente. El cortante de la base restante se distribuye a lo largo de toda la longitud del recipiente.

- **Momento de volteo:** a cualquier nivel este momento es la suma algebraica de los momentos de todas las fuerzas que están por encima de dicho nivel.

Espesor necesario debido a la carga sísmica:

$$t_s = \frac{12 * M}{\pi * R^2 * S_t * E} = \frac{12 * 5440.06}{\pi * 16.19^2 * 18750 * 0.6} = 0.00705in \approx 0.1790mm$$

Espesor requerido por presión interna:

Según la bibliografía consultada, la presión inducida por el material vegetal al oponerse a ser atravesado por el vapor puede llegar a ser hasta de un metro columna de agua,²² (cerca de 1.42psi).

$$P_W = 1.42psi.$$

Además considerando nuevamente la situación más crítica en la que el recipiente esta completamente lleno de agua:

$$P_W = \rho * g * h = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 1.05m = 10300.5 Pascales \cong 1.5psi$$

$$P = P_W + P_{MV} \cong 3psi.$$

$$t = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} = \frac{3 * 15}{18750 * 0.6 - 0.6 * 3} = 0.004in \cong 0.01mm$$

Considerando la resistencia de las costuras circunferenciales:

$$t = \frac{P * R}{2 * S * E + 0.4 * P} = \frac{3 * 15}{2 * 18750 * 0.6 + 0.4 * 3} = 0.002in \cong 0.005mm$$

El espesor de lámina necesario para resistir las diferentes cargas:

²² Destilación y rectificación de los líquidos industriales, Aires y gases líquidos, Charles Mariller, Ed. Hachette S.A., Argentina, 1969, Página 492

TIPO DE CARGA	ESPESOR (mm.)
Carga estática	0.04
Carga sísmica	0.18
Presión interna	0.01
Espesor requerido según cargas	0.23

Comparando el espesor requerido según las cargas a que esta sometido, con el espesor requerido para garantizar la estabilidad elástica, vemos que no esta alcanzando esta condición, por lo tanto, el espesor seleccionado será el requerido por la estabilidad elástica (2.54mm), que normalizando, nos da un espesor de pared de 3.0 mm.

2.3.5 Calculo de la lámina del fondo

Figura 16. Cálculo de la lámina del fondo.



Esta lámina esta ubicada en la parte inferior, con forma de disco, separa el interior del alambique del exterior en donde se encuentran los quemadores de gas y soporta la presión inducida por el material vegetal al ser atravesado

por el vapor, cuando se trabaja con hidrodestilación o destilación agua-vapor a esta presión debe adicionarse la presión ejercida por la columna de agua que se encuentra sobre ella, que es de 3psi.²³

$$\text{Sea: } t = d * \sqrt{\frac{C * P}{S * E}} \quad C = 0.33 * \frac{t_r}{t_s}$$

Donde:

P= Presión de diseño interna o externa, lib/pulg²

E=Eficiencia de la junta, E=0.6 para soldadura a tope de un solo cordón sin tira de respaldo

d=Diámetro interior del casco, pulgadas

S=Valor máximo de esfuerzo permitido del material, libras/pulgadas²

t=Espesor de la lámina de fondo, pulgadas

ts=Espesor real del casco excluyendo el margen por corrosión, pulgadas

tr=Espesor mínimo requerido por presión del casco sin costura

Determinando tr:

$$t_r = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} = \frac{20 * 14.88}{18750 * 0.6 - 0.6 * 20} = 0.0265 \text{ pulg.} \approx 0.6726 \text{ mm}$$

El valor de ts = 3mm (0.1181 pulgadas)

$$\text{Por lo tanto: } C = 0.33 * \frac{0.0265 \text{ pulg.}}{0.1181 \text{ pulg.}} = 0.0740$$

Como $C = 0.0740 < C_{\min}$. El criterio utilizado indica que si C es menor a 0.2 se deberá utilizar este valor, por lo tanto usaremos: $C_{\min} = 0.2$

²³ Este valor fue calculado en el numeral 2.3.1. en la sección donde se determinó el espesor debido a la presión interna.

- Calculando el espesor de la placa:

$$t = 29.76 * \sqrt{\frac{0.2 * 3}{18750 * 0.6}} = .217 \text{ pulg} \approx 5.5 \text{ mm}$$

2.3.6 Calculo del espesor del aislante. Por razones constructivas se determinó que el espesor del aislante térmico debía ser de 25 mm (1 pulgada), dado que un espesor mayor podría ocasionar que la lámina que lo protege quedará expuesta a ser golpeada por el cartucho durante la carga o descarga del alambique.

2. 4 DISEÑO DEL CARTUCHO

Es el recipiente que contiene el material vegetal, esta compuesto por un sello de agua en su parte superior, dos orejas que permiten su izaje, ocho laminas en ángulo para centrar el cartucho en el cuerpo del alambique y una malla en su parte inferior para permitir el paso de vapor.

Figura 17. Diseño del cartucho



2.4.1 Dimensionamiento del cartucho. Datos de entrada:

- Densidad de llenado: 200 kg/m³²⁴
- Capacidad: 50 kg

Volumen ocupado por el material vegetal:

$$V_{mv} = \frac{50\text{kg}}{200\text{kg} / \text{m}^3} = 0.25\text{m}^3$$

Teniendo en cuenta la dilatación que sufrirá el material vegetal al ser calentado y absorber humedad proveniente del vapor es conveniente llenar el recipiente hasta un 80% de su capacidad, por lo tanto el volumen requerido para el diseño es:

$$V_d = \frac{V_{mv}}{0.8} = \frac{0.25}{0.8} = 0.3125\text{m}^3$$

$$\text{Como: } V_d = \frac{\pi * D^2 * h}{4}$$

$$\text{Tenemos que: } D = \sqrt{\frac{4 * V_d}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{4 * 0.3125}{\pi * 0.8}} = 0.7052$$

²⁴ Bandoni, Pág. 176

2.4.2 Accesorios para izaje del cartucho. Al igual que el cartucho las orejas serán en acero inoxidable; El espesor requerido podrá calcularse por la fórmula:

$$t_{Oreja} = \frac{P}{2 * S * (R - \frac{D}{2})}$$

Donde:

t_{Oreja} = espesor requerido de la oreja, in

P = carga, lb.

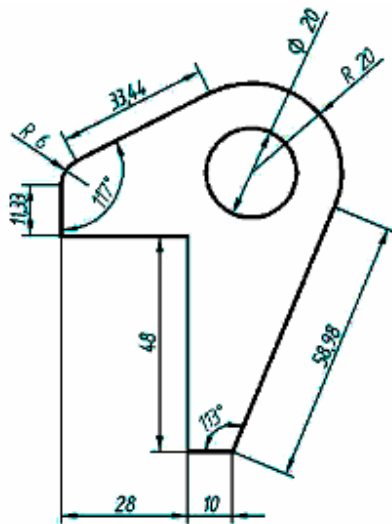
S = esfuerzo cortante permitido, lb/pulg²

D = diámetro del agujero interno de la oreja, in

R = radio del contorno de la oreja, in

$$t_{Oreja} = \frac{220.5}{2 * 18750 * (0.7874 - \frac{0.7874}{2})} = 0.0149in \cong .4mm^*$$

Figura 18. Oreja de izaje para el cartucho



* Valor calculado suponiendo que solo hay esfuerzo cortante en la sección mínima

2.4.3 Empaquetaduras. El material seleccionado para realizar el sellado es el neopreno siliconado por su alta estabilidad química dado que muchos de los materiales sintéticos disponibles en el mercado pueden reaccionar con algunos de los elementos presentes en los vapores de destilación. Este material posee un rango de operación que puede llegar hasta los 160°C, y fue seleccionado dado que las temperaturas que se estima manejar se encuentran en el orden de los 94°C hasta un máximo de 106°C.

2.5 DISEÑO DEL DISTRIBUIDOR DE VAPOR

El diámetro de las perforaciones deberá ser cada vez mayor, cuanto más alejadas estén de la entrada de vapor y no deberá sobrepasar una vez y media el diámetro del tubo del que está construida (García, 1953). El difusor de vapor se instala un poco por encima del piso del alambique, para que no esté en contacto con el condensado que suele generarse durante el proceso de extracción, y tapone sus perforaciones.

Existen muchos diseños de difusores, siendo los más comunes el uso de uno o dos anillos concéntricos, en forma de cruz, en espiral o la combinación de algunos de estos diseños. Para nuestro caso usamos un distribuidor formado por un anillo concéntrico por ser de construcción más simple y minimizar las obstrucciones para su limpieza. El difusor será construido en tubería de 1", la cual tiene un área interna o área de entrada de:

$$A_{\text{entrada}} = 0,8643 \text{ in}^2$$

El radio de curvado del tubo será:

$$R_{\text{interno del difusor}} = 300 \text{ mm.} \quad (\varnothing_{\text{interno del difusor}} = 600 \text{ mm.})$$

Debido a la dificultad y consecuente aumento en el costo de realizar reducciones periódicas en el diámetro del distribuidor, se a optado por no variar el diámetro de la tubería, en cambio, se aumentará gradualmente el diámetro de las perforaciones a lo largo del distribuidor, buscando repartir el flujo de manera más uniforme. Como una primera aproximación y teniendo en cuenta los diferentes diámetros de brocas que se consiguen en el mercado, distribuimos el área de perforaciones de la siguiente forma. El 40% del área estará distribuida en los 24 primeros agujeros lo que nos da un área por agujero:

$$A_1 = 0,4 \times 0,8643 \text{ in}^2$$

$$A_1 = 0,3457 \text{ in}^2$$

El 60% del área restante estará distribuida en los 24 agujeros siguientes

$$A_1 = 0,6 \times 0,8643 \text{ in}^2$$

$$A_1 = 0,5186 \text{ in}^2$$

El diámetro de los agujeros de la primera mitad será:

$$A_{1-1} = \frac{0,3457 \text{ in}^2}{24} = 0,0144 \text{ in}^2$$

$$d_{1-1} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0144 \text{ in}^2}{\pi}}$$

$$d_{1-1} = 0,1354 \text{ in} \approx 3,44 \text{ mm}$$

El diámetro de los agujeros de la segunda mitad será:

$$A_{1-1} = \frac{0,5186 \text{ in}^2}{24} = 0,0216 \text{ in}^2$$

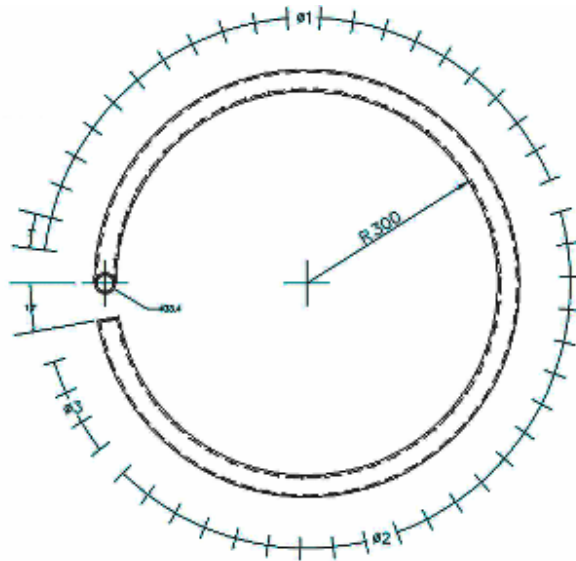
$$d_{1-1} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0216 \text{ in}^2}{\pi}}$$

$$d_{1-1} = 0,1658 \text{ in} \approx 4,21 \text{ mm}$$

Después de estandarizar los diámetros de las perforaciones, tenemos: el tubo doblado deberá llevar 48 agujeros igualmente espaciados, en ángulos intercalados de 45° y 60° medidos desde la vertical hacia el interior en los diámetros que se mencionan a continuación:

- Para las primeras 22 perforaciones, siendo la primera la que se encuentra en el punto más cercano a la entrada de vapor $\phi_1 = 3.5 \text{ mm}$.
- Las siguientes 22 perforaciones $\phi_2 = 4.0 \text{ mm}$.
- Las restantes 4 perforaciones $\phi_3 = 4.5 \text{ mm}$.

Figura 19. Detalle constructivo distribuidor de vapor

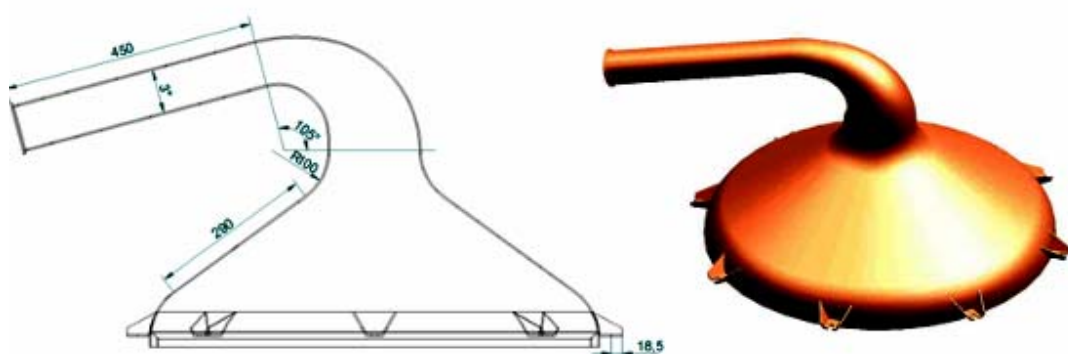


2.6 DISEÑO DEL CUELLO DE CISNE

El cuello de cisne es el conducto que comunica la tapa del alambique con el condensador. Por medio del cuello de cisne circula la mezcla de vapor de agua y aceite esencial. Los factores más importantes a considerar par su construcción son su forma y sus dimensiones. Este debe diseñarse con el fin de reducir al mínimo las posibilidades de condensación de vapores dentro del alambique mismo, permitiendo su rápida transferencia hacia el condensador.

Esta es sin duda la pieza mas difícil de construir de todo el equipo, en la parte inferior posee un sello de agua compuesto por dos anillos que encajan en la parte superior del cartucho que cuenta con la otra mitad del sello, en el otro extremo se conecta al intercambiador de calor por medio de un acople rápido del tipo férula, para esta sección se recomienda usar una ducto flexible en acero inoxidable del tipo S96 reemplazando el segmento de tubería mostrada en la figura.

Figura 20. Cuello de cisne.



Para efectos de cálculo esta pieza será se considera que esta compuesta por una primera región con forma de sombrero chino, un cuello reducción con unas curvas particularmente suaves (no se consigue en el mercado), y finalmente una sección de tubería rígida o flexible (dependiendo del presupuesto) de 3 pulgadas de diámetro.

- Cálculo del espesor del sombrero chino:

Sea:

$$t = \frac{P * D}{2 * \cos(\alpha) * S * E - 0.6 * P} + C$$

Donde:

t = Espesor del cabezal, pulgadas

P = Presión interior de diseño, psi

D = Diámetro interno del cabezal, pulgadas

S = Esfuerzo permisible en el material, psi

E = Eficiencia de la junta por soldadura, porcentaje

C = Factor global de corrosión, en este caso igual a cero por usar acero inoxidable.

$$t = \frac{30 * 31.5}{2 * \cos(55) * 18750 * 0.6 - 0.6 * 30} = 0.0733 \text{ pulg} \approx 1.86 \text{ mm}$$

Por lo tanto el espesor seleccionado para este componente será de 2.00 mm. Para el caso del codo reducción el espesor del mismo está ligado al proceso de construcción que sea empleado y se procurara usar el mínimo espesor posible siempre y cuando este no sea inferior a 2.00 mm. Es posible que el material a destilar sea muy liviano y pueda ser proyectado por la corriente de vapor, por tal razón será ubicada una malla metálica en la parte superior del alambique, cubriendo la boca del cuello de cisne.

2.6.1 Dispositivos de cierre. Los dispositivos de cierre deben ser fácilmente desmontables, sobre todo teniendo en cuenta que cada vez que se cargue y descargue el alambique con material vegetal deben desconectarse para poder retirar el cuello de cisne.

Figura 21. Dispositivo de cierre



Para este caso en particular y buscando la comodidad de los operarios se opto por usar dispositivos de cierre tipo mariposas, dado la facilidad y practicidad en el momento de ser desmontar el cuello de cisne.

2.7 CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR

En la construcción del destilador se debe velar por que se usen los materiales especificados, se cumpla con las tolerancias de fabricación, exista una correcta soldadura, y en general se satisfaga con los requerimientos exigidos y definidos en el diseño.

Figura 22. Construcción del destilador.



La reducción para el cuello de cisne debido a la complejidad de su forma y suavidad de sus curvas debió ser hecho por fundición, para lo cual fue necesario elaborar un molde en madera, que debía transferir su forma al molde hecho en arena de fundición, asegurándose que el metal líquido pudiera llenar las paredes creadas por esta arena. Es por esta razón que el espesor final fue mucho mayor al requerido.

2.7.1 Tolerancias de fabricación. Las tolerancias nos dan un margen de error en cuanto a la posición de las boquillas, soportes, bridas, etc. Una tolerancia nos permite trabajar con ciertas sobre medidas o submedidas con respecto a la medida del diseño, por lo que no se recomienda tomar tolerancias mayores o menores a las especificadas. Estas tolerancias nos dan un margen permitido de error en cuanto a la posición de los elementos y las medidas del destilador con respecto a las medidas del plano o de diseño.

2.7.2 Soldadura. El proceso de soldadura es de suma importancia en la fabricación de del destilador, debido a que casi todas sus uniones van a estar soldadas y a su vez sometidas a una baja presión. Se utilizó soldadura tipo TIG (electrodo de tungsteno y protección del arco con gas inerte), usando como material de aporte acero inoxidable 308 L y material base acero inoxidable.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR

En general un condensador es un intercambiador de calor en el cual se presenta un cambio de fase vapor – líquido debido a la transferencia de calor del vapor a un refrigerante, en este caso se utilizara agua como refrigerante. Uno de los condensadores mas utilizados es el intercambiador de calor de casco y tubos. Este tipo de condensador ha obtenido una gran aplicabilidad y aceptabilidad en la industria de extracción de aceites esenciales, debido a la alta capacidad de estos equipos y a sus altas ratas de transferencia de calor.

El diseño y construcción de estos equipos se rige a partir de las normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), Código ASME (American Society of Mechanical Engineers) y el manual HEDH (Heat Exchange Design Handbook). El diseño térmico y mecánico de un intercambiador de calor están ligados entre si debido a la definición de varios parámetros tomados como punto de partida entre uno y otro.

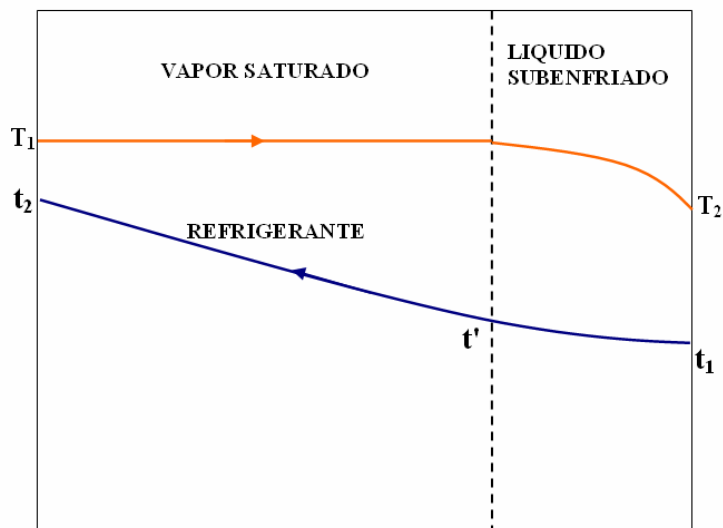
3.1 DISEÑO TÉRMICO

El condensador no solo debe condensar el vapor destilado, si no también garantizar que el condensado salga a una temperatura en la cual el aceite esencial y el agua se separen adecuadamente de acorde a sus densidades, requiriendo así una zona de subenfriamiento antes de salir, dividiendo el condensador en dos zonas; tratando cada zona como un intercambiador por separado. A cada zona es necesario calcularle su propio coeficiente global de transferencia, su diferencia media de temperatura y su área de transferencia, para finalmente sumar las áreas individuales obtenidas hallando así el área

total del intercambiador. Los cálculos serán desarrollados teniendo en cuenta cada una de las zonas:

Zona de Condensación	cambio de fase / agua
Zona de Subenfriamiento	agua/agua

Figura 23. Zonificación del condensador



3.1.1 Datos de entrada. Es necesario determinar los datos conocidos y los requisitos con los que se cuentan antes de empezar el diseño, estos datos podemos clasificarlos en tres tipos de datos diferentes:²⁵

- Datos de proceso.
- Datos geométricos.
- Datos de criterio.

²⁵ Apuntes del Ing. Omar Gélvez A.

1.1.1.1 **Datos del proceso:** Corresponden a los datos referentes a los fluidos que intercambian calor, temperaturas, flujos disponibles y suministros con los que se cuenta. El condensador esta diseñado para trabajar con los tres métodos en los que se manejaran flujos diferentes y debe estar en la capacidad condensar el vapor en su totalidad, analizando las fuentes de entrada con que se cuentan:

- Para el proceso de agua/vapor se usaran dos quemadores que suman una potencia térmica efectiva de 120.000 Btu/h, produciendo un flujo de vapor de 55.92 kg/h.

- Para el proceso de arrastre con vapor se toma el flujo de caldera con capacidad 6 B.H.P. marca Teknik serie No. 553 – M1251 comprada para este propósito; y que según especificaciones técnicas del manual de funcionamiento tiene una producción de vapor de 207 libras/hora a 212 F. (93.6 Kg./h)

Se selecciono el mayor flujo que se proporciona, tomando así para el procedimiento de diseño un flujo de caldera de 93.6 Kg./h. (0.026 kg/s).

Temperaturas del proceso:

T1: Temperatura de entrada del vapor al condensador

T2: Temperatura de salida del condensado.

t1: Temperatura de entrada del agua de enfriamiento.

t2: Temperatura de salida del agua enfriamiento.

t' : Temperatura intermedia del agua de enfriamiento.

Datos que se conocen, se tabularan a continuación:

Tabla 3. Datos del proceso.

	Fluido	T. Entrada	T. Salida	Flujo masico
Tubos	Vapor	100C	45C	0.026 Kg/s
Casco	Agua	30C	---	1.03 Kg/s

1.1.1.2 **Datos geométricos:** corresponden a las dimensiones de los tubos seleccionados tales como su diámetro externo e interno, su longitud y el arreglo con el cual se van a distribuir en el banco de tubos. Selección de materiales de los tubos y del casco. La elección de los tubos se realizó de acorde a los mercados locales tomando así tubería de cobre rígida TIPO L 3/8 ($De=1/2'=12.7\text{mm}$, $Di=10.922\text{ mm.}$)²⁶ y teniendo en cuenta que la calidad del aceite obtenida con tubería de cobre es mayor que con tubería de acero. En la selección del casco se realizo acorde al proceso iterativo y recomendación del HEDH²⁷ en figura mostrada; se selecciono el un tubo de 6' SCH 10 ($De=6.625'=168.275\text{ mm.}$ $Di=161.925\text{ mm.}$ $Espesor=1/8'$) el cual cumple con la combinación recomendada mostrada a continuación.

Figura 24. Combinación adecuada de diámetros casco-tubo.

Ds →	100	200	300	500	700	1000	1500
Dt ↓							
6	■	■	●●●●				No aceptable para limpieza mecánica
10	■	X	■	●●●●			↑
14			■	■	●●●●	●●●●	
20			■	■	■	■	■
25				■	■	■	■
38						■	■
51						■	■

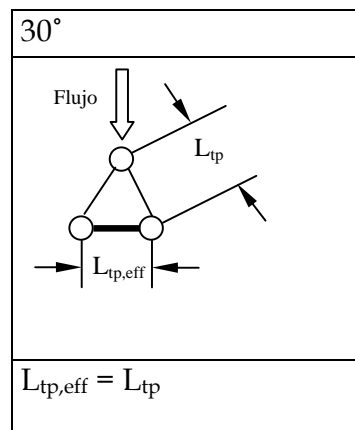
²⁶ Tubería de cobre tipo K, L, M, rígida Norma ASTM B-88, ver Anexo B.

²⁷ Heat Exchange Design Handbook

Las áreas achuradas son las preferidas, Las áreas con puntos son aceptables bajo condiciones específicas.

Geometría del arreglo: los arreglos Standard son caracterizados por el ángulo que forma la dirección del flujo con un lado del arreglo y son básicamente: 30°, 45° y 90°.

Figura 25. Geometría del arreglo de 30° en los tubos²⁸



El parámetro $L_{tp,eff}$ corresponde a la longitud de la sección de flujo mínima (S_m) para cuando el fluido del lado del casco pasa por el exterior del haz de tubos, esta sección mínima sirve para determinar la velocidad máxima utilizada para calcular el número de Reynolds externo. Con el arreglo de 30° se puede obtener una mayor densidad de tubos dentro del arreglo y considerando que no se requiere realizar limpieza entre los tubos debido a que el refrigerante a usar es agua sin impurezas en recirculación.

1.1.1.3 **Datos de criterio:** por recomendaciones de proceso y experiencia en diseños de condensadores para aceites esenciales se sugiere: En cuanto al material tubos en cobre para obtención de aceites con

²⁸ Tomado de HEDH, ítem 7, página 3.3.5-3

mayor calidad; el casco junto con los cabezales de acero inoxidable para evitar posible contaminación de los aceites.

- En la localización de los fluidos el vapor por los tubos y el agua por el lado del casco.

- La posibilidad de realizar mantenimiento por lo tanto se hará desmontable.

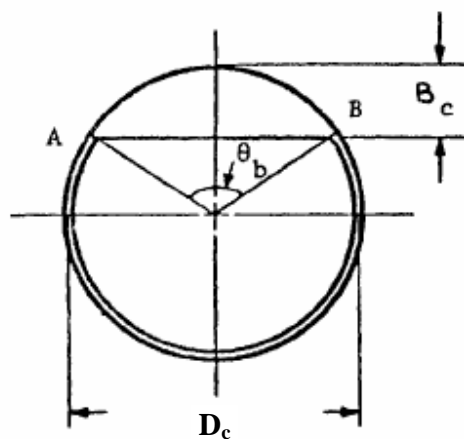
- Claro diametral casco-haz (L_{bb}) sea el menor posible entre el haz de tubos y la pared del casco.

- El agua para enfriamiento y el vapor viajen en contraflujo.

- Corte de bafle (B_c): el corte del bafle se puede obtener a partir del porcentaje de corte de bafle ($\% B_c$) definido por la relación longitud entre bafles centrales y el diámetro interno de carcaza $\frac{L_{bc}}{D_c}$. $\% B_c$: Es el corte del bafle expresado

como un porcentaje del diámetro del casco.

Figura 26. Corte del bafle.



3.1.2 Diseño Térmico: Zona de Subenfriamiento. Se hace necesario iniciar con la zona de enfriamiento ya que en esta zona conocemos las temperaturas del proceso facilitando el orden del proceso.

En esta zona se requiere bajar la temperatura del condensado de 100 C a 45 C. El refrigerante, en este caso agua, remueve calor sensible subenfriando el condensado. Para el diseño térmico de esta zona se hace necesario el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{subenfri} = \dot{m}_t \cdot Cp_t \cdot (T_{sat} - T2) \quad (1)$$

$$Q_{agua} = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (t' - t_1) \quad (2)$$

$$Q = U \cdot A_{subenfri} \cdot LMTD \quad (3)$$

$$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T2 - t1)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T2 - t1)}} \quad (4)$$

El proceso de diseño térmico de la zona de subenfriamiento a seguir se presenta en los siguientes pasos:

PASO 1. Cantidad de calor a extraer en el Subenfriamiento.

Para calcular el flujo de calor que desprenderá el condensado al enfriarse dentro de los tubos se utiliza la ecuación (1):

$$Q_{subenfri} = \dot{m}_t \cdot Cp_t \cdot (T_{sat} - T2)$$

$Q_{subenfri}$: Calor sensible del subenfriar.

\dot{m}_t : Flujo masico de vapor

Cp_t : Calor específico²⁹ por el lado de los tubos.

PASO 2. Temperatura intermedia.

Para el cálculo de la temperatura intermedia del agua de enfriamiento (t') tenemos en cuenta que el calor que desprende el condensado al enfriarse es igual al que recibe el agua:

$$Q_{subenfri} = Q_{agua} \quad (5)$$

Despejando de la ecuación (2):

$$t' = \frac{Q_{agua}}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + t_1$$

PASO 3. Diferencia de temperatura media logarítmica

El procedimiento para calcular la diferencia de temperatura media logarítmica en cada una de las zonas del condensador es similar al utilizado en los intercambiadores sin cambio de fase se obtiene a partir de la ecuación (4):

$$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_2 - t_1)}}$$

²⁹ Propiedades del agua, Transferencia de calor Anthony F Mills.

PASO 4. Cálculo de Área de subenfriamiento asumida.

De la ecuación (3) se calcula un área de transferencia de subenfriamiento a partir de un U_{asumido} tomado de tablas, con esta área de subenfriamiento asumida calculamos los parámetros necesarios para corregir el U_{asumido} mediante un proceso de prueba y error.

$$A'_{\text{subenfri}} = \frac{Q}{U_{\text{asumido}} * LMTD}$$

PASO 5. Coeficiente de Transferencia de Calor por el lado Casco

En este punto del proceso debemos calcular el coeficiente de transferencia de calor real externo. Existe una gran cantidad de parámetros o situaciones que intervienen en este coeficiente y por ello harían inaceptable utilizar un valor ideal. Cuando se calcula el coeficiente ideal se asume que el flujo es totalmente transversal al haz de tubos y que existe una única corriente de igual efectividad respecto de los tubos. En realidad, esto no ocurre así y se presentan diversos tipos de corrientes que afectan el desempeño y que se deben tener en cuenta, los diferentes tipos de corrientes son las siguientes:

- Corrientes de fuga de baffle- casco
- Corrientes de fuga de tubo - baffle
- Corrientes de Bypass
- Corrientes de ventana
- Corriente principal en los baffles principales y extremos.

El método que se va a utilizar es el de calcular el valor ideal y luego corregirlo por una serie de factores que tengan en cuenta las diferentes zonas del flujo del lado del casco en donde la interacción térmica entre el fluido y la superficie exterior de los tubos es diferente, como son la zona de flujo en la ventana del baffle, las corrientes de fuga baffle-tubo y baffle-casco, las zonas extremas en donde la distancia entre baffles es diferente, etc.

Este método fue desarrollado por la universidad de Delaware y está basado en una serie de datos de un banco de tubos ideal con geometría similar a un intercambiador de casco y tubos práctico. Por esta razón se utilizaran la tabla y las ecuaciones descritas a continuación o la gráfica como base para los cálculos; tomadas de la sección 3.3.7 del HEDH:

J_i es el factor de Corlun transferencia de calor

f_i es el factor de fricción

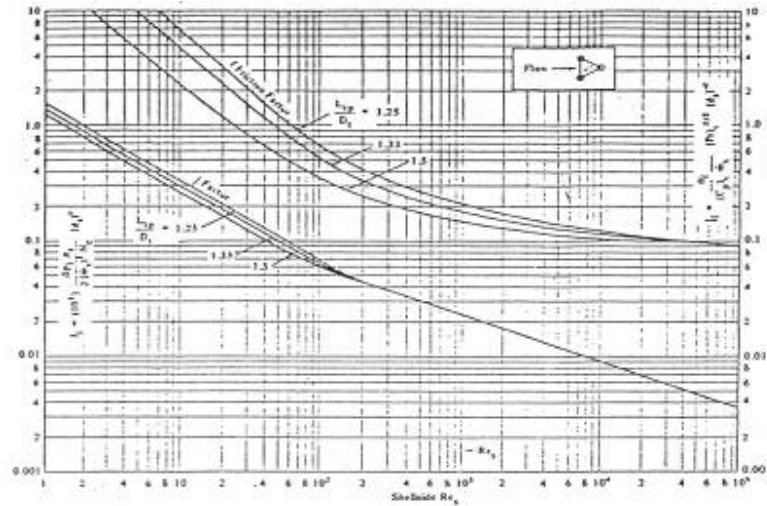
$$J_i = (a_i) \left(\frac{1,33}{L_{tp} / d_e} \right)^a (Re_c)^{a_2} \quad \text{donde} \quad a = \frac{a_3}{1 + 0,14(Re_c)^{a_4}}$$

$$f_i = b_i \left(\frac{1,33}{L_{tp} / d_e} \right)^b (Re_c)^{b_2} \quad \text{donde} \quad b = \frac{b_3}{1 + 0,14(Re_c)^{b_4}}$$

Tabla 4. Constantes para el cálculo del factor de transferencia

Angulo trazado	Re	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
30°	10 ⁵ -10 ⁴	0.321	-0.388			0.372	-0.123		
	10 ⁴ -10 ³	0.321	-0.388			0.486	-0.152		
	10 ³ -10 ²	0.593	-0.477	1.450	0.519	4.570	-0.476	7.00	0.500
	10 ² -10	1.360	-0.657			45.100	-0.973		
	10	1.400	-0.667			48.000	-1.000		

Figura 27. Factor J_i en función de Re para un arreglo a 30° , con parámetro L_{tp}/D_t Tomado de (sección 3, 3,7, figuras 1 del HEDH)



Los factores de J_i se hallan de la tabla conociendo el numero de Re:

$$Re_c = \frac{d_e \dot{m}_s}{\mu} \quad (6)$$

donde \dot{m}_s es el flujo masico por unidad de área mínima de flujo que pasa por el exterior del banco de tubos, se define de la siguiente formula :

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_c}{S_m} \quad (7)$$

\dot{m}_s es el flujo másico del fluido lado del casco por unidad de área mínima de flujo S_m

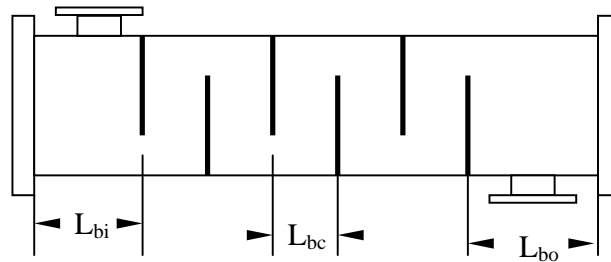
\dot{m}_c [kg/s] corresponde a la rata de masa que se mueve por el casco

Pr_s numero de Prandtl del fluido del casco

$(\phi_s)^r$ es el factor de corrección que tiene en cuenta a variación de la viscosidad entre el valor a la temperatura de la pared del tubo y la temperatura media

del fluido:
$$\phi_c = \left(\frac{\mu_c}{\mu_w} \right)$$

Figura 28. Separación entre baffles



y S_m es el área transversal de flujo mínima dada por la ecuación genérica:

$$S_m = L_{bc} \left[L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp,eff}} (L_{tp} - d_t) \right] \quad (8)$$

L_{bc} : Separación entre baffles centrales

L_{bb} : Espacio diametral en el canal de Bypass.

$L_{tp,eff}$: Es igual a L_{tp} para arreglos de 30 y 90

D_{ct} : Es el diámetro del círculo a través de los centros de los tubos mas alejados.

S_m : Área de flujo transversal

El factor J_i de banco de tubos ideales se relaciona con el coeficiente de convección ideal por la siguiente formula.

$$h_{ideal} = J_i \cdot \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(P_{rs})^{2/3} (\phi)^{-r}} \quad (9)$$

Factores de corrección para el coeficiente de transferencia de calor del casco: el coeficiente calculado en la sección anterior es un coeficiente de transferencia de calor ideal que necesita ser corregido usando los siguientes factores:

$$J_{total} = J_c J_l J_b J_s J_r$$

Factor de corrección por corte del bafle (J_c): el factor J_c es función del corte del bafle BC y del diámetro D_{ctl}, por tanto ambos valores determinan el número de tubos en la ventana del bafle.

En cálculos prácticos el rango de cortes de baffles entre 15 y 45 % se puede expresar como una línea recta dada por la ecuación:

$$J_c = 0.55 + 0.72 * F_c$$

$$F_c = 1 - 2 * F_w$$

$$F_w = \frac{A_w}{A} = \frac{N_{tw}}{N_{tt}}$$

F_c : Fracción de tubos en flujo transversal

F_w: fracción de tubos ubicados en la ventana

N_{tw}: Número de tubos en la ventana

N_{tt}: Número de tubos totales

Factor de corrección por fuga en el bafle (J_l): J_l la diferencia de presión entre los dos compartimentos separados por un bafle, esta diferencia hace que el

fluido penetre en los espacios entre el casco y el borde de la circunferencia del bafle y el espacio entre tubos y orificios en el bafle.

De las dos consideraciones anteriores el flujo entre el casco el bafle es el que más afecta la transferencia de calor, ya que este no interactúa con los tubos. Por el contrario, el flujo entre el tubo y el bafle pasa por la superficie y es parcialmente efectivo. Aunque en algunos casos este flujo va disminuyendo con el paso del tiempo debido a que los pequeños espacios entre el tubo y bafle se van tapando debido a la suciedad.

$$r_{lm} = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m} \quad r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}}$$

- la corrección más severa es cuando $r_s = 1$; es decir que no hay fuga por entre los tubo y bafle, solo hay fuga entre el bafle y el casco.
- La corrección menos severa sería cuando no hubiese fuga entre el casco y el bafle , solo entre bafle y los tubos.
- Un intercambiador bien diseñado debería tener valores de J_1 no menores que 0,6, preferiblemente en el rango entre 0,7 - 0,9 para no sacrificar la eficiencia de la transferencia de calor.

$$J_1 = 0.44(1 - r_s) + [1 - 0.44(1 - r_s)] * e^{-2.2 * r_{lm}}$$

Para el cálculo se deben determinar los siguientes valores:

$$S_{tb} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D_t + L_{tb})^2 - d_e^2] (N_{tt})(1 - F_w)$$

$$S_{sb} = \pi \cdot D_i \left(\frac{L_{sb}}{2} \right) \left(\frac{360 - \theta_{ds}}{360} \right)$$

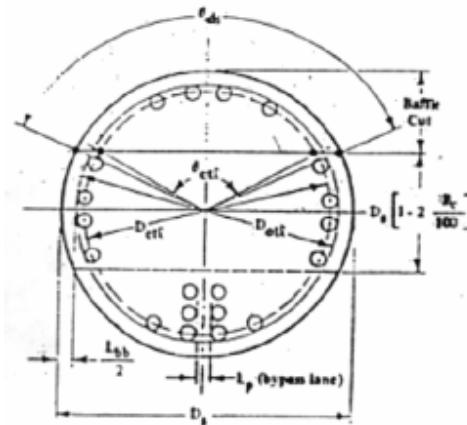
$$\theta_{ds} = 2 \cdot \cos^{-1} \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{BC}{100} \right) \right) \text{ [deg]}$$

$L_{sb} = 1.6 + 0.004D_c$ Aplicaciones de bajo riesgo

$L_{sb} = 3.1 + 0.004D_c$ Con factor de seguridad

Longitud max no soportada	L_{tb}
$< 36''$ o $D_t > 1 \frac{1}{4}''$	$1/32''$ (0.8 mm)
$> 36''$	$1/64''$ (0.4 mm)

Figura 29. Geometría del área transversal del Condensador.



S_{sb} : Área de fuga entre el casco y el bafle

S_{tb} : Área de fuga entre el tubo y el orificio del bafle

S_m : Área de flujo cruzado al centro de haz de tubos.

Factor de corrección por corrientes de bypass en el haz (J_b): la resistencia al flujo en el espacio entre el casco y el haz de tubos es menor que a través del

haz. Por esta razón una parte del flujo buscará irse por allí en proporción a la relación de resistencias del área de bypass y el área de flujo cruzado en el haz:

$$J_b = \exp\left[-C_{bh} * F_{sbp} * \left(1 - \sqrt[3]{2 * r_{ss}}\right)\right]$$

Para determinar J_b se deben conocer los siguientes parámetros:

$$C_{bh} = 1.35 \text{ flujo laminar} \quad Re_s < 100$$

$$C_{bh} = 1.25 \text{ flujo turbulento y de transición} \quad Re_s > 100$$

$$F_{sbp} = \frac{S_b}{S_m}$$

$$S_b = L_{bc} [L_{bb} + L_{pl}]$$

$$L_{pl} = 0 \text{ para cálculos estándar}$$

$$L_{pl} = L_p / 2 \text{ asuma } L_p = d_e$$

$$r_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_{tcc}}$$

$$N_{ss} = \frac{N_{tt} * F_W}{6}$$

$$N_{tcc} = \frac{Dc}{L_{pp}} \left[1 - 2 \frac{Bc}{100}\right]$$

Arreglo	L tp ef	Lpp
30°	L tp	0.866 L tp
45°	0.707 L tp	0.707 L tp
90°	L tp	L tp

S_b = Área de flujo por las corrientes de Bypass

L_{bc} = Espaciamiento central entre bafles

L_{bb} = Espacio casco - haz

L_{pl} = Expresa el efecto de Bypass en el espacio de partición de los tubos

$L_{tp,ef}$ = Paso efectivo, depende del arreglo de los tubos

N_{ss} = Número de platinas de sello en un bafle

NTB = Número de tubos en el bafle

L_{pp} = Distancia entre filas de tubos en la dirección del flujo

N_{tcc} = Numero de filas de tubos cruzados entre las puntas de baffles en una sección de baffles

Factor de corrección por espaciamiento desigual en la entrada y salida (J_s):

esto sucede cuando el espacio de entrada y salida entre el primer y ultimo bafle es mas largo en comparación con el espacio normal entre baffles (L_{bc}).

$$J_s = \frac{(N_b - 1) + (L_i^*)^{(1-n)} + (L_o^*)^{(1-n)}}{(N_b - 1) + (L_i^*) + (L_o^*)}$$

$$L_i^* = \frac{L_{bi}}{L_{bc}}$$

$$L_o^* = \frac{L_{bo}}{L_{bc}}$$

Los valores de la constante de aproximación. (n)

$n = 1/3$ para $Re_s \leq 100$, Flujo laminar.

$n = 0.6$ para $Re_s > 100$; Flujo turbulento.

Nb : Número de baffles.

Lbc : Espaciamiento entre baffles centrales.

Lbi : Espaciamiento entre el primer bafle de entrada y la entrada del fluido, lado casco

Lbo : Espaciamiento entre el ultimo bafle y la salida del fluido.

n : Constante de aproximación

Factor de corrección por gradientes de temperatura (J_R): se ha concluido, que el correspondiente valor del Factor de Corrección J_R según el Número de Reynolds Re_s , puede ser calculado según las expresiones:

Para: $Re_s \leq 20$

$$J_R = 1.51 / (Nc)^{0.18}$$

$$Nc = (Nb + 1) * NFB + (Nb + 2) * NFW$$

➤ Para : $20 \leq Re_s \leq 100$

$$J_R = (J_R)_R + \left[\frac{(20 - Re_s)}{80} \right] * [(J_R)_R - 1]$$

Donde: $J_R = (J_R)_R$, para $Re_s \leq 20$; $J_R \geq 0.4$

➤ Para $Re_s > 100$; Asumir : $J_R = 1$.

Nc : Número total de filas de tubos cruzadas en el intercambiador.

Nb : Número de bafles.

NFB : Número de filas entre puntas de bafles.

NFW : Número de filas en la ventana

J_R : Factor de corrección por el número de filas cruzadas.

Factor total de corrección J_{total} calculado como el producto de los factores anteriores. Pudiendo calcular así el valor real del coeficiente de transferencia externa por le lado del casco:

$$J_{total} = J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s$$

$$h_c = h_{ideal}(J_{total})$$

1.1.1.4 PASO 6. Coeficiente de Transferencia de Calor por el lado de los tubos

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección interno es necesario calcular el Reynolds interno.

$$Re_t = \frac{\rho \cdot V_t \cdot d_i}{\mu} \quad (10)$$

Donde V_t es la velocidad del fluido en cada tubo teniendo el número total de tubos NTT calculamos:

$$V_t = \frac{4 \cdot m_t}{Ntt \cdot \rho \cdot \pi \cdot d_i^2}$$

$$\text{Si } Re_t < 2300 \text{ entonces: } Nu_D = \left[3,66 + \frac{0,0668 \left(\frac{d}{L} \right) Re_t P_r}{1 + 0,04 \left(\left[\frac{d}{L} \right] Re_t P_r \right)^{2/3}} \right] \cdot \phi \quad (11)$$

$$\text{Si } Re_t > 10000 \quad Nu_D = 0,023 Re^{0,8} P_r^{0,7} \phi$$

Si $2300 < Re_t < 10000$ se interpola entre el valor de h_i hallado a 2300 y 10000.

El factor Φ trata de corregir el efecto de la variación de la viscosidad con la temperatura de la sección transversal.

$$\phi_t = \frac{\mu_t}{\mu_w}$$

donde μ_t se calcula a la temperatura media, aritmética, del fluido que se mueve por los tubos y μ_w a la temperatura de la superficie de los tubos.

Calcular el coeficiente de transferencia de calor por el lado de los tubos se halla de la siguiente relación:

$$h_t = Nu \cdot K / D \quad (12)$$

1.1.1.5 PASO 7. Coeficiente global de transferencia de calor.

Una parte esencial y a menudo la más incierta de, de cualquier análisis de intercambiadores de calor es la determinación del coeficiente global de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia se puede determinar a partir del conocimiento de los coeficientes de convección de los fluidos caliente y frío, de los factores de impureza (R_f) y de los parámetros geométricos apropiados.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_t} \cdot \left(\frac{A_o}{A_i}\right) + R_{fi} + \frac{1}{h_c} + R_{fo} \quad (13)$$

Los Factores de impureza R_{fi} y R_{fo} son resistencias térmicas que dependen de la temperatura de operación, velocidad del fluido y tiempo de servicio del intercambiador.

PASO 8. Calculo del Área de subenfriamiento:

Tomando el calor a desalojar y el coeficiente global de transferencia de calor corregido podemos despejar el área requerida para la zona de subenfriamiento, a partir de la ecuación (3):

$$A_{subenfri} = \frac{Q}{U * LMTD}$$

3.1.3 Diseño Térmico: Zona de Condensación. En esta zona tenemos un cambio de fase por lo cual el calor de condensación que debemos remover es un calor latente por parte del vapor; e igualarlo con el calor sensible del agua; el proceso es similar por el lado del casco; se hace necesario el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{cond} = \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (14)$$

$$Q'_{agua} = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot (t_2 - t') \quad (15)$$

$$Q = U \cdot A_{cond} \cdot LMTD \quad (16)$$

$$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T_{sat} - t_2)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_{sat} - t_2)}} \quad (17)$$

El proceso de diseño térmico en la zona de condensación se describe en los siguientes pasos:

1.1.1.6 PASO 1. Cantidad de calor a extraer en condensación.

El cálculo de la cantidad de calor a extraer para realizar el cambio de fase de vapor a líquido se obtiene ecuación (14):

$$Q_{cond.} = \dot{m}_t \cdot h_{fg}$$

$Q_{cond.}$: Calor latente de condensación.

\dot{m}_t : Flujo masico por los tubos, vapor.

h_{fg} : Entalpía de vaporización.³⁰

1.1.1.7 PASO 2. Temperatura intermedia.

El calor que desprende el vapor en su cambio de fase es igual al que recibe el agua:

$$Q_{cond.} = Q'_{agua} \quad (18)$$

entonces podemos conocer la temperatura salida del agua despejando la ecuación (15):

$$t_2 = \frac{Q'_{agua}}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + t'$$

\dot{m}_c : Flujo masico por el lado del casco.

t_2 : Temperatura de salida del agua de refrigeración.

t' : Temperatura intermedia entre las dos zonas.

Cp_c : Calor especifico a la temperatura media del agua³¹

³⁰ Tomado de tablas de propiedades termodinámicas, Termodinámica de Cengel.

³¹ Propiedades de agua, Transferencia de calor Anthony F Mills.

1.1.1.8 PASO 3. Diferencia de temperatura media logarítmica

El procedimiento para calcular la Diferencia de temperatura media logarítmica es similar al de la zona de subenfriamiento.

$$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T_{sat} - t_2)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_{sat} - t_2)}}$$

PASO 4. Cálculo de área de condensación asumida.

De la ecuación (16) se calcula un área de transferencia de condensación a partir de un $U_{asumido} = 925 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ³² tomado de libros de destilación, con esta área de subenfriamiento asumida calculamos los parámetros necesarios para corregir el $U_{asumido}$ mediante un proceso de prueba y error.

$$A'_{cond.} = \frac{Q}{U_{asumido} * LMTD}$$

PASO 5. Coeficiente de Transferencia de Calor por el lado Casco

En el cálculo del coeficiente de transferencia de calor real externo; es similar al de la zona condensación hallando un coeficiente ideal a partir de Reynolds y luego aplicando los factores de corrección:

$$Re_c = \frac{d_e \dot{m}_s}{\mu} \quad (19)$$

$$h'_{ideal} = J_i \cdot \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(P_{rs})^{2/3} (\phi_c)^{-r}} \quad (20)$$

³² Tomado : Part III del Field distillation for herbaceous oil. E.F.K(TIM) DENNY

$$h'_c = h'_{ideal} (J_{total}) \quad (21)$$

PASO 6. Coeficiente de Transferencia de Calor por el lado de los tubos

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección interno se tomaran las ecuaciones de condensación del HEDH sección 3.4.6 :

$$Re_t = \frac{\rho_v \cdot V_t d_i}{\mu_v}$$

Re>40

$$h'_t = 0,8 Re_t^{-0,22} \left[\frac{g \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_v)}{\mu_l^2} \right]^{1/3} \cdot k_l$$

los subíndices l y v indican la fases de liquido y vapor; las propiedades se toman para cada fase a 100C.

k : conductividad térmica de tablas termodinámicas

PASO 7. Coeficiente global de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia se puede determinar a partir del conocimiento de los coeficientes de convección de los fluidos caliente y frío, de los factores de impureza y de los parámetros geométricos apropiados.

$$\frac{1}{U_{condensación}} = \frac{1}{h_t} \cdot \left(\frac{A_o}{A_i} \right) + Rfi + \frac{1}{h_c} + Rfo \quad (26)$$

PASO 8. Calculo del Área de condensación

Para el cálculo del área requerida para la condensación se despejara de la ecuación (3) teniendo ya el coeficiente global de transferencia de calor corregido

$$A_{cond} = \frac{Q}{U * LMTD}$$

3.1.4 Área del condensador. El cálculo del área total del condensador se obtiene sumando el área de condensación y el área de subenfriamiento:

$$A_{total} = A_{cond} + A_{subenfri} \quad (27)$$

Esta es el área total mínima necesaria para condensar el vapor y bajar la temperatura en la cual el aceite esencial obtenido y el hidrosol se separen adecuadamente.

Con el área total podemos hallar la longitud real de los tubos:

$$A_{total} : A_{t1} * Ntt$$

$$L_{real} : A_{t1} / \pi d_i + 2 * L_{ts}$$

A_{cond} : Área necesaria en la zona de condensación

$A_{subenfri}$: Área necesaria en la zona de subenfriamiento

A_{total} : Área total de tubos

A_{t1} : Área de un tubo del condensador

L_{real} : Longitud real de los tubos del condensador

L_{ts} : Espesor de la placaporta tubos.

NTT: Número total de tubos.

3.1.5 Caída de Presión en el condensador. La caída de presión por el lado del casco se calcula mediante el procedimiento de la sección 3.3.8 de Heat Exchanger Design Handbook; la cual se compone de tres distintas partes:

$$\Delta P_c = \Delta P_f + \Delta P_w + \Delta P_e$$

ΔP_f : Caída de presión del fluido cruzado entre los bafles

ΔP_w : Caída de presión en la ventana del bafle.

ΔP_e : Caída de presión al final de las zonas (espaciamiento en el primer y último bafle).

3.1.6 Caída de presión del fluido cruzado entre los bafles. Esta basada en la caída de presión en banco de tubos ideal.

$$\Delta p_f = \Delta p_{bi} * (N_b - 1)(R_b)(R_l)$$

R_b : Factor de corrección por bypass.

R_l : Factor de corrección de fugas

Δp_{bi} : Caída de Presión banco de tubos ideal.

La caída de presión Δp_{bi} basada en banco de tubos ideal es usada por la parte del fluido entre el extremo del bafle de uno de los bafles del compartimiento, donde el número de filas de tubos cruzados, $N_c = N_{tcc}$, y $(\Phi_s)^r$ es el gradiente de viscosidad de pared del tubo.

$$\Delta p_{bi} = 2f_i N_{tcc} \frac{\left(\dot{m}_s\right)^2}{\rho_c} (\Phi_c)^{-r}$$

$$f_i = b_1 \left(\frac{1.33}{L_{ip}/D_t} \right)^b (\text{Re}_c)^{b_2} \quad \text{y} \quad b = \frac{b_3}{1 + 0.14(\text{Re}_c)^{b_4}} \quad 33$$

Factor de corrección por fugas:

$$R_l = \text{EXP}(-1,33 * (1 + r_s) * r_{lm}^p)$$

$$p = -0,15 * (1 + r_s) + 0,8$$

Factor de corrección por bypass

$$R_b = \text{EXP}(C_{bp} F_{sbp} (1 - \sqrt[3]{2r_{ss}}))$$

si $r_{ss} > 1/2$ entonces $R_b = 1$

Los valores r_s , r_{ss} y r_{lm} fueron calculados en los factores de corrección J_1 y J_b .

3.1.7 Caída de presión en la ventana del baffle. El factor θ_{ds} se definido en el calculo del factor de corrección J_1 ; y R_l fue definido anteriormente.

$$\Delta p_w = N_b \left[(2 + 0.6N_{tcw}) \frac{(\dot{m}_w)^2}{2\rho_c} \right] R_l$$

$$N_{tcw} = \frac{0.8}{L_{pp}} \left[D_c \left(\frac{Bc}{100} \right) - (D_c - D_{ctl}) / 2 \right]$$

$$m_w = \frac{\dot{m}_c}{\sqrt{S_m S_w}} \times 10^6$$

$$S_w = S_{wg} - S_{wt}$$

³³ Los valores de b_3 y b_4 son tomados de la Tabla 4.

$$S_{wt} = NttFw(d_t^2 \pi / 4)$$

$$S_{wg} = (D_c^2 \pi / 4)(\theta_{ds} / 360 - \text{sen} / 2\pi)$$

3.1.8 Caída de presión al final de las zonas (espaciamiento en el primer y último bafle)

$$\Delta P_e = \Delta P_{bi} \left(1 + \frac{N_{tcw}}{N_{tcc}} \right) R_b R_s$$

$$R_s = \left(\frac{L_{bc}}{L_{bo}} \right)^{2-n} + \left(\frac{L_{bc}}{L_{bi}} \right)^{2-n}$$

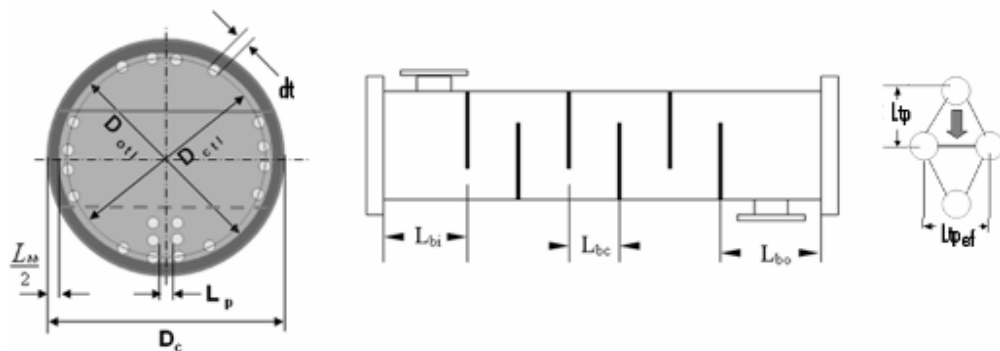
Asumiendo $n=1$ para flujo laminar, $Re < 100$, y $n=0.2$ para flujo turbulento.

3.1.9 Tabulación de datos para el diseño del condensador

A. Datos del proceso:

	Fluido	T. Entrada	T. Salida	Flujo masico
Tubos	Vapor	100C	45C	0.026 Kg/s
Casco	Agua	30C	---	1.03 Kg/s

B. Datos geométricos el condensador:



tubos	di (mm)	10,922	casco	Di (mm)	161,925
	de (mm)	12,7		De (mm)	168,275
	L(m)	1			
L _{tp}	15.3 mm	L _{bb}	11	N _{tt}	72
L _{tp eff}	15.3 mm	L _{pl}	6.35	N _{tw}	16
L _{bc}	138 mm	L _{pp}	13	R _{fi}	0.0035m ² k/W
L _{bi}	148 mm	BC	32%	R _{fo}	0.0035m ² k/W
L _{bo}	143,5mm	Arreglo	30°		
D _{ctl} = D _c - de		D _{ctl} = 161.9 - 12.7		149.2 mm	
D _{otl} = D _c - L _{bb}		D _{otl} = 161.9 - 11		150.9 mm	
L _{sb} = 1.6 + 0.004D _c		L _{sb} = 1.6 + 0.004(161.9)		2.247 mm	

C. Propiedades de los fluidos a temperaturas medias en subenfriamiento³⁴:

Lado de los tubos $\bar{T}_t = 72,5C$	ρ (kg/m ³)	976	Lado del casco $\bar{T}_c = 30,75C$	ρ (kg/m ³)	995	Temperatura de Pared de tubos $T_w = 39C$
	μ (kg/m.s)	4,000x10 ⁻⁴		μ (kg/m.s)	7.98x10 ⁻⁴	
	Pr	2,52		Pr	5,38	
	k (W/m-K)	0,665		k (W/m-K)	0,618	$\mu_w = 6.73 \times 10^{-4}$ kg/m.s
C _p (J/kgK)	4188	C _p (J/kgK)	4176			

³⁴³⁴ Propiedades de agua, Transferencia de calor Anthony F Mills.

D. Pasos del proceso de la zona de subenfriamiento:

Paso	Formula	Remplazando	valor
1	$Q_{subenfri} = \dot{m}_t \cdot C_{p_t} \cdot (T_{sat} - T_2)$	$Q_{sub} = (0.026 \text{ Kg/s})(4188 \text{ J/kgK})(100 - 45)$	5989W
2	$t' = \frac{Q_{agua}}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} + t_1$	$t' = \frac{5989W}{(1.03\text{kg/s}) \cdot (4176 \text{ J/kgC})} + 30C$	31.5C
3	$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_2 - t_1)}}$	$LMTD = \frac{(100 - 31.5) - (45 - 30)}{\ln \frac{(100 - 31.5)}{(45 - 30)}}$	35.3C
4	$A'_{subenfri} = \frac{Q}{U_{asumido} * LMTD}$	$A'_{subenfri} = \frac{5989W}{(167 \text{ W/m}^2 \cdot C) * (35.2C)}$	1.019m ²
5	$S_m = \frac{L_{bc} \cdot (L_{bb} + D_{ctl} / L_{tpefi} (L_{tp} - d_t))}{L_{bc} \cdot (L_{bb} + D_{ctl} / L_{tpefi} (L_{tp} - d_t))}$	$S_m = 0.138 \left[0.011 + \frac{0.1382}{0.0153} (0.0153 - 0.0127) \right]$	0,00476 m ²
	$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_c}{S_m}$	$\dot{m}_s = \frac{1.03 \text{ Kg/s}}{0.00476 \text{ m}^2}$	216.4 kg/m ² s
	$Re_c = \frac{d_e \dot{m}_s}{\mu}$	$Re_c = \frac{(0.0127\text{m}) \cdot (216.4\text{kg/s} \cdot \text{m}^2)}{7.98 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}}$	3445
	$T_w = \left(\frac{\bar{T}_t - \bar{T}_c}{1 + (h_t / h_c)} \right)$	$T_w = \left(\frac{72.5 - 30.75}{1 + (233 / 2753)} \right)$	39C
	$\phi_c = \left(\frac{\mu_c}{\mu_w} \right)$	$\phi_c = \left(\frac{7.98 \times 10^{-4}}{6.73 \times 10^{-4}} \right)$	1.19
	$a = \frac{a_3}{1 + 0.14(Re_c)^{a_4}}$	$a = \frac{1.45}{1 + 0.14(3445)^{0.519}}$	0,139
	$J_i = (a_i) \left(\frac{1.33}{L_{tp} / d_e} \right)^{a_1} (Re_c)^{a_2}$	$J_i = (0.321) \left(\frac{1.33}{0.0153 / 0.012} \right)^{0.139} (3445)^{-0.388}$	0,0138
	$h_{ideal} = J_i \cdot \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(P_{rs})^{2/3} (\phi)^{-r}}$	$h_i = 0.0138 \frac{(4176\text{J/kgK})(216.4\text{kg/s} \cdot \text{m}^2)}{(5.38)^{2/3} (1.19)^{-0.14}}$	4158 W/m ² .K
	$h_c = h_{ideal} (J_{total})^{35}$	$h_c = (4158 \text{ W/m}^2 \cdot K) \cdot (0.662)$	2753 W/m ² .K

³⁵ El factor de corrección será calculado en el INTEM G de esta tabla.

6	$\phi_t = \frac{\mu_t}{\mu_w}$	$\phi_t = \frac{4 \cdot 10^{-4} \text{ kg / m.s}}{6.73 \cdot 10^{-4} \text{ kg / m.s}}$	0.594
	$V_t = \frac{4 \cdot m_t}{Ntt \cdot \rho \cdot \pi \cdot d_i^2}$	$V_t = \frac{4 \cdot (0.026 \text{ kg / s})}{72 \cdot (976 \text{ kg / m}^3) \cdot \pi \cdot (0.0109 \text{ m})^2}$	$3.96 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
	$Re_t = \frac{\rho \cdot V_t \cdot d_i}{\mu}$	$Re_t = \frac{(976 \text{ kg / m}^3)(3.96 \cdot 10^{-3} \text{ m / s})(0.0109 \text{ m})}{(4 \cdot 10^{-4} \text{ kg / m.s})}$	105
	$Nu = \left[3,66 + \frac{0,0668(D/L)RePr}{1 + 0,04(D/L)RePr} \right] \phi$	$Nu = \left[3,66 + \frac{0,0668(0.0109/0.4)(105)(2.52)}{1 + 0,048((0.0109/0.4)(105)(2.52))^{2/3}} \right] 0.59$	3.83
	$h_t = Nu \cdot k / d_i$	$h_t = (3.83) \cdot (0,665 \text{ W/mK}) / 0.0109 \text{ m}$	$233 \text{ W/m}^2\text{K}$
7	$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_t} \cdot \left(\frac{A_o}{A_i} \right) + Rfi + \frac{1}{h_c} + Rfo$	$\frac{1}{U} = \frac{1}{233 \text{ W / m}^2 \text{ K}} \cdot \left(\frac{1,0173}{1,133} \right) + 0.0035 \text{ m}^2 \text{ K / W}$ $+ \frac{1}{2753 \text{ W / m}^2 \text{ K}} + 0.0035 \text{ m}^2 \text{ K / W}$	$165 \text{ W/m}^2\text{K}$
8	$A_{subenfri} = \frac{Q}{U_{calculado} * LMTD}$	$A'_{subenfri} = \frac{5989 \text{ W}}{(165 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}) * (35.2 \text{ C})}$	1.027 m²

E. Propiedades de los fluidos en condensación³⁶:

Lado de los tubos	$h_{fg}(\text{kJ/kg})$	2257	Lado del casco	$\rho(\text{kg/m}^3)$	993	Temperatura de Pared de tubos
	$\rho_v(\text{kg/m}^3)$	0,5977		$\mu(\text{kg/m.s})$	6.95 E-04	
$T_{sat}=100\text{C}(\text{vapor})$	$\mu_v(\text{kg/m.s})$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$\bar{T}_c = 38.25\text{C}$	Pr	4.6	$T_i = 95\text{C}$
$T=100\text{C}(\text{liquido})$	$\rho_l(\text{kg/m}^3)$	958		$k(\text{W/mK})$	0,628	$\mu_w = 3.02 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m.s}$
	$\mu_l(\text{kg/m.s})$	$2,82 \cdot 10^{-4}$	$C_p(\text{J/kgK})$	4174		
	$K_l(\text{W/mK})$	0,681				

F. Pasos del proceso de la zona de condensación:

Paso	Formula	Reemplazando	valor
1	$Q_{cond.} = \dot{m}_t \cdot h_{fg}$	$Q_{cond.} = (0.026 \text{ Kg/s}) \cdot (2257 \text{ KJ/Kg})$	58682 W
2	$t_2 = \frac{Q'_{agua}}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + t'$	$t_2 = \frac{58682 \text{ W}}{(10.3 \text{ kg/s}) \cdot (4174 \text{ J/kg K})} + 31.5$	45C

³⁶ Propiedades de agua, Transferencia de calor Anthony F Mills.

3	$LMTD = \frac{(T_{sat} - t') - (T_{sat} - t_2)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_{sat} - t_2)}}$	$LMTD = \frac{(100 - 31.5) - (100 - 45)}{\ln \frac{(100 - 31.5)}{(100 - 45)}}$	61.5C
4	$A'_{cond.} = \frac{Q}{U_{asumido} * LMTD}$	$A'_{subenfri} = \frac{58682W}{(810 W/m^2 \cdot K) * (61.5C)}$	1.177 m ²
5	$Re_c = \frac{d_e \dot{m}_s}{\mu}$	$Re_c = \frac{(0.0125m) \cdot (216.4kg/s \cdot m^2)}{6.95 \times 10^{-4} kg / m^2 \cdot s}$	3955
	$\phi_c = \left(\frac{\mu_c}{\mu_w} \right)$	$\phi = \frac{6.95 \times 10^{-4} kg / m \cdot s}{3.02 \times 10^{-4} kg / m \cdot s}$	2.3
	$a = \frac{a_3}{1 + 0,14(Re_c)^{a_4}}$	$a = \frac{1.45}{1 + 0,14(3955)^{0.519}}$	0,128
	$J_i = (a_i) \left(\frac{1,33}{L_{tp} / d_e} \right)^a (Re_c)^{a_2}$	$J_i = (0.321) \left(\frac{1,33}{0.0153 / 0.012} \right)^{0.128} (3835)^{-0.388}$	0,0131
	$h_{ideal} = J_i \cdot \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(P_{rs})^{2/3} (\phi_c)^{-r}}$	$h_i = 0.0131 \frac{(4174 J/kgK)(257,8kg/s \cdot m^2)}{(4.6)^{2/3} (2.3)^{-0.14}}$	4798 W/m ² .K
	$h_c = h_{ideal} (J_{total})$	$h_c = (4798 W/m^2 \cdot K) \cdot (0.69)$	3176 W/m ² .K
6	$Re_t = \frac{\rho_v \cdot V_t d_i}{\mu_v}$	$Re_t = \frac{(0.5977kg / m^3)(3.96 \times 10^{-3} m / s)(0.0109m)}{(1.23 \times 10^{-5} kg / m \cdot s)}$	3431
	$h'_t = 0,8 Re_t^{-0.22} \left[\frac{g \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_v)}{\mu_l^2} \right]^{1/3} \cdot k_l$	$h'_t = 0,8(3431)^{-0.22} \left[\frac{9.81(958)(958 - 0.597)}{(2.82 \times 10^{-4})^2} \right]^{1/3} (0.681)$	4395
7	$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_t} \cdot \left(\frac{A_o}{A_i} \right) + Rfi + \frac{1}{h_c} + Rfo$	$\frac{1}{U} = \frac{1}{4395W / m^2 K} \cdot \left(\frac{1,0173}{1,133} \right) + 0.0035m^2 K / W + \frac{1}{3176W / m^2 K} + 0.0035m^2 K / W$	815 W/m ² .K
8	$A'_{subenfri} = \frac{Q}{U_{calculado} * LMTD}$	$A'_{subenfri} = \frac{58682W}{(815 W/m^2 \cdot K) * (61.5C)}$	1.18m ²

G. Factores de corrección del coeficiente de transferencia de calor del lado del casco:

Factor	Formula	Remplazando	valor
Jc	$F_w = \frac{A_w}{A} = \frac{Ntw}{Ntt}$ Ntw =16 Ntt =72	$F_w = 16/72$	0.222
	$F_c = 1 - 2 * F_w$	$F_c = 1 - 2 * (0.222)$	0.556
	$J_c = 0.55 + 0.72 * F_c$	$J_c = 0.55 + 0.72 * (0.556)$	0.956
Ji	$\theta_{ds} = 2 \cdot \text{Cos}^{-1} \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{BC}{100} \right) \right) [\text{deg}]$	$\theta_{ds} = 2 \cdot \text{Cos}^{-1} \left(1 - 2 \cdot \left(\frac{30}{100} \right) \right)$	138
	$S_{sb} = \pi \cdot D_i \left(\frac{L_{sb}}{2} \right) \left(\frac{360 - \theta_{ds}}{360} \right)$	$S_{sb} = \pi \cdot 161.9 \left(\frac{2.247}{2} \right) \left(\frac{360 - 138}{360} \right)$	352.4 mm ²
	$S_{tb} = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_e + L_{tb})^2 - d_e^2] (Ntt)(1 - F_w)$	$S_{tb} = \frac{\pi}{4} \cdot [(12.7 + 0.8)^2 - 12.7^2] (72)(1 - 0.22)$	922 mm ²
	$r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}}$	$r_s = \frac{352.4}{352.4 + 922}$	0.28
	$r_{lm} = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m}$	$r_{lm} = \frac{352.4 + 922}{4759}$	0.26
	$J_l = 0.44(1 - r_s) + [1 - 0.44(1 - r_s)] * e^{-2.2 * r_{lm}}$	$J_l = 0.44(1 - 0.28) + [1 - 0.44(1 - 0.28)] * e^{-2.2 * 0.26}$	0.7
Jb	$S_b = L_{bc} [L_{bb} + L_{pl}]$	$S_b = 138 * [11 + 6.35]$	2394
	$N_{ss} = \frac{Ntt * F_w}{6}$	$N_{ss} = \frac{72 * 0.22}{6}$	2.64
	$N_{tcc} = \frac{Dc}{L_{pp}} \left[1 - 2 \frac{Bc}{100} \right]$	$N_{tcc} = \frac{161.9}{13} \left[1 - 2 \frac{32}{100} \right]$	4.4
	$r_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_{tcc}}$	$r_{ss} = \frac{2.64}{4.4}$	0.6
	$F_{sbp} = \frac{S_b}{S_m}$	$F_{sbp} = \frac{2394}{4759}$	0.51
	$J_b = \exp \left[-C_{bh} * F_{sbp} * \left(1 - \sqrt[3]{2 * r_{ss}} \right) \right]$	$J_b = \exp \left[-1.25 * 0.51 * \left(1 - \sqrt[3]{2 * 0.6} \right) \right]$	1
Js	$L_i^* = \frac{L_{bi}}{L_{bc}}$	$L_i^* = \frac{148}{138}$	1.07
	$L_o^* = \frac{L_{bo}}{L_{bc}}$	$L_o^* = \frac{143.5}{138}$	1.04

	$J_S = \frac{(N_b - 1) + (L_i^*)^{(1-n)} + (L_o^*)^{(1-n)}}{(N_b - 1) + (L_i^*) + (L_o^*)}$	$J_S = \frac{(6-1) + (1.07^*)^{(1-0.6)} + (1.04)^{(1-0.6)}}{(6-1) + (1.07) + (1.04)}$.99
J_R	Re > 100	J _R = 1	1
J_{total}	$J_{total} = J_c J_l J_b J_s J_r$	J _{total} = (0.956)(0.7)(0.51)(0.99)(1)	0.662

H. Área necesaria del condensador:

Formula	Remplazando	valor
$A_{total} = A_{cond} + A_{subenfri}$	$A_{total} = 1.027 + 1.18$	2,21m ²
$A_{t1} = A_{total} / Ntt$	$A_{t1} = 2.20 / 72$	0,03068m ²
$L_{real} = A_{t1} / \eta d_t + 2 * L_{ts}$	$L_{real} = 0.03056 / (\eta * 10.9 \times 10^{-3}) + 2 * (0.012)$	0.92 m ²

I. Calculo de la caída de Presión en el condensador:

Factor	Formula	Remplazando	valor
Δp_f	$b = \frac{b_3}{1 + 0.14(\text{Re}_c)^{b_4}}$	$b = \frac{7}{1 + 0.14(3445)^{0.5}}$	0.459
	$f_i = b_1 \left(\frac{1.33}{L_p / D_t} \right)^b (\text{Re}_c)^{b_5}$	$f_i = 0.486 \left(\frac{1.33}{15.3 / 12.7} \right)^{0.459} (3445)^{0.5}$	0.1519
	$\Delta p_{bi} = 2 f_i N t c c \frac{(m_s)^2}{\rho_c} (\Phi_c)^{-r}$	$\Delta p_{bi} = 2(0.15)(4.4) \frac{(216.4)^2}{(995)} (1.19)^{-0.28}$	59 Pa
	$p = -0,15 * (1 + r_s) + 0,8$	$p = -0,15 * (1 + 0.28) + 0,8$	0.608
	$R_l = \text{EXP}(-1,33 * (1 + r_s) * r_{lm}^p)$	$R_l = \text{EXP}(-1,33(1 + 0.28)(0.26)^{0.6})$	0.47
	$r_{ss} > 1/2$	$R_b = 1$	1
	$\Delta p_f = \Delta p_{bi} * (N_b - 1)(R_b)(R_l)$	$\Delta p_f = (59)(6 - 1)(1)(0.47)$	139 Pa
Δp_w	$S_{wg} = (D_c^2 \pi / 4) (\theta_{ds} / 360 - \text{sen} / 2\pi)$	$S_{wg} = (161.9^2 \pi / 4) (138 / 360 - \text{sen} 138 / 2\pi)$	5699 mm ²
	$S_{wt} = N t t F w (d_t^2 \pi / 4)$	$S_{wt} = 72 * 0.22 (12.7^2 \pi / 4)$	2007 mm ²
	$S_w = S_{wg} - S_{wt}$	$S_w = 5699 - 2007$	3692 mm ²

	$m_w = \frac{\dot{m}_c}{\sqrt{S_m S_w}} \times 10^6$	$m_w = \frac{1.03}{\sqrt{4760 * 3692}} \times 10^6$	245.7 Kg/m ² s
	$N_{tcw} = \frac{0.8}{L_{pp}} \left[D_c \left(\frac{Bc}{100} \right) - (D_c - D_{ctl}) / 2 \right]$	$N_{tcw} = \frac{0.8}{13} \left[161.9 \left(\frac{32}{100} \right) - (161.9 - 138) / 2 \right]$	2.45
	$\Delta p_w = N_b \left[(2 + 0.6 N_{tcw}) \frac{(\dot{m}_w)^2}{2 \rho_c} \right] Rl$	$\Delta p_w = 6 \left[(2 + 0.6 * 2.45) \frac{(245.7)^2}{2 * 995} \right] 0.47$	296 Pa
Δp_e	$R_s = \left(\frac{L_{bc}}{L_{bo}} \right)^{2-n} + \left(\frac{L_{bc}}{L_{bi}} \right)^{2-n}$	$R_s = \left(\frac{138}{143.5} \right)^{2-0.2} + \left(\frac{138}{148} \right)^{2-0.2}$	1.81
	$\Delta P_e = \Delta P_{bi} \left(1 + \frac{N_{tcw}}{N_{icc}} \right) R_b R_s$	$\Delta P_e = 59 \left(1 + \frac{2.45}{4.4} \right) (1) * 1.81$	166 Pa
Δp_c	$\Delta P_c = \Delta P_f + \Delta P_w + \Delta P_e$	$\Delta P_c = 139 + 296 + 166$	601 Pa

3.2 DISEÑO MECÁNICO

El condensador es un intercambiador de calor de casco y tubos que consiste básicamente en un cuerpo o carcasa el cual envuelve un grupo de tubos rectos y paralelos en su interior. Su finalidad es la de transferir calor entre el vapor y el agua. Los fluidos en ningún caso se mezclan, y la transferencia de calor se hará por convección y conducción a través de las paredes que los separa, en este caso las paredes de los tubos.

El intercambiador de calor presenta dos cámaras: el cuerpo y los tubos separadas entre si y evitando que los fluidos se mezclen. El diseño de intercambiadores de calor de casco y tubos se encuentra estandarizado en normas y manuales internacionales como son:

- Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA).
- Heat Exchange Design Handbook (HEDH).

- ASME Code, Section VIII (American Society of Mechanical Engineers).

En general las recomendaciones TEMA se refieren a una serie de consideraciones para el diseño y la fabricación de intercambiadores tubulares producto de la experiencia de los fabricantes a lo largo de los años. Considera aspectos como los tipos y la designación mas comúnmente utilizados en la construcción de intercambiadores de calor tubulares y la clase de aplicación que se da al intercambiador de acuerdo a la severidad del servicio.

3.2.1 Partes del intercambiador de calor. Un intercambiador de calor de casco y tubos consta de las siguientes partes:

- **Cabezal Frontal:** se le llama así al cabezal por donde entra el fluido del lado de los tubos.

- **Cuerpo del Intercambiador:** es por donde circula uno de los fluidos y dentro de el se lleva a cabo la transferencia de calor. Alberga en su interior al haz tubular. El cuerpo del intercambiador puede ser fabricado con laminas enrolladas, cuerpos tipo "pipe" o tubo en donde el cuerpo es un tubo enterizo.

- **Cabezal Posterior:** se le llama así al cabezal por donde sale el fluido del intercambiador. Consta de una brida y una cubierta soldadas entre si.

- **Boquillas de entrada y de salida de los fluidos:** por donde entran y salen los fluidos.

- **Baffles:** cumplen dos funciones básicamente, guían el fluido del lado del cuerpo para que su circulación sea en lo posible de forma perpendicular a los tubos, incrementando así el coeficiente de transferencia de calor y a su vez el aumentando el recorrido del fluido en el cuerpo, y también sirve de soporte de los tubos. Son cortados de tal manera que el fluido del lado del cuerpo puedan circular.

- **Haz de tubos:** va apoyado entre dos placas portatubos, su forma de fijación en la placa tubular será por expandido del tubo dentro de la placa. Por ellos circulara el fluido que entra en el intercambiador de calor.

- **Placa portatubos:** se usa para sostener los tubos en el cuerpo del intercambiador de calor.

- **Empaquetaduras:** van colocadas en todas las uniones entre las bridas.

3.2.2 Clasificación y designación de intercambiadores de calor.

Clasificación los intercambiadores de calor: según esto las normas TEMA clasifican los intercambiadores de calor de casco y tubos por clases de acuerdo a la severidad del servicio que van a prestar:

CLASE R - Requerimientos severos, industria de petróleo o procesos relacionados. Son diseñados de tal forma que presentan una alta seguridad y durabilidad bajo servicio riguroso.

CLASE C - Requerimientos moderados en procesos comerciales y aplicaciones generales. Son equipos diseñados y fabricados de tal forma que sean económicos pero seguros.

CLASE B - Son intercambiadores usados en la industria química.

Según clasificación y teniendo en cuenta que se busca diseñar un condensador para la destilación de aceites esenciales eficiente, económico y seguro se selecciono como condensador de casco y tubo clase C.

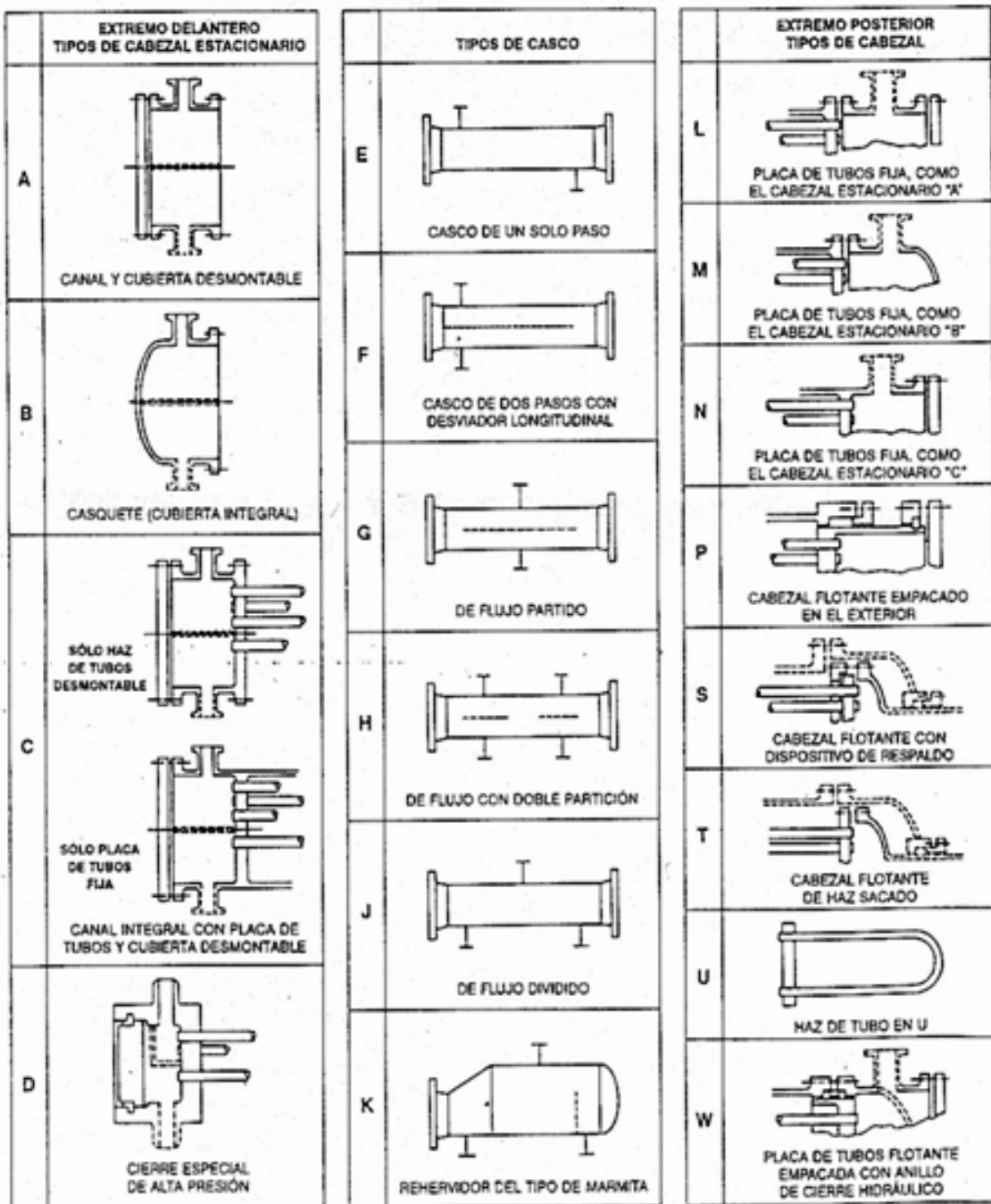
Designación de intercambiadores de calor: la norma TEMA recomienda para la identificación de intercambiadores de calor de cascos y tubos el uso de números y letras. Las letras estarán de acuerdo al tipo de cabezal y cuerpo, y los números identificarán el diámetro interno del cuerpo en pulgadas redondeada en número entero más cercano, así como la longitud recta de los tubos en pulgadas.

Para identificar el número de pasos, se utilizan número enteros en donde el primer número identificara el número de pasos en el lado del cuerpo. La norma TEMA designa para cada uno de los anteriores ítems una letra como se muestra en la figura.

Descripción del Condensador: intercambiador de casco y tubos para extracción de aceites esenciales es un intercambiador con cabezal frontal tipo B, cuerpo tipo E, con 6.38 pulgadas de diámetro interno, cabezal posterior tipo L, tubos de 1m (39.37 pulgadas) de longitud, un paso cuerpo y un paso por los tubos, clase C: Por tanto su designación seria: **CLASE C, 6-39, TIPO BEM 1-1**

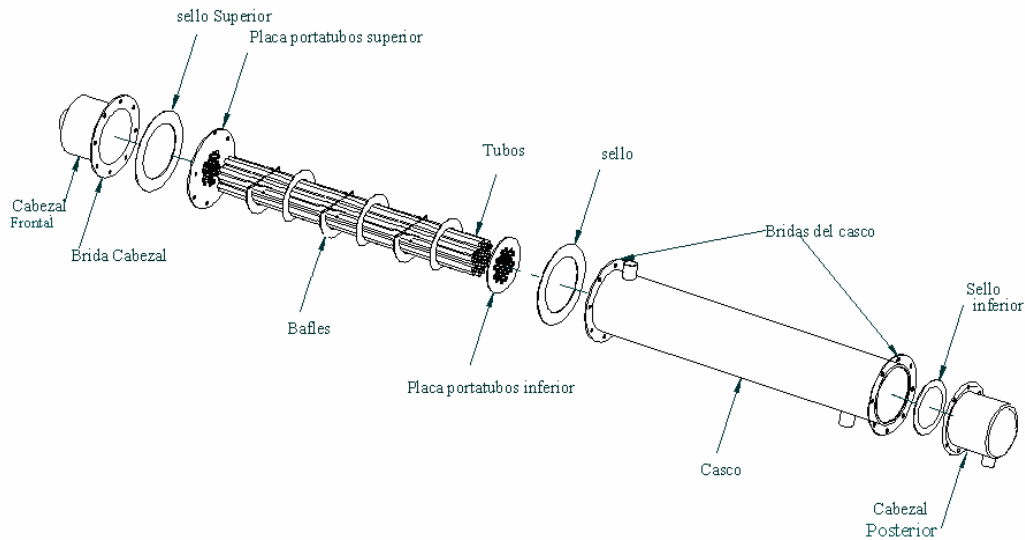
3.2.3 Diseño según normas TEMA. Las normas TEMA, de acuerdo a la clase de servicio, da recomendaciones específicas para la selección, diseño y consideraciones especiales de cada una de las partes de un intercambiador de calor de cascos y tubos.

Figura 30. Designación de intercambiadores.



Se tienen en cuenta para el diseño del condensador los ítems descritos a continuación:

Figura 31. Diseño mecánico del condensador.



Aplicación y requerimientos generales.

- **Definición de la Clase TEMA de Intercambiador de Calor.** La clase C de Intercambiadores de Calor es un diseño específico de fabricación generalmente para requerimientos moderados en procesos comerciales y aplicaciones generales. Son equipos diseñados y fabricados de tal forma que son tanto económicos como seguros. Generalmente son equipos compactos.

- **Códigos de Construcción.** En general el diseño cumple con las normas para diseños de recipientes a presión de la ASME los cuales complementan la norma TEMA en el diseño específico de intercambiadores de calor.

- **Materiales.** Por las condiciones requeridas del proceso se requiere de un casco en acero inoxidable ASME SA 240 grado 304 y los tubos en cobre tipo L.

- **Normalización de Pruebas.** Se realiza una prueba hidrostática (30 min.). La prueba se realiza por separado para cascos y tubería y así detectar posibles fugas en las uniones. La presión de la prueba hidrostática debe ser 1.5 veces mayor a la presión de diseño corregida por temperatura.

3.2.4 Diseño del Casco del condensador. El material seleccionado para la construcción del Casco es acero inoxidable SA240 grado 304 debido a los requerimientos y condiciones del proceso de destilación de aceites esenciales. Para determinar el espesor del casco se usaran las formulas de diseño del código ASME sección VIII pero en ningún caso el espesor nominal del casco debe ser menor que el mostrado en la Tabla 5.

Para el cálculo del espesor mínimo del casco según el código ASME VIII se define los siguientes parámetros:

- **Presión de operación (Po):** es la presión a la que trabaja el equipo en condiciones nominal del sistema.

- **Máxima presión de operación (Mpo):** es la mayor presión de trabajo en el sistema.

- **Presión de diseño (Pd):** seleccionamos la mayor entre las siguientes: $Pd = 1.1 * Mpo$ o $Pd = Mpo + 25$ (psi)

- **Presión de prueba (PP):** Es 1.5 veces la presión de diseño.

A partir de las anteriores definiciones podemos calcular la presión de diseño, tomando una bomba capaz de suministrar el flujo de agua necesario para el

enfriamiento; esta bomba tendrá un máximo de 25 psi (Mpo). Calculando así:

$$Pd = 1.1 * Mpo \quad \text{o} \quad Pd = Mpo + 25 \text{ (psi)}$$

$$Pd = 1.1 * (25 \text{ psi}) = 27.5 \text{ psi.}$$

$$Pd = 25 \text{ psi} + 25 = 50 \text{ psi.}$$

En este caso la Pd = 50 psi (344.8 kPa)

Para calcular el espesor mínimo del casco:

$$t = \frac{Pd * R}{S * E - 0.6Pd} \quad (22)$$

t : mínimo espesor requerido para el casco.

Pd : Presión de diseño en KPa.

R : Radio interior del casco.

S : Máximo valor de esfuerzo admisible 103670 kPa.

E : 0.6 la eficiencia de la junta.

Reemplazando en la expresión para el cálculo del espesor mínimo del casco:

$$t = \frac{(344.8) * (0.161)}{(103670) * 0.6 - 0.6 * (344.8)}$$

De allí se obtiene que t = 0.9 mm. El espesor nominal no debe ser menor que el mostrado en la Tabla 5, tomada de la Norma TEMA sección C-3.13

Como el espesor obtenido por formula es menor entonces seleccionamos el espesor de la tabla tomado para el casco de 6'' un espesor de 1/8'' (3.175mm).

Tabla 5. Espesores mínimos de cascos de intercambiadores.

Diámetro nominal de casco	Espesor mínimo		
	Acero al carbón		Aleación
	PIPE	Lamina	
6"	Sch. 40	-	1/8"
8" a 12"	Sch. 30	-	1/8"
13" a 23"	Sch. 20	5/16"	1/8"
24" a 29"	-	5/16"	3/16"
30" a 39"	-	3/8"	1/4 "
40" a 60"	-	7/16"	1/4 "

3.2.5 Diseño de los tubos del condensador. Para determinar el espesor de los tubos se usan las formulas de diseño del código ASME sección VIII usadas en el casco, tomando como máxima presión de operación la presión del sistema que en este caso es 3 psi.

$$Pd = 1.1 * Mpo \quad \text{o} \quad Pd = Mpo + 25 \text{ (psi)}$$

$$Pd = 1.1*(3\text{psi}) = 3.3 \text{ psi.}$$

$$Pd = 3\text{psi} + 25\text{psi} = 28\text{psi.}$$

Por lo tanto la Presión de diseño es Pd es igual a 28 psi (193 KPa) para el lado de los tubos .

$$\text{Usando la ecuación (22): } t = \frac{Pd * R}{S * E - 0.6Pd}$$

Reemplazando para el cálculo del espesor mínimo de los tubos:

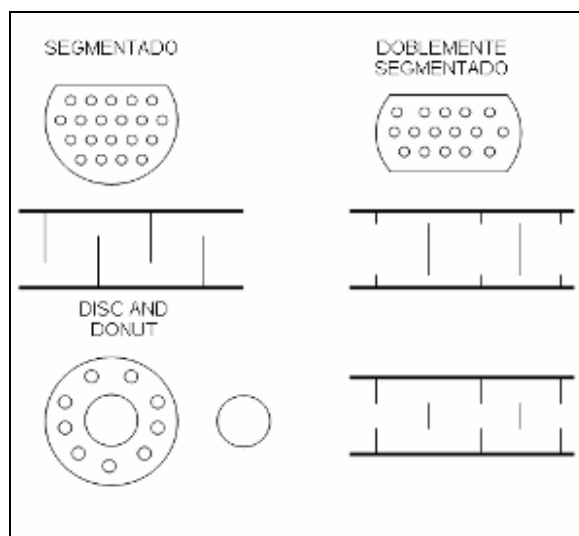
$$t = \frac{(193) * (0.161)}{(202600) * 0.6 - (0.6) * (193)}$$

De allí se obtiene que t = 0.3 mm. El anexo B muestra un listado de diámetros y espesores de tubos estándar para tubería de cobre tipo K, L y M rígida

norma ASTM B-88. Seleccionando tubería de cobre TIPO L 3/8 (De=1/2'=12.7mm, Di=10.922 mm. t = 1.25 mm)³⁷; La tubería de cobre es más apropiada para la obtención de aceites de mayor calidad comparada con la calidad obtenida con tubería de acero.

3.2.6 Diseño de los Bafles del condensador. Los bafles pueden presentar las siguientes configuraciones.

Figura 32. Configuraciones de los bafles



Corte de los Bafles: el corte del bafle se expresa como un parámetro adimensional definido como la relación:

$$Bc = \left(\frac{L_{bch}}{D_c} \right) * 100$$

El valor adecuado para diseño del parámetro Bc, se puede obtener, a partir de una vasta cantidad de experiencia práctica, que garantiza una distribución del flujo en la zona transversal del banco de tubos y en la ventana del bafle

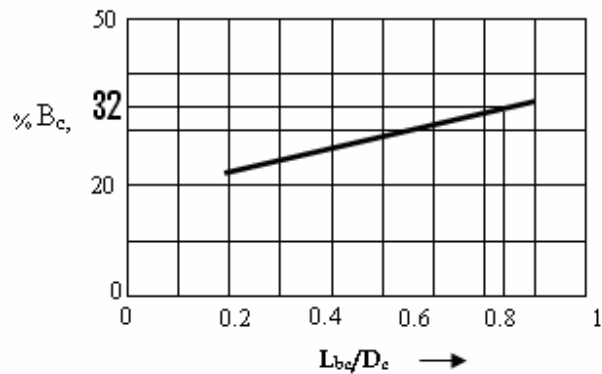
³⁷ Tubería de cobre tipo K, L, M, rígida Norma ASTM B-88, ver anexo No B

sin recirculaciones ni canalizaciones, en la figura siguiente como función de la relación L_{bc} / D_c donde:

L_{bc} : Separación entre baffles centrales.

D_c : El diámetro interno del casco.

Figura 33. Valores recomendados del corte del baffle³⁸



Los baffles a utilizar son baffles segmentados con un porcentaje de corte de baffle de (BC) igual a 32 % debido a que la relación L_{bc} / D_c es igual a $L_{bc} / D_c = 138 / 161,925 = 0.85$ muestra en la figura.

3.2.7 Diseño de los cabezales del condensador. La norma TEMA designa que para cabezales de un solo paso la profundidad hasta el eje de la boquilla será de un mínimo de $1/3$ del diámetro de la boquilla.

3.2.8 Selección de los Empaques. Los empaques serán hechos de una sola pieza. Esto no incluirá empaques fabricados integralmente por la soldadura.

³⁸ Esta grafica se puede encontrar en la figura 4 de la sección 3.3.5 del HEDH.

Los empaques más usados, con sus factores están dados en el Anexo C. En la tabla se observa el tipo de material empaque recomendado para cada fluido.

3.2.9 Diseño de la placa portatubos. El diseño mecánico de la placa portatubos comprende el cálculo del espesor efectivo requerido. El espesor debe ser determinado por la mayor presión soportada por la placa tubular o portatubos, ya sea la presión del fluido del lado casco, o del fluido lados tubo. Las recomendaciones a seguir se encuentran en la sección C-7 de la norma.

Calculo del espesor efectivo de la placa portatubos: se calcula el espesor por flexión, por cizallamiento, y por norma y se escoge el mayor entre estos.

Espesor por Flexión:

$$t_p = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{S}} \quad (23)$$

En donde:

t_p = espesor efectivo de placa portatubo por flexión.

S = esfuerzo de trabajo permisible

P = Presión hidrostática para lado casco

F = En placas portatubos estacionarias es igual a 1.

G = Diámetro medio de empaque de la placa portatubos.

Espesor por cizallamiento:

$$t_p = \frac{0.31DL}{(1 - \frac{D_t}{p})} * (\frac{P}{S}) \quad (24)$$

En donde:

DL = Diámetro equivalente (perímetro límite =4*A/C)

C = Perímetro exterior del banco de tubos

A = Área encerrada por el perímetro exterior del banco de tubos

D_t = Diámetro exterior del tubo

p = Espacio entre tubos centro a centro

P = Presión hidrostática lado casco

S = Esfuerzo de trabajo a tensión permitida

Espesor por Norma: las normas TEMA (C7.121) advierte que en ningún caso el espesor de la placa portatubos-corrosión sea menor de ¾ del diámetro externo de los tubos. El cálculo del espesor de la placa portatubos y sus variables lo podemos encontrar en la siguiente tabla.

Tabla 6. Cálculo de la placa portatubos.

<i>POR FLEXION</i>	<i>tp</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>P (kPa)</i>	<i>S (kPa)</i>
$T = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{S}}$	5,20	1	176,00	379,2	108455
<i>POR CIZALLAMIENTO</i>	<i>t_p</i>	<i>A (mm²)</i>	<i>C (mm)</i>	<i>D_L = 4*(A/C)</i>	<i>p (paso)</i>
$T = \frac{0.31 DL}{(1 - \frac{do}{p})} * (\frac{P}{S})$	0,09	17671,46	444	159,20	15,3
<i>POR NORMA</i>	<i>tp</i>	<i>D_t (mm)</i>	Seleccionando el mayor en este caso t_p = 9,53 mm		
$t_p = 3/4 * D_t$	9,53	12,5			

De acuerdo a lo anterior, el espesor de la placa portatubos debe ser:

t_p = 9.5 mm.

3.2.10 Diseño de bridas y apernamiento. Las bridas en el intercambiador de calor permiten el desarme y remoción o limpieza de partes internas; las bridas se pueden clasificar en tres tipos.

- Brida tipo integral.
- Brida tipo Suelto.
- Brida tipo opcional.

Su diseño esta basado en la sección 4.3.6 de HEDH y código ASME; para ello será necesario definir los siguientes parámetros:

Condiciones de Diseño

- P : Presión de diseño
- T : Temperatura de diseño.
- S_{fo} : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura de operación.
- S_{fa} : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura ambiente.
- S_b : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura de operación.
- S_a : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura ambiente.³⁹

Características del empaque:

- N : Ancho medible del empaque.
- b : Es el ancho asentamiento efectivo.
- G : Diámetro medio del empaque
- y : Esfuerzo de deformación
- m : Factor de empaque

Número de pernos: se calculan las cargas que actúan sobre la brida y se trabaja con el A_m mayor; para el cálculo del número de pernos, aproximando a un número de pernos múltiplo de cuatro.

³⁹ Valores de los esfuerzos tomados de la Tabla UHA 23 Sección VIII CODE ASME. Anexo D

$$N_{per} = \frac{A_m}{A_i} \quad (25)$$

$$A_m = \frac{W_{m1}}{S_b} \text{ ó } \frac{W_{m2}}{S_a} \quad (26)$$

$$W_{m1} = H + H_p = \frac{\pi}{4} G^2 P + 2b\pi GmP \quad (27)$$

$$W_{m2} = b\pi Gy \quad (28)$$

A_m : Área de pernos requerida por operación o apernamiento

A_i : Área de raíz del perno

W_{m1} : Carga en condición de operación

W_{m2} : Carga en condición de asentamiento

H : Fuerza hidrostática total

H_p : Carga total del contacto de la junta

Determinación del círculo de pernos: el diseño es óptimo cuando C_1 y C_2 sean aproximadamente iguales:

$$C_1 = B + 2g_1 + 2R \quad (29)$$

$$C_2 \cong \frac{N_{per} * \text{Espacio mínimo entre pernos}}{\pi} \quad (30)$$

C : Diámetro del círculo de pernos

g_o : Espesor de la pared del cuerpo ($g_1 = g_o$ bridas tipo opcional)

B : Diámetro interno

R : Distancia radial desde el círculo de pernos hasta el punto de intersección entre la brida y el casco

Momentos de operación y de asentamiento: los esfuerzos en la brida deben ser determinados para la condición de operación y asentamiento de la siguiente forma:

El momento total en la condición de operación (M_o):

$$M_o = M_D + M_T + M_G \quad (31)$$

El momento en la condición de asentamiento (M_A):

$$M_A = W \frac{(C - G)}{2} \quad (32)$$

En los cálculos se utiliza un momento modificado M_{FO} o M_{FA} para tener en cuenta un mayor valor de la separación mínima entre pernos. El momento modificado que se introduce en las fórmulas de esfuerzos se halla con las siguientes relaciones:

Para la condición de operación:

$$M_{FO} = \frac{M_o * C_f}{B} \quad (33)$$

Para la condición de asentamiento:

$$M_{FA} = \frac{M_A * C_f}{B} \quad (34)$$

Factor de corrección para el espaciamiento de pernos solo cuando $C_f > 1$

$$CF = \sqrt{\frac{E_p}{(2d_b + 25.4)}} \quad (35)$$

M_o : Momento en Operación
 M_A : Momento de Asentamiento
 M_{FA} : Momento modificado de asentamiento
 M_{FO} : Momento modificado de operación
 H_D : Fuerza hidrostática sobre el área interna de la brida.
 H_G : Carga del sello del sello.
 H_T : diferencia entre H y H_D
 h_D : Distancia desde el círculo de pernos hasta donde actúa H_D .
 h_G : Distancia radial desde la reacción del sello al círculo de pernos.
 h_T : Distancia desde el círculo de pernos hasta donde actúa H_T .
 M_D : Momento de brida igual a $H_D \times h_D$
 M_G : Momento de brida igual a $H_G \times h_G$
 M_T : Momento de brida igual a $H_T \times h_T$
 A_b : Área real de pernos
 C_f : factor de corrección para el espaciamiento de pernos
 E_p : Espaciamiento entre pernos.

Calculo del espesor de brida: para el cálculo del espesor de la brida se selecciona el mayor entre:

$$t_a = \sqrt{\frac{Y M_a C_F}{S_{fa} B}} \quad (36)$$

$$t_o = \sqrt{\frac{Y M_o C_F}{S_{fo} B}} \quad (37)$$

Y : factor de brida
 t_o : espesor de brida por condición de operación
 t_a : espesor de brida por condición de asentamiento

Esfuerzos en la brida: en condición de operación

$$S_H = f \cdot M_o / l \cdot g_1^2 \quad (38)$$

$$S_R = b \cdot M_o / l \cdot t^2 \quad (39)$$

$$S_T = (Y \cdot M_{FO} / t^2) - Z \cdot S_R \quad (40)$$

$$S_{fa} = 0,5 \cdot (S_H + S_R) \quad \text{o} \quad 0,5 \cdot (S_H + S_T) \quad (41)$$

Se selecciona el mayor.

Esfuerzos para condición de asentamiento

$$S_H = f \cdot M_a / l \cdot g_1^2 \quad (42)$$

$$S_R = b \cdot M_a / l \cdot t^2 \quad (43)$$

$$S_T = (Y \cdot M_a / t^2) - Z \cdot S_R \quad (44)$$

$$S_{fo} = 0,5 \cdot (S_H + S_R) \quad \text{o} \quad 0,5 \cdot (S_H + S_T) \quad (45)$$

Se selecciona el mayor.

NOTA: Los Factores geométricos involucrados en el cálculo de esfuerzos sobre las bridas se seleccionaran del Anexo E.

S_H : Esfuerzo longitudinal

S_R : Esfuerzo radial

S_T : Esfuerzo tangencial

a. Diseño de las bridas en el casco:

La brida en el casco según clasificación es una brida tipo opcional a continuación se presenta una tabla resumen de los cálculos requeridos para el diseño:

Figura 34. Bridas del casco

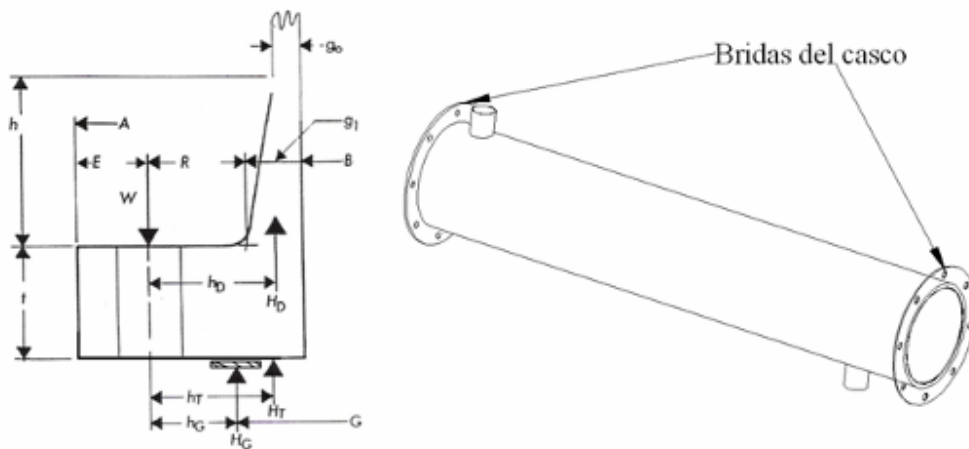


Tabla 7. Cálculo de la brida en el casco

CONDICIONES DE DISEÑO					
P [Kpa]	344,80	ESFUERZOS PERMISIBLES			
T [°C]	100	BRIDA		TORNILLOS	
Material de Brida	SA-515_70	Sfo [Mpa]	108,46	Sb [Mpa]	158,60
Material de pernos	SA-193_B7	Sfa [Mpa]	129,28	Sa [Mpa]	158,60
EMPAQUE		CÁLCULOS DE PERNOS		CIRCULO DE PERNOS	
Material	Elastómero	$W_{m2} = \square bGy$	24734	g ₀	3,18
N [mm]	6	$H_p = 2b \square GmP$	2530	g ₁	6,00
b [mm]	3	$H = G^2 \square P / 4$	8105	R	7,05
G [mm]	173	$W_{m1} = H_p + H$	10635	C1	188
y [Mpa]	15,17	$A_m = W_{m2} / S_a$	156	C2	188
m	2	$A_m = W_{m1} / S_b$	67	Npernos	8

	A_b	427	db	5/16
	$W = 0.5(A_m + A_b)S_a$	46198		
DIMENSIONES				
A [mm]	220,00	B [mm]	161,90	C1 [mm] 188,00
MOMENTOS DE OPERACIÓN				
$H_D = \square B^2 P / 4$	7098,26	$h_D = R + 0,5 * g_1$	10,05	$M_D = H_D \times h_D \times 10^{-3}$ 71,34
$H_G = W_{m1} - H$	2529,83	$h_G = 0.5(C - G)$	7,50	$M_G = H_G \times h_G \times 10^{-3}$ 18,97
$H_T = H - H_D$	1006,69	$h_T = 0.5(R + g_1 + h_G)$	10,28	$M_T = H_T \times h_T \times 10^{-3}$ 10,34
$M_o = M_D + M_G + M_T$			100,65	
MOMENTOS DE ASENTAMIENTO				
$H_G = W$	46197,67	$h_G = 0.5(C - G)$	7,50	$M_a = H_G \times h_g$ 346,48
MOMENTOS MODIFICADOS				
Mfo	825,65	Mfa	2842,13	
ESPESOR DE LA BRIDA				
CF	1,33	Selecciona el mayor entre:		$t_a = \sqrt{\frac{Y M_a C_F * 1000}{S_{fa} B}}$ 11,95
Ep	73,83	t_o	7,03	
db	8,23	t_a	11,95	
FACTORES				
$K = A / B$	1,359	\underline{F}	0,91	t 12,00
T	1,77	\underline{V}	0,55	$\square = t_e + 1$ 1,48
Z	3,37	\underline{f}	1,00	$\square = (4t_e / 3) + 1$ 1,64
Y =	6,5	$e = F / h_0$	0,04	$\square = \square / T$ 0,84
U	7,14	$d = U h_0 g_{02} / V$	2978,70	$\square = t^3 / d$ 0,58
$h_0 = (B * g_0)^{0.5}$	22,69			$\square = \square + \square$ 1,42
ESFUERZOS				
COND., DE OPERACIÓN: 1,5 *Sfo			COND, DE ASENTAMIENTO: 1,5 *Sfa	
S_H [Mpa]	57,63		S_H [Mpa]	198,39
S_R [Mpa]	6,64		S_R [Mpa]	22,86
S_T [Mpa]	14,89		S_T [Mpa]	51,25
Sfa	$0,5*(S_H + S_R)$	32,14	Sfo	$0,5*(S_H + S_R)$ 110,62
	$0,5*(S_H + S_T)$	72,52		$0,5*(S_H + S_T)$ 124,82

b. Diseño de las bridas en los cabezales: Las bridas de los cabezales según la clasificación son tipo suelto; y su diseño se presenta en la siguiente tabla.

Figura 35. Brida en los cabezales

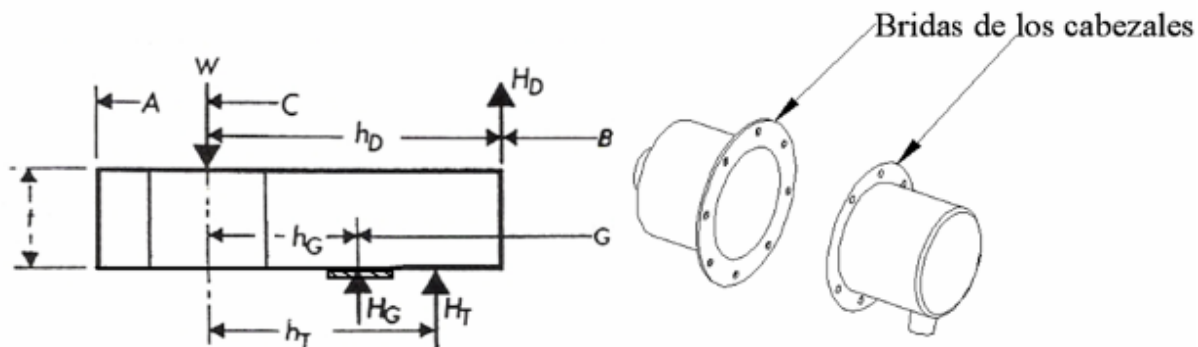


Tabla 8. Cálculo de la brida en los cabezales

CONDICIONES DE DISEÑO					
P [Kpa]	344,80	ESFUERZOS PERMISIBLES			
T [°C]	100	BRIDA		TORNILLOS	
Material de Brida	SA-515_70	Sfo [Mpa]	108,46	Sb [Mpa]	158,60
Material de pernos	SA-193_B7	Sfa [Mpa]	129,28	Sa [Mpa]	158,60
EMPAQUE		CALCULOS DE PERNOS		CIRCULO DE PERNOS	
Material	Elastomero	$W_{m2} = \square b G y$	25306	go	3,18
N [mm]	6	$H_p = 2b \square G m P$	2588	g1	3,18
b [mm]	3	$H = G^2 \square P / 4$	8484	R	9,87
G [mm]	177	$W_{m1} = H_p + H$	11072	C1	188
y [Mpa]	15,17	$A_m = W_{m2} / S_a$	160	C2	188
m	2	$A_m = W_{m1} / S_b$	70	Npernos	8
		A_b	427	db	5/16
		$W = 0.5(A_m + A_b) S_a$	46484		
DIMENSIONES					
A [mm]	220,00	B [mm]	161,90	C1 [mm]	188,00

MOMENTOS DE OPERACIÓN					
$H_D = \square B^2 P / 4$	7098,26	$h_D = 0.5 (C - B)$	13,05	$M_D = H_D \times h_D \times 10^{-3}$	92,63
$H_G = W_{m1} - H$	2588,32	$h_G = 0.5 (C - G)$	5,50	$M_G = H_G \times h_G \times 10^{-3}$	14,24
$H_T = H - H_D$	1385,82	$h_T = 0.5 (h_D + h_G)$	9,28	$M_T = H_T \times h_T \times 10^{-3}$	12,85
$M_o = M_D + M_G + M_T$			119,72		
MOMENTOS DE ASENTAMIENTO					
$H_G = W$	46483,62	$h_G = 0.5(C-G)$	5,50	$M_a = H_G \times h_g$	255,66
MOMENTOS MODIFICADOS					
Mfo	961,32	Mfa	2052,86		
ESPESOR DE LA BRIDA					
CF	1,30	Selecciona el mayor entre:		$t_a = \sqrt{\frac{Y M_a C_F * 1000}{S_{fa} B}}$	10,16
Ep	73,83	t_o	7,59		
db	8,23	t_a	10,16		
FACTORES					
$K = A / B$	1,359	\underline{F}	0,91	t	9,00
T	1,77	\underline{V}	0,55	$\square = te + 1$	1,36
Z	3,37	\underline{f}	1,00	$\square = (4te / 3) + 1$	1,48
Y =	6,5	$e = F / h_0$	0,04	$\square = \square / T$	0,77
U	7,14	$d = U h_0 g_0^2 / V$	2978,70	$\square = t^3 / d$	0,24
$h_0 = (B * g_0)^{0.5}$	22,69			$\square = \square + \square$	1,01
ESFUERZOS					
COND., DE OPERACIÓN: 1,5 *Sfo			COND, DE ASENTAMIENTO: 1,5 *Sfa		
S_H [Mpa]	93,81		S_H [Mpa]	200,32	
S_R [Mpa]	17,34		S_R [Mpa]	37,03	
S_T [Mpa]	18,70		S_T [Mpa]	39,94	
Sfa	$0,5*(S_H + S_R)$	55,57	Sfo	$0,5*(S_H + S_R)$	118,67
	$0,5*(S_H + S_T)$	112,51		$0,5*(S_H + S_T)$	120,13

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR

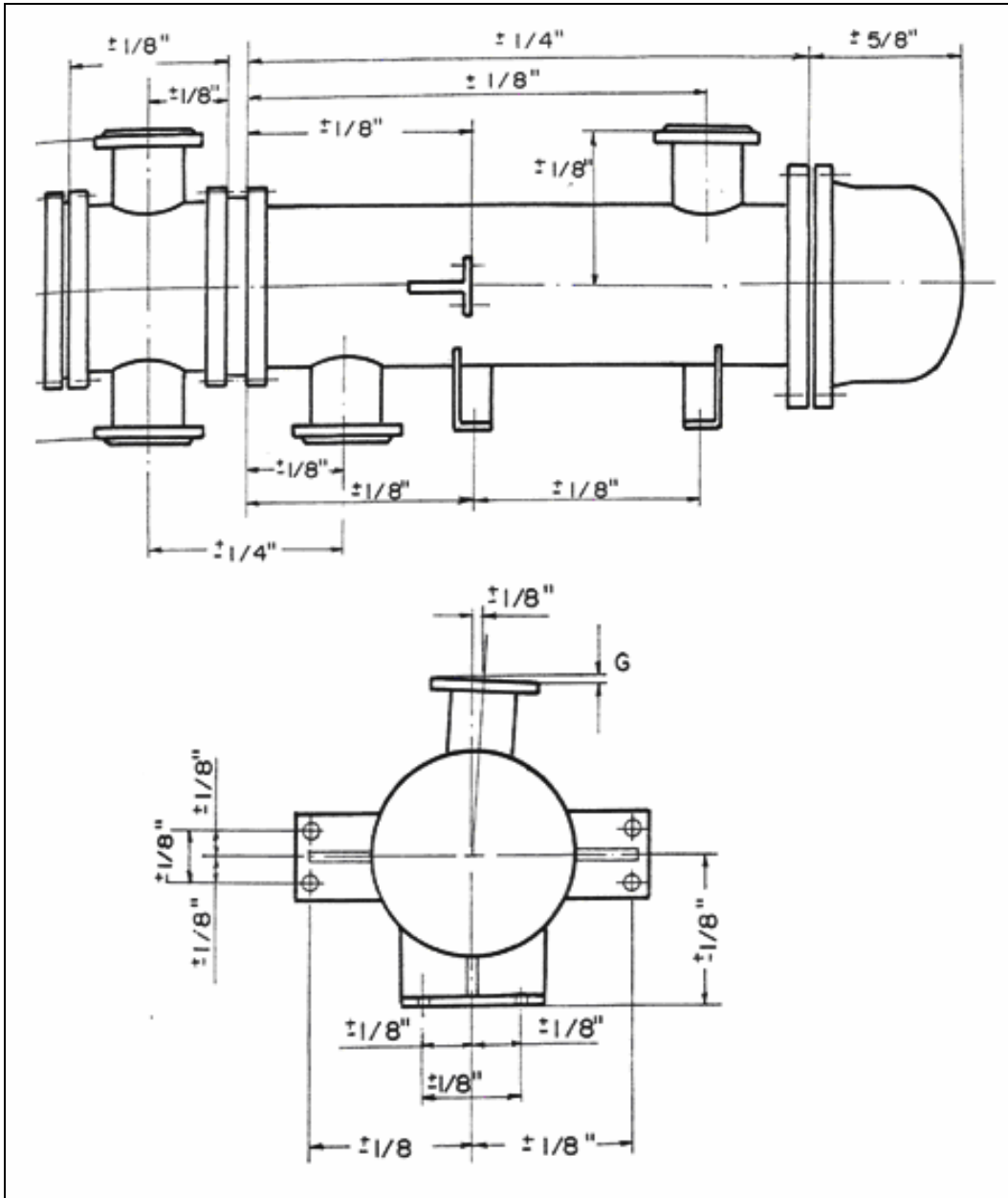
En la fabricación de intercambiadores de calor de casco y tubos se debe tener en cuenta los tipos de materiales usados, las tolerancias permisibles en fabricación, soldadura, los procesos a realizar así como los requerimientos mínimos exigidos por las normas TEMA ya antes definidos en el diseño. Las tolerancias nos dan un margen de error en cuanto a la posición de las boquillas, soportes, bridas, etc. Una tolerancia nos permite trabajar con ciertas sobre medidas o submedidas con respecto a la medida del diseño, por lo que no se recomienda tomar tolerancias mayores o menores a las especificadas.

Figura 36. Construcción del condensador



3.3.1 Tolerancias de fabricación. Estas tolerancias nos dan un margen permitido de error en cuanto a la posición de las boquillas y las medidas del intercambiador con respecto a las medidas del plano o de diseño. La siguiente figura nos muestra las medidas de un intercambiador con sus tolerancias.

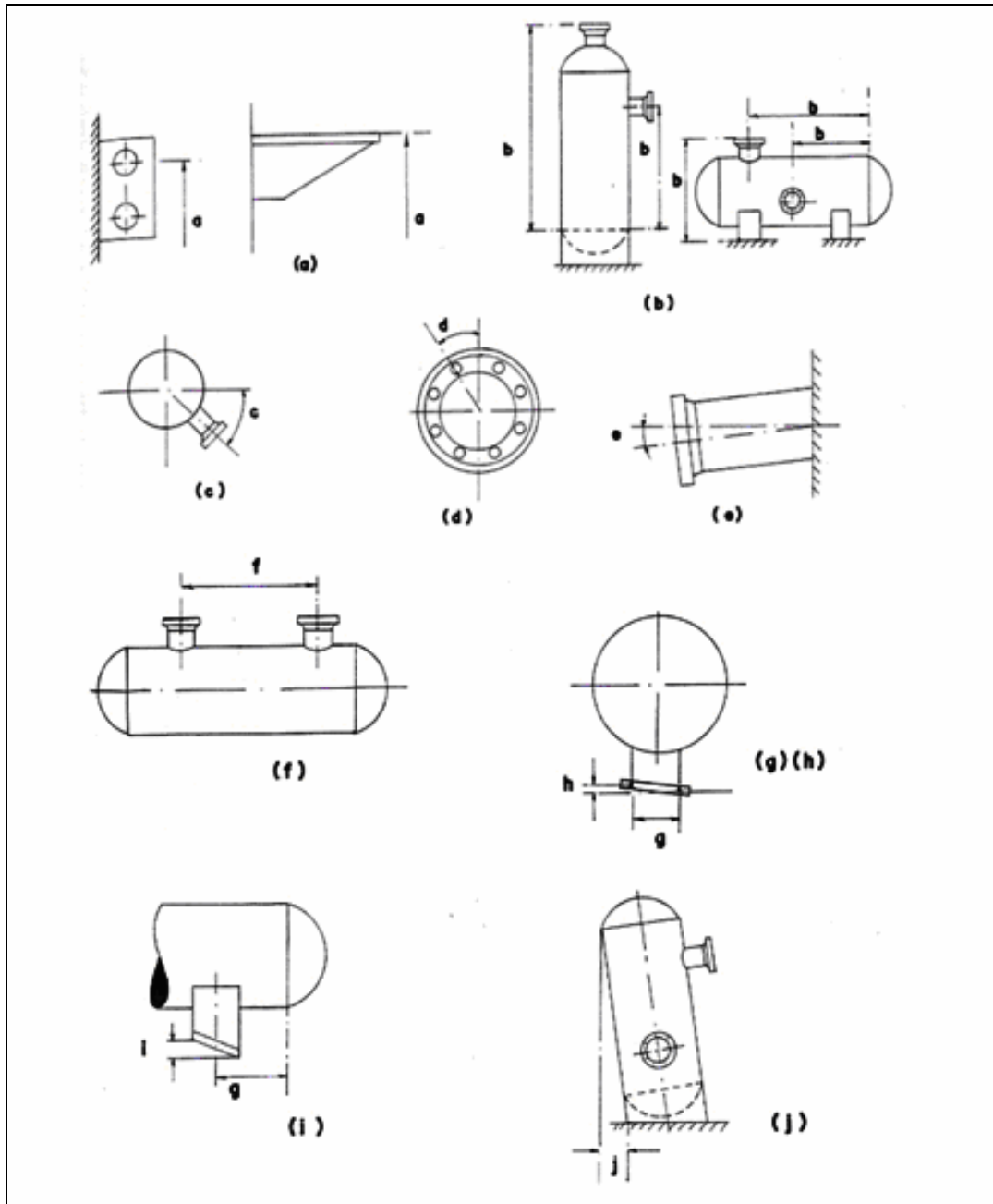
Figura 37. Tolerancias de fabricación.



3.3.2 Tolerancias generales en medidas y posiciones. Las siguientes tolerancias en medidas se pueden observar en la figura No 19, identificadas con las letras asignadas a continuación:

- (a) Tolerancia en la distancia a una línea de referencia de soportes $a = \pm 1/4''$.
- (b) Tolerancia en la distancia entre la cara de la brida y una línea de referencia, $b = \pm 1/2''$.
- (c) Tolerancia la desviación circunferencial de una boquilla, $c = \pm 1/2''$.
- (d) Tolerancia la desviación permisible de los agujeros de los pernos en cualquier dirección pero con respecto a una línea de regencia, $d = \pm 1/8''$.
- (e) Tolerancia de desviación de una boquilla de su propio eje de diseño,
 $e = \pm 1/2''$.
- (f) Tolerancia en la distancia de diseño entre los ejes de dos aberturas,
 $f = \pm 1/16''$.
- (g) Tolerancia en la distancia entre los ejes de los agujeros de los pernos en un soporte, $g = \pm 1/8''$.
- (h) Tolerancia en la desviación transversal en un soporte, $h = \pm 1/32''$ por pie de longitud.
- (i) Tolerancia en la desviación longitudinal de un soporte, $i = \pm 1/8''$
- (j) Tolerancia en una desviación vertical en intercambiadores verticales de hasta 30 pies de altura, $j = \pm 1/2''$. Para intercambiadores verticales de mas de 30 pies de altura $j = \pm 1/8''$ por cada 10 pies, con un máximo de $1 1/2''$.

Figura 38. Tolerancias generales en medidas y posiciones



3.3.3 Aberturas en el intercambiador de calor. Tanto el cuerpo del intercambiador, como los cabezales deberán ser perforados para la instalación de boquillas y conexiones, normalmente se permite la fabricación de

aberturas circulares, elípticas y aberturas tipo abround (formada por dos lados rectos y extremos circulares). Su perforación se hará por corte con llama o por perforación con taladro. Cuando se realicen aberturas de gran tamaño en proporción con el cuerpo que pongan en peligro la resistencia del sitio perforado o cortado, el intercambiador de calor deberá ser sometido a una prueba hidrostática. Algunas aberturas suelen llevar refuerzos que consisten en una ruana o almohadilla del mismo material alrededor de una conexión (boquillas) para reforzar el área perforada que está sometida a presión. El refuerzo debe ser colocado en posición normal a la superficie externa del intercambiador.

3.3.4 Expandido en tubos. El proceso de expansión es el método más utilizado para fijar los tubos en las placas portatubos. Aunque en algunas ocasiones se suele soldar los tubos, a pesar de esto se suele hacer una expansión pequeña antes de proceder a soldar. Si un tubo es introducido en un agujero hecho en la placa tubular, y si se aplica una presión interior al tubo, las paredes del tubo se expanden contra las paredes del agujero produciéndose la fijación del tubo. Esta expansión se logra con una herramienta que se introduce dentro del tubo por medio de un mandril, mientras que por la rotación de la herramienta, hace que una sección cónica empuje unos rodillos contra las paredes del tubo, a medida que la sección cónica avanza, esta herramienta se llama expandir.

Se suele realizar una o dos ranuras en el agujero de la placa tubular con el fin de que la pared del tubo fluya y se asegure en las ranuras. Estas ranuras se suelen hacer con una herramienta de corte como un buril, adaptado a un eje rotacional, que al rotar, estando el buril dentro de la herramienta, lo hace salir para producir el corte. Por lo general se usan fijaciones expandidas y soldadas

o expansiones solamente. Cuando un tubo se somete a presión interna, el material del tubo se expande contra el material de la placa, comportándose ambos como un medio continuo. Si continua aplicándose presión hasta que ambos materiales alcancen su tensión de fluencia y en este momento se retira la presión aplicada, el material que no ha alcanzado su estado plástico vuelve a su estado inicial, produciendo por lo general una compresión en el tubo. Puesto que el tubo presenta una recuperación elástica menor al material de la placa, se consigue un estado de permanente entre los dos.

Calculo del diámetro del tubo después de ser expandido:

$$D_{\text{ext}} = d_i + A + B \cdot K$$

$$A = D_{\text{ip}} - d_e$$

$$B = d_e - d_i$$

A : Termino en la placa llamado abertura en la placa.

B : Reducción de la pared.

D_{ext} : Diámetro del tubo expandido.

D_{ip} : Diámetro del hueco de la placa.

d_i : Diámetro interior del tubo.

d_e : Diámetro externo del tubo.

K : Factor que depende del material del tubo y de su dureza; los valores de K son:

0.008 a 0.1 para tubos de cobre o monel

0.07 a 0.08 para tubos de acero al carbón

0.004 a 0.005 para tubos de acero inoxidable o titanio.

Calculando:

$$A = D_{\text{ip}} - d_e = 12.9 - 12.7 = 0.2 \text{ mm}$$

$$B = d_e - d_i = 12.7 - 10.92 = 1.78$$
$$D_{\text{ext}} = d_i + A + B * K$$
$$D_{\text{ext}} = 10.922 + 0.2 + (1.78) * (0.1)$$
$$D_{\text{ext}} = 11.3 \text{ mm}$$

Este es el diámetro de tubo después de ser expandido usando un expander de 3 rodillos.

3.3.5 Soldadura. El proceso de soldadura es de suma importancia en la fabricación de intercambiadores de calor de casco y tubos, debido a que casi todas sus uniones van a estar soldadas y a su vez sometidas a presión. La soldadura en intercambiadores de calor de casco y tubos se aplica con el propósito de:

- Unión de juntas entre partes del intercambiador a presión, así como en la unión de partes sin presión.
- Para recubrimientos con material de aporte sobre un material base.

La aplicación de soldadura se identifica claramente en: juntas circunferenciales de unión de bridas, en la unión de boquillas del cuerpo entre otros. El tipo de soldadura a utilizar fue con electrodo de tungsteno y protección a gas TIG usando como material de aporte: acero inoxidable 308L. Acero base: acero inoxidable.

3.3.6 Pruebas de control de calidad. En la fabricación de intercambiadores de calor, se deberán realizar ciertos controles, antes, durante y después de la fabricación de los equipos, o de parte de ellos. Es muy común, cuando se realizan procedimientos de control de calidad, estar constantemente supervisando y asegurando el correcto desarrollo de los procesos de

soldadura, recubrimientos por soldadura, uniones soldadas, expandidas o apernadas existentes así como de la supervisión del material que llega a la empresa después de ser pedido. Los intercambiadores de calor estarán sometidos a pruebas que verifique la correcta unión soldada entre las juntas, así como la correcta expansión de los tubos en las placas tubulares. Las pruebas comúnmente usadas son pruebas hidrostáticas y neumáticas, las cuales se realizan por separado lado cuerpo lado tubos. Una prueba hidrostática o neumática en el lado cuerpo busca determinar que no haya fugas en:

- Las juntas soldadas longitudinales y circunferenciales del cuerpo.
- En el soldado circunferencial de la placa tubular con el cuerpo, cuando esta es integral al cuerpo.
- En la unión soldada entre brida y al cuerpo o cabezal.
- En la unión soldada entre boquillas y cuerpo.
- En la junta de expansión entre los tubos y la placa tubular.

La prueba hidrostática fue llevada a acabo bajo los parámetros de diseño del código ASME sección VIII; definiendo una presión de prueba (PP) igual 1.5 veces la presión de diseño:

$$PP = 1.5 Pd$$

$$PP = 1.5*(50psi)$$

$$PP= 75 psi. (517106 Pa)$$

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR DE ACEITES ESENCIALES

Los separadores de aceite esencial; llamados también frascos florentinos, son aquellos dispositivos destinados a realizar la separación de un aceite esencial del vapor de agua condensado que se utilizo para su extracción del material vegetal. Debido a las características propias de los aceites esenciales, podemos dividirlos para su separación en dos grandes grupos, “aceites esenciales pesados” y “aceites esenciales ligeros”. Esta división se basa en que los aceites esenciales tienen una densidad cercana a la del agua, denominándose “aceites esenciales pesados” a aquellos aceites esenciales cuya densidad es mayor a la densidad del agua y por consiguiente se depositan en la parte inferior del separador.

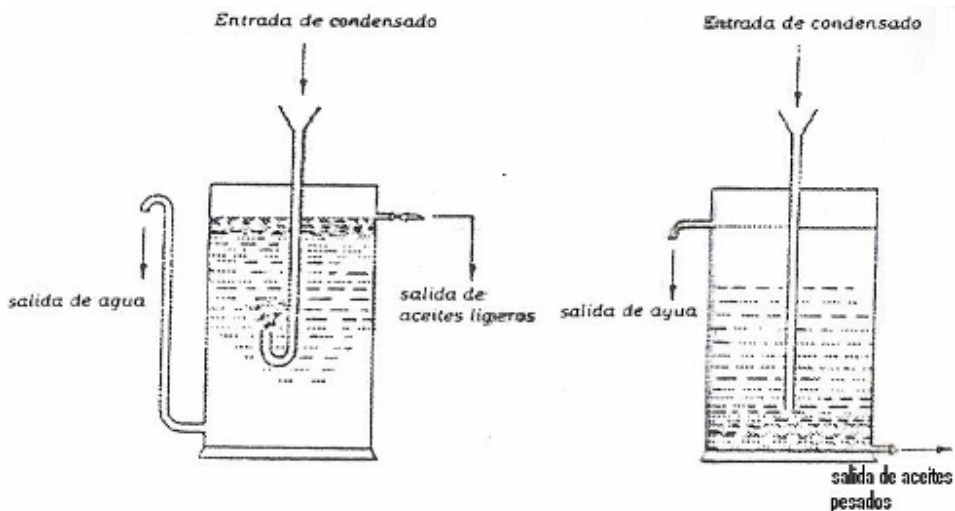
Por lo contrario los “aceites esenciales ligeros” son aquellos aceites esenciales que tiene una densidad menor a la densidad del agua y por lo tanto se acumulan en la superficie de la misma. Se sabe que también influye la temperatura a la que se realiza la separación. Con el incremento de la temperatura, la densidad de los aceites decrece más rápidamente que la densidad del agua. Así, en los “aceites esenciales ligeros” la diferencia entre densidades se hace mayor con el incremento de la temperatura y esto permite que se separen con facilidad. Cuando la viscosidad del condensador es demasiada alta como para dar tiempo a una buena separación de la esencia, o cuando hay demasiada turbulencia en la caída del liquido condensado se suelen emplear mas de un frasco separador, colocados en serie, para lograr una mayor eficiencia.

4.1 DISEÑO DEL SEPARADOR DE ACEITES ESENCIALES

Esta característica de asentarse en el fondo del separador y la de flotar en la superficie del agua nos facilita la separación del aceite esencial; y es de donde debemos partir para el diseño del separador dependiendo el tipo de aceite a extraer.

La figura muestra dos posibles diseños para la separación de aceites esenciales, a la izquierda presenta un modelo de separador de aceites pesados, en el cual se aprovecha que el aceite se desplaza a la parte inferior del separador para recuperarlo; y a la derecha se muestra el separador de aceites esenciales ligeros.

Figura 39. Separadores de aceites esenciales pesados y ligeros.

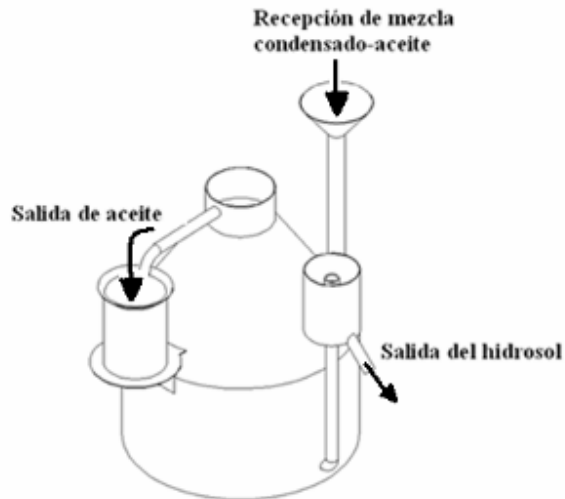


El diseño del separador esta basado en el caso más común donde el aceite es menos denso que el agua, estos aceites menos densos que el agua tienden a separarse espontáneamente y flotar sobre la parte alta del agua.

4.1.1 Funcionamiento del recipiente. La mezcla de condensado-aceite es recibida por el tubo principal del separador, y se almacena en este hasta completar su volumen tiempo en el cual el aceite se separa del agua o hidrosol; el aceite ligero flota sobre la superficie rebozando el recipiente y saliendo para ser recogido; el hidrosol quien esta en el fondo puede ser descargado continuamente.

En la punta del tubo de la salida del hidrosol se coloca un buje roscado el cual da la opción de variar la altura de salida de hidrosol y dependiendo de cada planta poder obtener una diferencia optima de separación entre las dos densidades agua y aceite. El hidrosol que se recolecta tiene bajas cantidades del aceite y puede ser separado mediante otro método de separación para poder tener un mayor aprovechamiento del proceso.

Figura 40. Separador de aceites ligeros.



4.1.2 Cálculo del Volumen del recipiente. Para el diseño de los separadores de aceites, se necesita saber los tiempos de residencia en que el aceite esencial puede alcanzar el fondo o flotar en el agua. De acuerdo al tiempo de residencia que se determino y el flujo de condensados que se maneja puede calcularse el volumen del separador de aceites.

$$V_s = F_c * t_r$$

V_s = Volumen del separador. (litros)

F_c = Caudal del condensado.(litros/min)

t_r = Tiempo de residencia (min)

Tenemos el flujo de vapor $F_c = 93.6 \text{ Lts/h} = 1.56 \text{ lts/min}$

$$V_s = F_c * t_r$$

$$V_s = (1.56 \text{ litros/min}) * (7 \text{ min})$$

$$V_s = 11 \text{ litros}$$

El volumen del separador se puede obtener en varias geometrías, por lo que depende de cada caso específico el diseño del mismo. Existe una gama extensa de separadores de aceite esencial, lo cual permite seleccionar el adecuado para nuestro caso en particular.

Distribuyendo el volumen en un cilindro y un tronco de cono circular recto para obtener el volumen requerido tomando así:

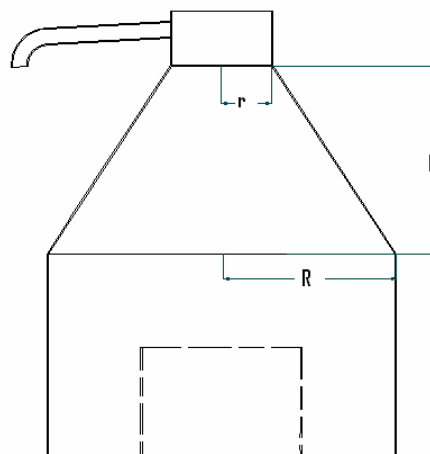
$$V_s = V_c + V_{tc}$$

V_s = Volumen del separador

V_c = Volumen del cilindro

V_{tc} = Volumen del tronco de cono

Figura 41. Medidas del separador de aceites esenciales.



$$V_s = V_c + V_{tc}$$

$$V_s = \pi R^2 H + 1/3 \pi R^2 h \left[1 + (r/R) + (r/R)^2 \right]$$

$$V_s = \pi (13)^2(16) + 1/3\pi(13)^2(11)\left[1 + (4.5/13) + (4.5/13)^2\right]$$

$$V_s = 11349 \text{ cm}^3 \quad (11.3 \text{ litros})$$

Las medidas son tomadas en centímetros.

H = altura del cilindro

H = Altura del tronco de cono

R = Radio del cilindro

R = Radio superior del tronco de cono

Cuando la velocidad del condensado es demasiado alta para dar tiempo a una separación de la esencia, o cuando hay demasiada turbulencia en la caída del líquido condensado, se suelen emplear más de un frasco separador, colocados en serie, para lograr una mayor eficiencia.

4.2 Construcción del separador

Para la construcción del recipiente separador se uso como material el acero inoxidable 316 teniendo en cuenta que en los aceites esenciales se debe evitar la contaminación y se busca obtener un aceite de mejor calidad.

Figura 42. Separador de aceites del tipo vaso florentino.

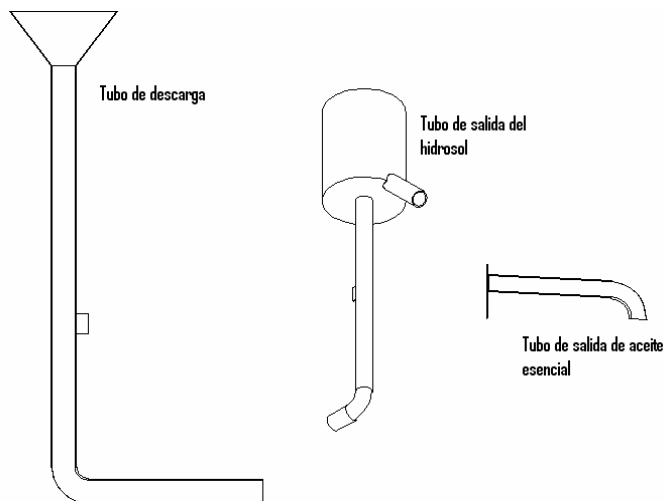


El recipiente se compone de un cuerpo donde se almacenan los condensados al cual lleva soldado 3 tubos:

- Tubo de descarga a donde se recibe la mezcla de condensado y cuya altura depende de la distancia a la que se encuentre la boquilla de salida del condensado y el cual lo recibe un cilindro interno en el recipiente par evitar turbulencia de la mezcla.
- Tubo salida del aceite ubicado en la parte superior que es donde sale el aceite que se almacena en la superficie.
- Tubo de salida de hidrosol o agua de baja concentración de aceite que sale de la parte inferior del recipiente y lleva soldado un recipiente donde cae el hidrosol para luego ser desaguado.

El diseño conserva la superficie superior abierta permitiendo la opción de ser lavado manualmente para ser utilizado con otras clases de plantas desalojando la esencia que pueda quedar entre una y otra.

Figura 43. Tubos del recipiente separador.



4.2.1 Soldadura. El proceso de soldadura entre el cuerpo y los tubos es importante debido a que se debe chequear con cuidado observando que no queden porosidades o posibles puntos de filtración entre las uniones y tubos soldados; esta revisión se realiza en el taller cuidadosamente, y realizando una prueba de llenado con agua. El tipo de soldadura a utilizar fue con electrodo de tungsteno y protección a gas TIG usando como material de aporte: acero inoxidable 308L y material base acero inoxidable 316.

CONCLUSIONES

El objeto de la planta piloto es conocer y determinar las variables de proceso que se deben controlar y que deben a su vez tomarse en cuenta para diseñar los equipos, de tal forma que sean los mas adecuados para dicho proceso, principalmente cuando se usa el método de arrastre por vapor, buscando de esta forma minimizar los costos y optimizar la calidad de los productos obtenidos.

La experimentación a escala de planta piloto permite estimar eficiencias, costos y viabilidad de los procesos a nivel industrial, con esto se logra obtener el desarrollo de un equipo industrial con costos relativamente bajos comparados con el desarrollo de las experimentaciones a nivel industrial.

En el proceso de destilación usando el método de arrastre con vapor en el cual se inyecta vapor de caldera se opto por el diseño de una canasta sin perforaciones laterales para evitar que el flujo de vapor buscara la trayectoria de menor resistencia y disminuya la eficiencia del proceso.

De igual manera, mediante este trabajo se logro demostrar la viabilidad técnica de la construcción de la planta piloto para la destilación de aceites esenciales y se cuenta con personal y equipos especializados para asegurar la calidad de los productos.

RECOMENDACIONES

Debido a que la cantidad de calor a extraer es alta y pensando en un ahorro energético del proceso se sugiere que para el sistema de refrigeración del condensador instalar una torre de enfriamiento capaz de disipar dicha cantidad de calor.

Teniendo en cuenta que no todos los sellos soportan altas temperaturas y que algunos pueden llegar a contaminar el aceite, es necesario en el momento de remplazarlos, que estos nuevos sellos tengan características similares al Neopreno siliconado el cual se encuentra en uso.

En el caso de trabajar el equipo de destilación a una presión diferente a la recomendada se deben evaluar los puntos críticos como son la lámina de fondo y sistema de cierre, a la presión a la que va ser sometido para poder así calcular el tipo de refuerzo necesario para estas nuevas condiciones.

En el proceso de extracción de aceites mediante los métodos de hidrodestilación y destilación agua/vapor se recomienda que los condensados o agua rica en aceite llamada hidrosol sea inyectado de nuevo al equipo por medio de un proceso llamado cobación mejorando así la eficiencia de la extracción.

BIBLIOGRAFÍA

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for construction of Pressure Vessels Division 1 y 2. 1968 Edition.

BANDONI, Arnaldo. Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Argentina: Red de editoriales universitarias, 2000.

CENGEL Yunus A. BOLES Michael A. Termodinámica. Mc. Graw-Hill 2003.

DEL RIO GUZMAN, Oscar Iván. Condensadores de vapor, Teoría, diseño y Sistematización Tomo 1, Tesis de grado 1990. (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica.

E.F.K (Tim) DENNY, Field distillation for herbaceous oils. Third Edition, May 2001.

FARR, JAMES R. AND JAWAD, Maan H. Guidebook for the design of ASME Section VIII Pressure Vessels, by ASME PRESS; The American Society of Mechanical Engineers, 345 east 47th street New York .

OMAR GELVEZ AROCHA, Omar, Apuntes de Transferencia de calor Aplicada.

GÜENTHER, E., The essential oils, New York: Van Nostrand, 1948.

HEAT EXCHANGER DESIGN HANDBOOK, 3.3.5 Input data and recommended practices. 3.3.6 Auxiliary calculations. 3.4 Condensation.

INCROPERA Frank P., DE WILTT David P. Fundamentos de transferencia de calor. School of Mechanical Engineering Purdue University. Person Education 1996

MEGYESY. Eugene F., Pressure vessel handbook, USA Handbook publishing Inc, 1998

MILLS, Anthony F. transferencia de calor. University of California, Los Angeles. Mc. Graw-Hill/Irwin .1999

SAAVEDRA PARDO, Oscar Mauricio. Procesos de fabricación de intercambiadores de Calor de Casco y Tubos, pruebas y equipo utilizado.1995. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica.

ANEXOS

Anexo A. Tabla de propiedades mecánicas acero AISI 304

PHYSICAL PROPERTIES	METRIC	ENGLISH	COMMENTS
Density	8 g/cc	0.289 lb/in ³	
MECHANICAL PROPERTIES			
Hardness, Brinell	123	123	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Knoop	138	138	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Rockwell B	70	70	
Hardness, Vickers	129	129	Converted from Rockwell B hardness.
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi	
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi	at 0.2% offset
Elongation at Break	70 %	70 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi	
Poisson's Ratio	0.29	0.29	
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb	
Shear Modulus	86 GPa	12500 ksi	
ELECTRICAL PROPERTIES			
Electrical Resistivity	7.2e-005 ohm-cm	7.2e-005 ohm-cm	at 20°C (68°F); 1.16E-04 at 650°C (1200°F)
Magnetic Permeability	1.008	1.008	at RT
THERMAL PROPERTIES			
CTE, linear 20°C	17.3 μm/m-°C	9.61 μin/in-°F	from from 0-100°C
CTE, linear 250°C	17.8 μm/m-°C	9.89 μin/in-°F	at 0-315°C (32-600°F)
CTE, linear 500°C	18.7 μm/m-°C	10.4 μin/in-°F	at 0-650°C

Specific Heat Capacity	0.5 J/g-°C	0.12 BTU/lb-°F	from 0-100°C (32-212°F)
Thermal Conductivity	16.2 W/m-K	112 BTU-in/hr- ft ² -°F	at 0-100°C, 21.5 W/m°C at 500°C
Melting Point	1400 - 1455 °C	2550 - 2650 °F	
Solidus	1400 °C	2550 °F	
Liquidus	1455 °C	2650 °F	

Anexo B. Tubería de cobre tipo K, L Y M, Norma ASTM B-88

TUBERIA DE COBRE TIPO K, L y M, RIGIDA NORMA ASTM B-88

DIMENSIONES, PRESIONES Y PESOS

TIPO	DIAMETRO EXTERIOR		PARED	AREA INTERIOR	CAPACIDAD	PRESION TRABAJO	PESO TEORICO	
	NOMINAL Pulg.	EXTERNO Pulg.	Pulg.	Pulg ²	gal/pie	psi a 36 °C	kg/mt	kg/tubo
K	1/4	3/8	0,035	0,073	0,0038	1060	0,216	1,32
	3/8	1/2	0,049	0,127	0,0066	1170	0,400	2,44
	1/2	5/8	0,049	0,218	0,0116	920	0,512	3,13
	3/4	7/8	0,065	0,436	0,0227	880	0,954	5,82
	1	1 1/8	0,065	0,778	0,0404	680	1,248	7,62
	1 1/4	1 3/8	0,085	1,220	0,0632	550	1,550	9,45
	1 1/2	1 5/8	0,072	1,720	0,0892	520	2,026	12,36
	2	2 1/8	0,083	3,010	0,1563	450	3,069	18,72
	2 1/2	2 5/8	0,095	4,660	0,242	420	4,360	26,60
	3	3 1/8	0,109	6,640	0,344	410	5,952	36,31
L	1/4	3/8	0,030	0,078	0,0041	900	0,187	1,14
	3/8	1/2	0,035	0,145	0,0075	800	0,295	1,80
	1/2	5/8	0,040	0,233	0,0121	740	0,424	2,69
	3/4	7/8	0,045	0,484	0,0253	590	0,677	4,13
	1	1 1/8	0,050	0,825	0,0428	510	0,975	5,95
	1 1/4	1 3/8	0,055	1,260	0,0654	460	1,315	8,02
	1 1/2	1 5/8	0,060	1,780	0,0925	430	1,696	10,35
	2	2 1/8	0,070	3,090	0,1605	370	2,604	15,88
	2 1/2	2 5/8	0,080	4,770	0,248	350	3,690	22,51
	3	3 1/8	0,090	6,810	0,354	330	4,955	30,23
M	1/4	3/8	0,025	0,049	0,0025	810	0,158	0,96
	3/8	1/2	0,025	0,159	0,0083	560	0,216	1,32
	1/2	5/8	0,028	0,254	0,0132	510	0,304	1,85
	3/4	7/8	0,032	0,517	0,0269	420	0,489	2,98
	1	1 1/8	0,035	0,874	0,0455	340	0,693	4,23
	1 1/4	1 3/8	0,042	1,310	0,0680	340	1,016	6,20
	1 1/2	1 5/8	0,049	1,830	0,0949	340	1,401	8,54
	2	2 1/8	0,058	3,170	0,165	300	2,175	13,27
	2 1/2	2 5/8	0,065	4,890	0,254	280	2,972	18,13
	3	3 1/8	0,072	6,980	0,363	260	3,988	24,33
	3 1/2	3 5/8	0,083	9,400	0,490	260	5,330	32,51
	4	4 1/8	0,095	12,200	0,637	260	6,930	42,30

USOS:

Tipo K y L para servicio bajo tierra, plomería en interiores, calefacción, refrigeración, gas, oxígeno, vapor y combustibles.

Tipo M para plomería en interiores, agua caliente y fría, refrigeración y drenajes.

PRESENTACION:

Rígida en tiros de 20 pies (6.10 mt), temple duro.

Anexo C. Empaques

MATERIAL		FACTOR m	S (1)	
Anillos metálicos, elastómeros, u otros tipos que son autoselladores		0	0	
Elastómeros sin tejido con alto % de fibra de asbesto. - Abajo de 75 "share" de dureza - Sobre 75 "share" de dureza		0.50 1.00	0 200	
Asbestos con aglomerante con espesores de :	1/8"	2	1600	
	1/16"	2.75	3700	
	1/32"	3.50	6500	
Elastómeros con inserto de algodón		1.25	400	
Elastómeros con inserto de tela de asbesto, con o sin refuerzo de alambre.	3 capas	2.25	2200	
	2 capas	2.50	2900	
	1 capa	2.75	3700	
Fibra vegetal.		1.75	1100	
Espiral de metal, relleno de asbesto, con espiral de :	Ac. inox monel	2.50	2900	
		3	4500	
Metal corrugado con asbesto inserto o metal corrugado que envuelve al asbesto	Alumin.blando	2.50	2900	 
	cobre blando	2.75	3700	
	acero blando	3	4500	
	monel 4-6% Cr	3.25	5500	
	Acero inoxidable.	2.50	6500	
Metal corrugado	Aluminio blando	2.75	3700	
	cobre blando	3	4500	
	acero blando	3.25	3500	
	monel al 4-6% Cr	3.50	6500	
	Acero inoxidable	3.75	7600	
platina que envuelve relleno de asbesto	Aluminio blando	3.25	5500	
	cobre blando	3.50	6500	
	acero blando	3.75	7600	
	monel	3.50	8000	
	monel al 4-6% Cr	3.75	9000	
	Acero inoxidable	3.75	9000	

Anexo D. Valores de esfuerzos permitidos, UHA 23

Sección VIII Code ASME

Table UHA-23

SECTION VIII - DIVISION 1 PRESSURE VESSELS

TABLE UHA-23 MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL, IN POUNDS PER SQUARE INCH

(See Par. UW-12(c) for vessels constructed under Part UW that include welded joints that are neither fully radiographed nor spot radiographically examined)

Material and Specification Number	Type or Grade	Nominal Composition	P-Number	Spec Min Tensile	Notes	For Metal Temperatures Not Exceeding Deg F							
						-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700
PLATE STEELS													
SA-240	302	18Cr-8Ni	8	75000	(1)	18750	16550	15550	14950	14550	14350	14300	14200
SA-240	302	18Cr-8Ni	8	75000	...	18750	16000	13750	12250	11400	10800	10650	10500
SA-240	304	18Cr-8Ni	8	75000	(1) (10) (14)	18750	16550	15500	14950	14550	14350	14300	14200
SA-240	304	18Cr-8Ni	8	75000	(10) (14)	18750	16000	13750	12250	11400	10800	10650	10500
SA-240	304L	18Cr-8Ni	8	70000	(1)	17500	17000	16000	15000	14000	13000	12500	12000
SA-240	304L	18Cr-8Ni	8	70000	...	17500	15300	13100	11000	9700	9000	8750	8500
SA-240	309S	23Cr-12Ni	8	75000	(1) (10)	18750	17200	16400	15850	15500	15300	15200	15100
SA-240	309S	23Cr-12Ni	8	75000	(10)	18750	16900	15850	14900	14100	13350	13050	12700
SA-240	310S	25Cr-20Ni	8	75000	(1) (2) (10)	18750	17200	16400	15850	15500	15300	15200	15100
SA-240	310S	25Cr-20Ni	8	75000	(2) (10)	18750	16900	15850	14900	14100	13350	13050	12700
SA-240	310S	25Cr-20Ni	8	75000	(1) (3) (10)	18750	17200	16400	15850	15500	15300	15200	15100
SA-240	310S	25Cr-20Ni	8	75000	(3) (10)	18750	16900	15850	14900	14100	13350	13050	12700
SA-240	316	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	(1) (10) (14)	18750	17500	16900	16300	16000	16000	16000	16000
SA-240	316	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	(10) (14)	18750	16100	14600	13500	12600	11900	11600	11300
SA-240	316L	18Cr-10Ni-2Mo	8	70000	(1)	17500	17500	15800	14750	14000	13600	13450	13250
SA-240	316L	18Cr-10Ni-2Mo	8	70000	...	17500	16250	14500	12000	11000	10150	9800	9450
SA-240	317	19Cr-13Ni-3Mo	8	75000	(1) (10) (14)	18750	17500	16900	16300	16000	16000	16000	16000
SA-240	317	19Cr-13Ni-3Mo	8	75000	(10) (14)	18750	16100	14600	13500	12600	11900	11600	11300
SA-240	317L	19Cr-13Ni-3Mo	8	75000	(1)	17500	17500	15800	14750	14000	13600	13450	13250
SA-240	317L	19Cr-13Ni-3Mo	8	75000	...	17500	16250	14500	12000	11000	10150	9800	9450
SA-240	321	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	(1) (10) (13)	18750	16800	15850	15300	15100	15100	15100	15100
SA-240	321	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	(10) (13)	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-240	347	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1) (10) (13)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-240	347	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(10) (13)	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-240	348	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1) (10) (13)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-240	348	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(10) (13)	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-240	405	12Cr-Al	7	60000	...	15000	14300	13800	13300	12850	12400	12250	12050
SA-240	410	13Cr	6	65000	...	16250	15450	14950	14400	13900	13450	13250	13100
SA-240	410S	13Cr	7	60000	...	15000	14300	13800	13300	12850	12400	12250	12050
SA-240	430A	15Cr	6	65000	...	16250	15450	14950	14400	13900	13450	13250	13100
SA-240	430B	17Cr	7	65000	...	16250	15450	14950	14400	13900	13450	13250	13100
PIPES & TUBES													
Seamless													
SA-213	TP304	18Cr-8Ni	8	75000	(1) (10) (14)	18750	16550	15550	14950	14550	14350	14300	14200
SA-213	TP304	18Cr-8Ni	8	75000	(10) (14)	18750	16000	13750	12250	11400	10800	10650	10500
SA-213	TP304H	18Cr-8Ni	8	75000	(1)	18750	16550	15550	14950	14550	14350	14300	14200
SA-213	TP304H	18Cr-8Ni	8	75000	...	18750	16000	13750	12250	11400	10800	10650	10500
SA-213	TP304L	18Cr-8Ni	8	70000	(1)	17500	17000	16000	15000	14000	13000	12500	12000
SA-213	TP304L	18Cr-8Ni	8	70000	...	17500	15300	13100	11000	9700	9000	8750	8500
SA-213	TP310	25Cr-20Ni	8	75000	(1) (2) (10)	18750	17200	16400	15850	15500	15300	15200	15100
SA-213	TP310	25Cr-20Ni	8	75000	(2) (10)	18750	16900	15850	14900	14100	13350	13050	12700
SA-213	TP310	25Cr-20Ni	8	75000	(1) (3) (10)	18750	17200	16400	15850	15500	15300	15200	15100
SA-213	TP310	25Cr-20Ni	8	75000	(3) (10)	18750	16900	15850	14900	14100	13350	13050	12700
SA-213	TP316	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	(1) (10) (14)	18750	17500	16900	16300	16000	16000	16000	16000
SA-213	TP316	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	(10) (14)	18750	16100	14600	13500	12600	11900	11600	11300
SA-213	TP316H	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	(1)	18750	17500	16900	16300	16000	16000	16000	16000
SA-213	TP316H	18Cr-12Ni-2Mo	8	75000	...	18750	16100	14600	13500	12600	11900	11600	11300
SA-213	TP316L	18Cr-12Ni-2Mo	8	70000	(1)	17500	17500	15800	14750	14000	13600	13450	13250
SA-213	TP316L	18Cr-12Ni-2Mo	8	70000	...	17500	16250	14500	12000	11000	10150	9800	9450
SA-213	TP321	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP321	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-213	TP321H	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP321H	18Cr-10Ni-Ti	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-213	TP347	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP347	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-213	TP347H	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP347H	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-213	TP348	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP348	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-213	TP348H	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	(1)	18750	16800	15850	15400	15100	15100	15100	15100
SA-213	TP348H	18Cr-10Ni-Cb	8	75000	...	18750	16550	15300	14450	13500	12800	12500	12200
SA-268	TP405	12Cr-Al	7	60000	...	15000	14300	13800	13300	12850	12400	12250	12050
SA-268	TP410	13Cr	6	60000	...	15000	14300	13800	13300	12850	12400	12250	12050
SA-268	TP430	16Cr	7	60000	(9)	15000	14300	13800	13300	12850	12400	12250	12050
SA-268	TP446	27Cr	10	70000	(10E)	17500	16650	16100	15550	15000	14500	14300	...

Anexo E. Factores geométricos involucrados en el cálculo de esfuerzos sobre las bridas

K	T	Z	Y	U	K	T	Z	Y	U
1,182	1,85	6,04	11,70	12,86	1,278	1,81	4,16	8,05	8,85
1,184	1,85	5,98	11,58	12,73	1,281	1,81	4,12	7,98	8,77
1,186	1,85	5,92	11,47	12,61	1,284	1,80	4,08	7,91	8,69
1,188	1,85	5,86	11,36	12,49	1,287	1,80	4,05	7,84	8,61
1,190	1,84	5,81	11,26	12,37	1,290	1,80	4,01	7,77	8,53
1,192	1,84	5,75	11,15	12,25	1,293	1,80	3,98	7,70	8,46
1,194	1,84	5,70	11,05	12,14	1,296	1,80	3,94	7,63	8,39
1,196	1,84	5,65	10,95	12,03	1,299	1,80	3,91	7,57	8,31
1,198	1,84	5,60	10,85	11,92	1,302	1,80	3,88	7,50	8,24
1,200	1,84	5,55	10,7	11,81	1,305	1,80	3,84	7,44	8,18
1,202	1,84	5,50	10,65	11,71	1,308	1,79	3,81	7,38	8,11
1,204	1,84	5,45	10,56	11,61	1,311	1,79	3,78	7,32	8,05
1,206	1,84	5,40	10,47	11,51	1,314	1,79	3,75	7,26	7,98
1,208	1,84	5,35	10,38	11,41	1,317-	1,79	3,72	7,20	7,92
1,210	1,84	5,31	10,30	11,32	1,320	1,79	3,69	7,14	7,85
1,212	1,83	5,27	10,21	11,22	1,323	1,79	3,67	7,09	7,79
1,214	1,83	5,22	10,12	11,12	1,326	1,79	3,64	7,03	7,73
1,216	1,83	5,18	10,04	11,03	1,329	1,78	3,61	6,98	7,67
1,218	1,83	5,14	9,96	10,94	1,332	1,78	3,58	6,92	7,61
1,220	1,83	5,10	9,89	10,87	1,335	1,78	3,56	6,87	7,55
1,222	1,83	5,05	9,80	10,77	1,338	1,78	3,53	6,82	7,50
1,224	1,83	5,01	9,72	10,68	1,341	1,78	3,51	6,77	7,44
1,226	1,83	4,98	9,65	10,60	1,344	1,78	3,48	6,72	7,39
1,228	1,83	4,94	9,57	10,52	1,347	1,78	3,46	6,68	7,33
1,230	1,83	4,90	9,50	10,44	1,350	1,78	3,43	6,63	7,28
1,232	1,83	4,86	9,43	10,36	1,354	1,77	3,40	6,57	7,21
1,234	1,83	4,83	9,36	10,28	1,358	1,77	3,37	6,50	7,14
1,236	1,82	4,79	9,29	10,20	1,362	1,77	3,34	6,44	7,08
1,238	1,82	4,76	9,22	10,13	1,366	1,77	3,31	6,38	7,01
1,240	1,82	4,72	9,15	10,05	1,370	1,77	3,28	6,32	6,95
1,242	1,82	4,69	9,08	9,98	1,374	1,77	3,25	6,27	6,89
1,244	1,82	4,65	9,02	9,91	1,378	1,76	3,22	6,21	6,82
1,246	1,82	4,62	8,95	9,84	1,382	1,76	3,20	6,16	6,77
1,248	1,82	4,59	8,89	9,77	1,386	1,76	3,17	6,11	6,72
1,250	1,82	4,56	8,83	9,70	1,390	1,76	3,15	6,06	6,66
1,252	1,82	4,52	8,77	9,64	1,394	1,76	3,12	6,01	6,60
1,254	1,82	4,49	8,71	9,57	1,398	1,75	3,10	5,96	6,55
1,256	1,82	4,46	8,65	9,51	1,402	1,75	3,07	5,92	6,49
1,258	1,81	4,43	8,59	9,44	1,406	1,75	3,05	5,87	6,44
1,260	1,81	4,40	8,53	9,38	1,410	1,75	3,02	5,82	6,39
1,263	1,81	4,36	8,45	9,28	1,414	1,75	3,00	5,77	6,34
1,266	1,81	4,32	8,37	9,19	1,418	1,75	2,98	5,72	6,29
1,269	1,81	4,28	8,29	9,11	1,422	1,75	2,96	5,68	6,25
1,272	1,81	4,24	8,21	9,02	1,426	1,74	2,94	5,64	6,20
1,275	1,81	4,20	8,13	8,93	1,430	1,74	2,91	5,60	6,15

Anexo F. Especificaciones para la fabricación de los equipos

La siguiente es una lista de especificaciones que deberán tenerse en cuenta en el momento de realizar el contrato con el fabricante de los equipos.

- No se hará sustitución alguna de materiales especificados sin previa autorización escrita por parte del comprador.
- No se utilizarán tiras de refuerzo permanente en las soldaduras sin la aprobación escrita por parte del comprador.
- El faldón estará provisto de un agujero de ventilación e inspección de 60 mm de diámetro ubicado a la mayor altura posible, este agujero no estará indicado en el plano suministrado.
- El fabricante deberá suministrar los empaques que sean requeridos.
- Las roscas solicitadas deberán estar limpias y sin defectos después de su instalación
- El fabricante del recipiente deberá tomar todas las precauciones necesarias para cargar, bloquear y asegurar los equipos en el vehículo de transporte y proporcionará todo el material que sea necesario para evitar que se dañe durante su transporte.

- Las tolerancias de fabricación no deberán rebasar los límites indicados en los planos de fabricación de los equipos.
- El comprador se reserva el derecho de inspeccionar el recipiente en cualquier momento durante su fabricación, para comprobar que los materiales y la mano de obra con que se este fabricando corresponden a la especificación.
- La aprobación de cualquier trabajo por parte del representante del comprador y la aceptación de los equipos no liberará al fabricante de su responsabilidad de apegarse a las disposiciones de esta especificación
- El recipiente terminado será provisto de una placa de datos sujeta en forma segura al recipiente por soldadura

GARANTÍA

El fabricante garantiza que el recipiente cumple con todas las condiciones expresadas en esta especificación y que no contiene defectos de fabricación, incluidos mano de obra y materiales. En caso de que apareciese algún defecto durante el primer año de operación, el fabricante se compromete a realizar todas las modificaciones, reparaciones y reposiciones que sean necesarias sin cargo alguno.

Anexo G. CENIVAM

Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales – CENIVAM. CENIVAM es una Unión Temporal que tiene como tarea realizar un estudio integral de especies aromáticas y medicinales tropicales promisorias para el desarrollo competitivo y sostenible de la agroindustria de esencias, extractos y derivados naturales en Colombia. En este proyecto participan 10 grupos de investigación de 5 universidades públicas (Universidad Industrial de Santander, Universidad de Antioquia, Universidad de Cartagena, Universidad Tecnológica del Chocó y Universidad Tecnológica de Pereira), una Fundación (Fundacofan) y 2 industrias privadas (Morenos Ltda. y Mane sucursal Colombia). Los grupos de investigación participantes son:

1. Centro de Investigación en Biomoléculas, CIBIMOL (UIS),
2. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos, CICTA (UIS)
3. Centro de investigación en enfermedades tropicales, CINTROP (UIS)
4. Grupo nacional de investigación en ecofisiología y metabolismo vegetal tropical, GIEFIVET (UIS)
5. Catálisis Ambiental (UdeA)
6. Infección y Cáncer (UdeA)
7. Productos Naturales (UTCh)
8. Química ambiental y computacional (U. Cartagena)
9. Polifenoles UTP
10. Fundación colombiana para la farmacia natural, FUNDACOFAN.

El objeto de atención central es la carencia de conocimiento en diferentes áreas que concurren en una cadena productiva que aprovecha el campo de una manera eficiente, sostenible y competitiva, apoyada en la Química verde. Tal es la cadena productiva de aceites esenciales y derivados de extractos de plantas aromáticas y medicinales, una industria que ha mostrado crecimientos anuales del 10% a nivel mundial y que puede dinamizar el desarrollo rural colombiano. La fundamentación científica y tecnológica que se busca alcanzar con este proyecto está dirigida hacia la producción de bienes de alto valor, capaces de competir exitosamente con calidad y precios en los mercados nacional y mundial. Este estudio científico integral de especies aromáticas y medicinales colombianas, proveerá una visión detallada de la naturaleza de sus aromas y de su actividad medicinal, y de cómo éstos se pueden aislar, transformar y producir industrialmente. La generación de esta información será de vital importancia para impulsar el desarrollo de la industria agrícola de esencias y extractos medicinales en Colombia, lo cual se logrará mediante la transferencia oportuna de los nuevos conocimientos a las comunidades campesinas, las asociaciones de productores y los sectores farmacéutico e industrial colombianos.

El material vegetal corresponderá a especies tropicales de las siguientes cuatro zonas climáticas colombianas: bosque húmedo tropical, bosque seco xerofítico y subxerofítico, selva andina, y páramo y subpáramo. Los extractos serán obtenidos por las técnicas de hidrodestilación asistida por la radiación de microondas. La bioactividad de estos extractos será establecida a través de ensayos *in vitro*, para la determinación de actividades bactericida, antimicótica, antioxidante, de atrapamiento de radicales, anti-*Leishmania*, anti-*Candida*, y anticáncer. Con base en la evaluación de las propiedades de bioactividad y la composición química de extractos de 150

especies vegetales, se seleccionará un grupo de plantas consideradas útiles o promisorias por cumplir con alguna de las siguientes condiciones:

- Su aceite esencial posee buenas propiedades organolépticas (aroma).
- Su aceite esencial o extracto posee algún tipo de bioactividad alta.
- Su aceite esencial es rico en una sustancia que posee demanda como materia prima industrial.
- La transformación química del aceite esencial o una de sus fracciones conduce a productos útiles en las industrias farmacéutica, de alimentos, de aromas, o de Química Fina.

El alcance del proyecto es la generación de productos útiles para la agroindustria de aceites esenciales y extractos. Estos productos estarán formados por talleres de capacitación sobre cultivo, tratamiento poscosecha y control de calidad, patentes para procedimientos de síntesis o modificación química, protocolos de producción a escala de planta piloto, criterios de calidad de aceites esenciales y extractos, y literatura divulgativa, con varios niveles de profundización. El proyecto brinda alternativas para el aprovechamiento de las especies oriundas y aclimatadas. De esta manera se estaría repercutiendo a corto y mediano plazo, en un menor riesgo para el medio ambiente, por la tecnificación de los cultivos, la menor incidencia de cultivos ilícitos y la reducción de la expansión indiscriminada de la frontera agrícola y la deforestación. De igual manera, se estaría influyendo positivamente en la calidad de vida de las comunidades involucradas, al fortalecer sus sistemas de producción y de economía rural.

Anexo H. Fotos de construcción



La figura muestra una sección del cuello de cisne del tipo sombrero chino.



Codo reducción del cuello de cisne construido en fundición.



Carcaza y has de tubos del condensador.

Anexo I. Fotos equipo de destilación



Cuello de cisne suspendido de la grúa construida para este propósito.



Detalles funcionales del cuello de cisne que incluyen dispositivos de agarre, izaje, malla para evitar el paso de material vegetal al condensador y el acople rápido en el extremo.

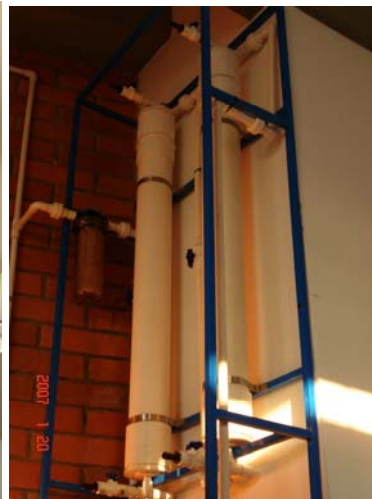


Elementos de medición.



Vista general del equipo de destilación para la extracción de aceites esenciales ubicado en el CENIVAM





Caldera y accesorios adquiridos para realizar la destilación por arrastre con vapor