

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño De Un Sistema TermoMecánico Para La Extracción De Aceites
Esenciales De Fuentes Biomásicas”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Nicolás Chaves Vasco

Denny Manfred Schuldts Vizuetes

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mi familia, amigos, compañeros y profesores por su incondicional apoyo a lo largo de mi experiencia universitaria. En especial a los que me guiaron durante la realización de este proyecto Livingston Castro MSc, PhD Juan Peralta y PhD Emérita Delgado.

Nicolás Chaves Vasco

Este proyecto se lo dedico a mi familia, por su esfuerzo y amor incondicional que me permitió alcanzar este objetivo. A mis tutores Ph.D Juan Peralta, Ph.D Emérita Delgado y Livingston Castro MSc por sus consejos y orientación que ayudaron a que esto sea posible.

Manfred Schuldt Vizuete

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, amigos, compañeros, amigos y profesores por guiarme a lo largo de mi experiencia universitaria para formarme con profesional.

Nicolás Chaves Vasco

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todo corazón a mi familia, sin ellos alcanzar mis metas me sería prácticamente imposible, su esfuerzo, confianza y amor me acompañan en cada recorrido. A mis amigos, Diana, Tyrone, Puchito, Sonia, Cristian, Medardo, Marcelo, Joel, Marcos, Julio y Daniel por su sincera amistad y apoyo incondicional a lo largo de estos años. A los muchachos del Team mecánica 90 y al Team lámpara que conocí durante este recorrido hasta compartir la dicha de ser ingenieros. A los miembros del club Robota, con ellos compartí muchas risas y por mostrarme lo que es trabajo en equipo. A los docentes que a lo largo de estos años me han transmitido sus conocimientos y sabiduría.

Manfred Schuldt Vizuite

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Nicolás Chaves Vasco* y *Denny Manfred Schuldt Vizúete* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Nicolás Chaves Vasco



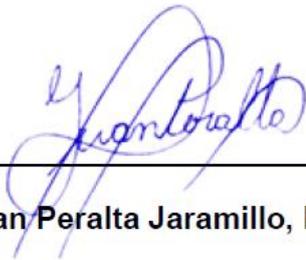
Denny Manfred Schuldt Vizúete

EVALUADOR



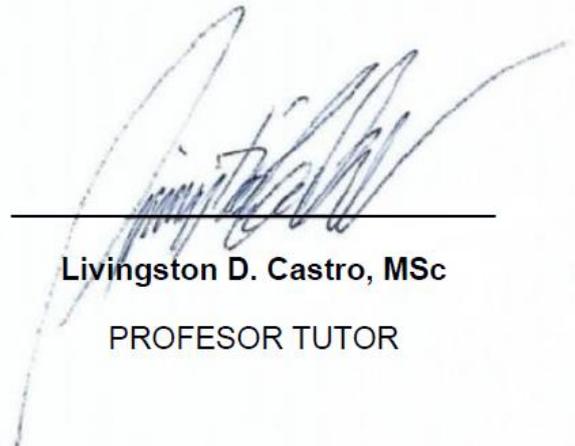
Emérita Delgado Plaza, PhD

PROFESORA DE LA MATERIA



Juan Peralta Jaramillo, PhD

PROFESOR TUTOR



Livingston D. Castro, MSc

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Dada la creciente demanda por aceites esenciales en el país es necesario implementar un sistema de extracción de aceites esenciales mediante el método de hidrodestilación por arrastre de vapor de fuente biomásica, eucalipto en particular. El sistema consta de cuatro equipos: fuente de calor (calderín), alambique, condensador y florentino (separador de aceite). Se seleccionó el calderín en base a la capacidad calorífica necesaria de 1.8 BHP para su operación, el separador de aceite se seleccionó en base a la capacidad volumétrica de 0.03 m³, el alambique se diseñó enteramente en acero AISI 304 presurizado con un colador de acero en su interior para compactar el eucalipto que se requiera y registra un cambio de temperatura de 177°C a 148°C manteniendo la presión de trabajo de 40 psi; el condensador se diseñó como un intercambiador de calor de tipo coraza hueco con serpentín de cobre y utilizando agua como fluido refrigerante con un aumento de temperatura de 15°C para el refrigerante y una reducción de temperatura para el fluido esencial de 85°C. El espesor del acero AISI 304 seleccionado es mayor al calculado puesto que, dada la naturaleza del proceso, va a someterse a situaciones extraordinarias al momento de desarmar, transportar y armar. El diseño del equipo completo requiere de una inversión inicial de \$2000.00.

Palabras Clave: Alambique, eucalipto, condensador, serpentín, refrigerante.

ABSTRACT

Given the growing demand for essential oils in the country, it is necessary to implement an essential oil extraction system by means of the hydro distillation method by steam drag from a biomass source, eucalyptus in particular. The system consists of four pieces of equipment: heat source (boiler), alembic, condenser and florentine (oil separator). The boiler was selected based on the necessary heat capacity of 1.8 BHP for its operation, the oil separator was selected based on the volumetric capacity of 0.03 m³, the alembic was designed entirely in pressurized AISI 304 steel with a steel strainer in its interior to compact the eucalyptus that is required and registers a change in temperature from 177 ° C to 148 ° C maintaining the working pressure of 40 psi; The condenser was designed as a hollow shell type heat exchanger with copper coil and using water as the cooling fluid with a temperature increase of 15 ° C for the refrigerant and a temperature reduction for the essential fluid of 85 ° C. The thickness of the AISI 304 steel selected is greater than that calculated since, given the nature of the process, it will be subjected to extraordinary situations when disassembling, transporting, and assembling. The design of the complete equipment requires an initial investment of \$ 2000.00.

Keywords: *Alembic, eucalyptus, condenser, coil, cooling fluid.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Aceites Esenciales	3
1.4.2 Métodos de Extracción.....	5
CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología	13
2.1 Requerimientos dados por el cliente.....	14
2.2 Alternativas de diseño para el extractor de aceites esenciales.....	14
2.2.1 Alternativa de diseño 1	15
2.2.2 Alternativa de diseño 2.....	16

2.2.3	Alternativa de diseño 3.....	18
2.3	Selección del diseño para el extractor de aceites esenciales.....	19
2.4	Normativas de diseño	22
2.4.1	Norma ISO 11228	22
2.4.2	Código ASME sección VIII división 1	22
2.5	Diseño del alambique	23
2.5.1	Cálculo del volumen y masa de Biomasa.....	23
2.5.2	Colador.....	25
2.5.3	Cuerpo Alambique.....	26
2.5.4	Tapa del Alambique	28
2.6	Diseño del condensador	33
2.6.1	Parámetros y propiedades del fluido de trabajo caliente.....	33
2.6.2	Parámetros y propiedades del fluido de trabajo frío	34
2.6.3	Diseño térmico del condensador.....	35
CAPÍTULO 3.....		39
3.	Resultados Y Análisis	39
3.1	Diseño del Extractor de Aceites Esenciales – EAE.	39
3.1.1	Estructura del alambique.....	40
3.1.2	Estructura de la Tapa del alambique.....	41
3.1.3	Estructura del Intercambiador de Calor.....	43
3.1.4	Accesorios.....	44
3.2	Otros equipos	44
3.2.1	Fuente de Vapor.....	44
3.2.2	Separador de Aceite.....	45
3.3	Simulaciones Térmicas del Equipo EAE.....	46
3.3.1	Alambique	46

3.3.2	Intercambiador de Calor (Condensador)	48
3.4	Análisis de consumo energético	51
3.5	Análisis de costos	52
CAPÍTULO 4		55
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	55
4.1	Discusión	55
4.2	Conclusiones	56
4.3	Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICE		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
EAE	Extractor de Aceites Esenciales
NACE	National Association of Corrosion Engineer
CAD	Computer Aided Design
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
AISI	American Iron and Steel Institute

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
m	Metro
W	Watts
°C	Celsius
V	Voltio
A	Amperio
K	Kelvin
Kg	Kilogramo
Pulg	Pulgada
M	Métrica
S	Segundo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización de aceites esenciales.....	4
Figura 1.2 Extractor Expeller.....	6
Figura 1.3 Extractor centrífugo	7
Figura 1.4 Extractor Decanter	8
Figura 1.5 Sistema de extracción por rodillos	8
Figura 1.6 Esquema de equipo de hidrodestilación asistido por microondas	9
Figura 1.7 Esquema de equipo de hidrodestilación asistido por microondas	10
Figura 1.8 Hidrodestilación agua – vapor	12
Figura 1.9 Hidrodestilación por arrastre de vapor.	13
Figura 2.1 Metodología del diseño	14
Figura 2.2 Proceso general alternativa de diseño 1	17
Figura 2.3 Características de la alternativa de diseño 1	18
Figura 2.4 Proceso general alternativa de diseño 2	19
Figura 2.5 Características de la alternativa de diseño 2	19
Figura 2.6 Proceso general alternativa de diseño 3	21
Figura 2.7 Eucalipto Globulus	25
Figura 2.8 Densidad de empaquetamiento del eucalipto	26
Figura 2.9 Colador	28
Figura 2.10 Cuerpo alambique	29
Figura 2.11 Tipo de tapas para tanques a presión	30
Figura 2.12 Dimensionamiento geométrico de tapa toro esférica	31
Figura 2.13 Tapa alambique	33
Figura 2.14 Diseño forma condensador	34
Figura 2.15 Coeficiente de transmisión de calor	37
Figura 3.1 Vista del equipo diseñado.....	40
Figura 3.2 Cuerpo del Alambique	41
Figura 3.3 Tapa del Alambique	42
Figura 3.4 Intercambiador de Calor	43
Figura 3.5 Simulación del Alambique con Biomasa.	47

Figura 3.6 Simulación del Comportamiento del Vapor Dentro del Alambique	48
Figura 3.7 Simulación de Intercambiador de Calor	49
Figura 3.8 Simulación Térmica del Refrigerante en Solidworks.....	51
Figura 3.9 Simulación Térmica de Mezcla de Vapor en Solidworks.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Ponderación de los criterios de selección.....	20
Tabla 2.2 Ponderación de los parámetros de calificación de alternativas.....	20
Tabla 2.3 Matriz de decisión de la alternativa de diseño.	21
Tabla 2.4 Parámetros de fluido de trabajo caliente	35
Tabla 2.5 Parámetros de fluido de trabajo frio	35
Tabla 3.1 Valores Obtenidos de la Simulación en Solidworks	51
Tabla 3.2 Datos de la tapa Alambique	42
Tabla 3.3 Datos del intercambiador de Calor	42
Tabla 3.4 Accesorios	43
Tabla 3.5 Valores Obtenidos de la Simulación en Solidworks	49
Tabla 3.6 Valores Obtenidos de la Simulación en Solidworks	52
Tabla 3.7 Consumo energético del equipo	52
Tabla 3.8 Costo de materiales	54
Tabla 3.9 Costo de mano de obra	56

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Implementación general del muelle
- PLANO 2 Ubicación de ánodos en tablestacado frontal
- PLANO 3 Ubicación de ánodos en tablestacado lateral norte y sur

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los aceites esenciales son líquidos volátiles que se pueden encontrar en plantas o frutos, estos son extraídos mediante diferentes métodos y pueden ser utilizados en distintos procesos industriales, farmacológicos, alimentarios, entre otros.

A lo largo de la historia del ser humano se ha evidenciado el uso de aceites esenciales por las diferentes creencias, por su fragancia o por sus propiedades medicinales. Un ejemplo de aquello es que los guerreros se aplicaban ramas mentoladas donde habían recibido golpes para reducir el dolor que sentían producto de las guerras o aquellos rituales y celebraciones religiosas que formaban parte de la cultura de las civilizaciones antiguas. *(Casado Irene, 2018)*

Las etnias más populares que han utilizado aceites esenciales en su historia son las egipcias, europeas, indias y asiáticas para los rituales espirituales propios de sus creencias siendo ellos los que desarrollaron diferentes técnicas para extraer los aceites de las diferentes plantas, ramas, hierbas, frutas, verduras y raíces. *(Hidalgo & Romero, 2016)*

Actualmente, los aceites esenciales es una materia prima de importante demanda en la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética. El presente proyecto propone un diseño termomecánico con la finalidad de extraer el aceite esencial de eucalipto por el método de arrastre de vapor, aprovechando el potencial propio de la región dándoles un uso específico. Dado la atención que ha recibido los aceites esenciales los últimos años, el diseño de un equipo apto para la extracción de aceites esenciales que cuente con capacidad suficiente para un buen nivel producción permite la comercialización de esta operación.

Los aceites esenciales tienen propiedades curativas a nivel físico y emocional, así mismo cuentan con muchas características saludables como ser antibacterianos, analgésicos y antiinflamatorios. *(Montoya Gildardo, 2010)*

Considerando que las condiciones sanitarias actuales producto de la pandemia del COVID-19, los homeópatas recomiendan el uso de vaporizaciones con aceites esenciales que posean el componente eucaliptol. El eucalipto es la planta cuyo aceite esencial posee grandes concentraciones de eucaliptol.

1.1 Descripción del problema

En la actualidad existe una creciente demanda de aceites esenciales que se pueden obtener de diferentes fuentes de biomasa, derivados a que son utilizados como componente básico en la elaboración de diferentes productos que van desde los alimentarios, desinfectantes, perfumes, entre otros.

Estos aceites esenciales pueden extraerse mediante varios métodos: expresión, destilación con vapor de agua, extracción con solventes volátiles, enflorado y con fluidos supercríticos. *(Moreno, López & Siche, 2010)*

En el país no existe la tecnología apropiada para su extracción y/o procesamiento, por ende, en la mayoría de los casos es necesario la importación desde otros países, lo que conlleva en la práctica tener un precio elevado como materia prima en relación al volumen de producción de sus productos en el mercado local.

1.2 Justificación del problema

En el Ecuador, existe una industria incipiente en desarrollo de equipos para la extracción de aceites esenciales, en la mayoría de los casos los equipos existentes se basan en la experiencia del usuario, sin considerar parámetros técnicos o de producción que optimicen el volumen o calidad del aceite obtenido.

Por tales razones, resulta fundamental la búsqueda de soluciones tecnológicas que estén adaptadas al entorno local y permita pruebas de extracción con fuentes biomásicas existentes en el país.

Es importante además mencionar, que dada la situación sanitaria actual por la pandemia del virus COVID-19 ha existido un incremento en la demanda de aceite esenciales en especial eucalipto, derivado a los beneficios que brinda este aceite en el marco del proceso de tratamiento de la enfermedad a nivel comunitario. Esta situación planteada, permite que nuestro proyecto se vuelva rentable y por otro lado contribuye desde el lado tecnológico al desarrollo de iniciativas locales que contribuyan a combatir la enfermedad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema termomecánico para la extracción de aceites esenciales, empleando el procedimiento de hidrodestilación por arrastre con vapor de agua.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Definir los parámetros básicos de operación del sistema acorde a evaluación de la demanda de aceites esenciales en el mercado local.
2. Diseñar el sistema térmico para el procedimiento de hidrodestilación por arrastre de vapor de agua.
3. Diseñar la estructura de contención y soporte para el sistema de alimentación, sistema térmico y sistema de recolección de aceite.
4. Simular los principales elementos del sistema empleando técnicas de CFD o análisis de elementos finitos.
5. Elaborar planos y guías de implementación para su construcción a futuro.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Aceites Esenciales

Con respecto a los aceites esenciales se definen como compuestos naturales con fragancia perceptible y penetrante para el olfato humano, su densidad suele ser menor a la del agua, pese a que presentan una mayor

viscosidad. Son mezclas volátiles, es decir cambian fácilmente de estado líquido a gaseoso y son solubles en aceites e insolubles en agua. Se los halla con frecuencia en vegetales. Los aceites esenciales se pueden distribuir y hallar en plantas enteras o en las diferentes partes de este tal como en las raíces, tallos, hojas, flores y frutos. (Montoya Gildardo, 2010)

A continuación, se presenta la localización de los aceites esenciales en las plantas más comunes:

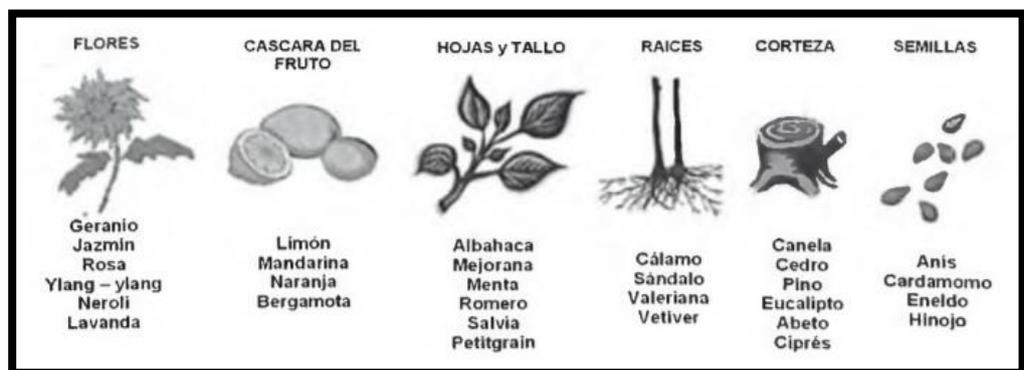


Figura 1.1 localización de aceites esenciales
Fuente: [Montoya Gildardo, 2010]

Hay que mencionar, además que los aceites esenciales son componentes irregulares de terpenos y reciben este nombre debido a su consistencia física, dado que es muy similar a los aceites grasos a pesar de que estos se volatilizan sin dejar huella grasosa. Así mismo pueden ser separados mediante diferentes procesos químicos o mecánicos. (Paredes & Quinatoa, 2010)

Conviene subrayar que los aceites esenciales presentan una importante demanda en la industria alimenticia, farmacéutica y de cosméticos debido a sus propiedades aromáticas y curativas, con lo cual el mercado de los aceites esenciales se encuentra en crecimiento constate, generando la invención y/o adaptación de la tecnología empleada para la extracción de este. (Palacios & Catillo, 2015)

1.4.2 Métodos de Extracción

Con respecto a la obtención de los aceites esenciales, existen varios métodos de extracción que se han sido utilizados a lo largo del tiempo. *(González Barbara, 2013)*

Aunque deseo enfatizar que los más comunes para la extracción de aceites esenciales naturales a partir de biomasa son:

- Extracción mecánica
- Extracción por radiación de microondas
- Extracción por fluido supercrítico
- Extracción por hidrodestilación

1.4.2.1 Extracción Mecánica

El proceso de extracción mecánica también se conoce como extracción por prensado o expresión. El propósito de este consiste en exponer a la materia prima a fuerzas de presión por medio de diferentes equipos tipo prensa. Como resultado dicha biomasa, al someterse a las fuerzas de presión se compacta de manera que el aceite esencial es exprimido al mismo tiempo que se recolecta y se filtra en caso de observar impurezas. *(Moreno, López & Siche, 2010).*

Por su parte, la biomasa utilizada para el proceso de extracción mecánica suelen ser las cáscaras de los cítricos.

Acorde con esto, los equipos principales que intervienen en el proceso de extracción mecánica son el tornillo sin fin de baja o alta presión, un extractor tipo expeller, un extractor centrífugo, un extractor tipo decanter y rodillos para la prensa, el equipo a utilizar depende de la biomasa a emplear. Ahora bien, antes de proceder con el proceso de extracción mecánica, es recomendable aplicar un proceso de corte de la biomasa para que la extracción tenga mejor eficiencia.

Extractor Tipo Expeller

Un extractor tipo expeller consiste en la extracción de aceites esenciales, preferiblemente de semillas, mediante la presión y compresión de la biomasa por medio de un tornillo que gira sobre su eje dentro de un cilindro hueco y que se encuentra dentro de un barril de drenaje para la recolección de aceites esencial; los restos de biomasa no procesada y que se encuentran entre los hilos del tornillo se descarga por medio de un orificio llamado dado. (FKC, 2020)

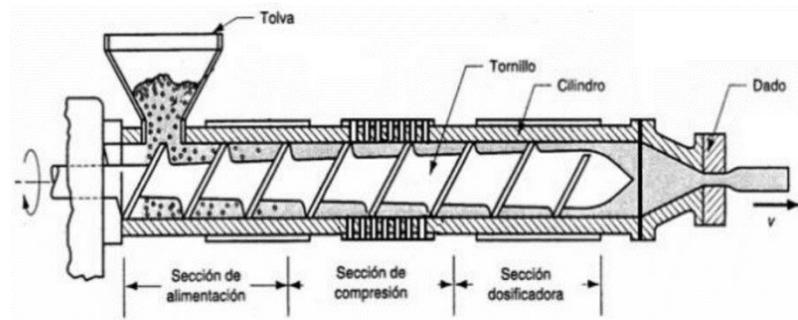


Figura 1.2 Extractor Expeller
Fuente: [FKC, 2020]

Extractor Tipo Centrífugo

Un extractor tipo centrífugo consiste en un proceso mecánico para la extracción de aceites esenciales de fuentes de biomásicas tales como frutas y vegetales de gran concentración de líquido en su composición que, al entrar en el equipo y por inercia del movimiento, extrae el líquido de la biomasa para su posterior separación de agua como de aceite esencial para pasar al filtrado de este. (Espínola Lozano, 2012)

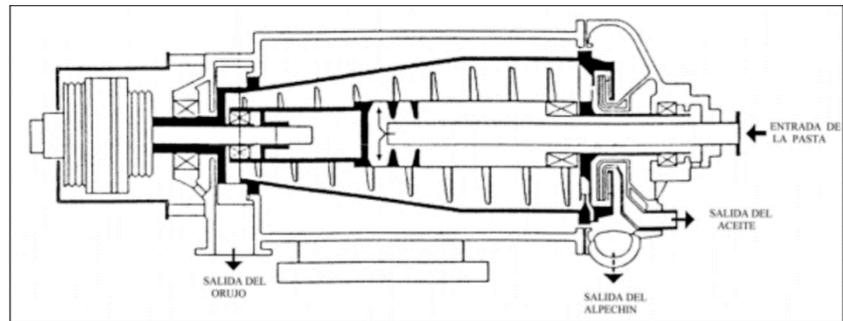


Figura 1.3 Extractor centrífugo
Fuente: [Espínola Lozano, 2012]

Extractor Tipo Decanter

Un extractor tipo decanter es similar el funcionamiento al extractor tipo centrífugo, con la diferencia de que el extractor decanter es en posición horizontal y además interviene el uso de agua externa al sistema. La biomasa aplicada en ambos procesos es la misma debido a su naturaleza. (Steiger & Rackerseder, 2014)

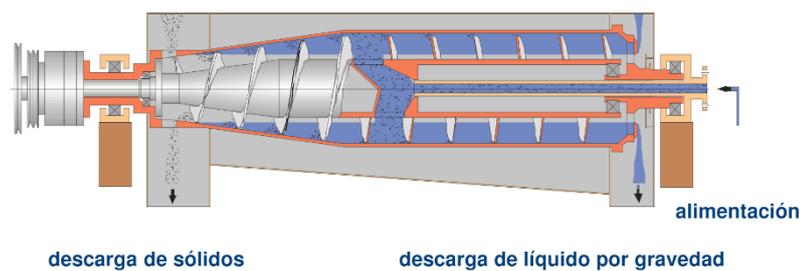


Figura 1.4 Extractor Decanter
Fuente: [Steiger & Rackerseder, 2014]

Extractor Tipo Rodillo

Un extractor tipo rodillo consiste en un proceso mecánico para la extracción de aceites esenciales de casi cualquier tipo de biomasa y cuya eficiencia es la más elevada (en relación de biomasa con el volumen de aceite esencial extraído). El extractor se compone de un juego de rodillos metálicos y un tornillo de Arquímedes abrasivos para la separación de desechos de biomasa del proceso con la mezcla de aceite esencial y agua. (J. Carrasco, 2012)

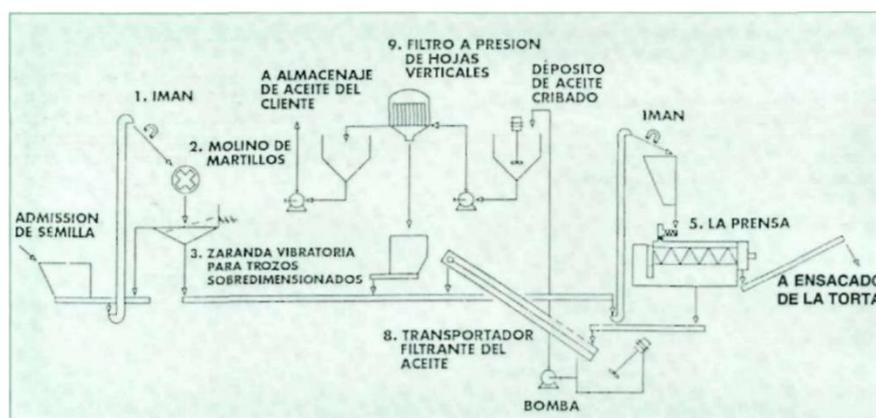


Figura 1.5 Sistema de extracción por rodillos
Fuente: [J. Carrasco, 2012]

1.4.2.2 Extracción por Radiación de Microondas

La extracción asistida por radiación de microondas o MWHD (por sus siglas en inglés *Microwave Radiation-assisted Hydro-distillation*) es un tipo de hidrodestilación, pero no se la cataloga en el grupo de hidrodestilación debido a su naturaleza física, dado que la materia prima se encuentra seca. (Amaresh ,Guha, Shafat Khan & Sumaiyah, 2017)

El proceso de extracción por radiación de microondas consiste en la sumersión de la biomasa en un cuerpo de agua con una relación de dos

tercios de agua y un tercio de biomasa para su posterior sometimiento a la acción de la radiación de las microondas.

Este método ofrece entre sus beneficios una reducción de tiempo considerable, lo cual se traduce en menor consumo de energía.

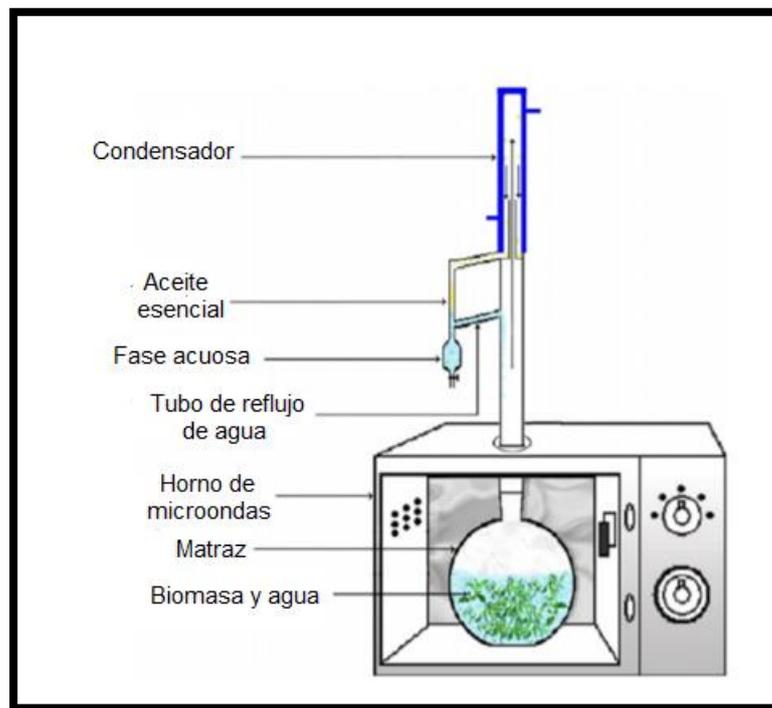


Figura 1.6 Esquema de equipo de hidroddestilación asistido por microondas
Fuente: [Peredo, Gracia & López, 2009]

1.4.2.3 Extracción con Fluido Supercrítico

Con respecto a la extracción con fluido supercrítico, esta técnica es una de las más recientes, en el cual la biomasa se reduce a partes pequeñas antes de pasar a una cámara a presión donde se somete a un fluido o gas por encima de las denominadas condiciones de licuado por el aumento de presión, este interactúa con la biomasa como agente extractor. Además, cabe subrayar que las propiedades físicas de un fluido supercrítico para las fases gaseosas o líquidas no varían entre ellas. (Rothstein & Roldán 2010)

El fluido más común para la extracción con fluido supercrítico es el dióxido de carbono CO_2 debido a que es una sustancia de baja viscosidad, baja tensión superficial, alto coeficiente de difusión, no es tóxico, no es explosivo, no es incendiario, es bacteriostático y está catalogado por el FDA como un fluido seguro.

El material que se utiliza en los equipos para extracción con fluidos supercríticos debe ser del tipo acero ASTM 316 debido a que deben soportar altas temperaturas y considerables presiones para operar dentro de un rango de seguridad óptimo. Mientras más grande sea la capacidad del equipo, mayores medidas de seguridad debe tener para evitar eventuales fallas y/o accidentes. El rendimiento y calidad que se obtiene con esta técnica es superior a las técnicas de hidrodestilación y prensado lo cual nos indica la efectividad de la tecnología emergente. (Restrepo, Londoño, Gonzales, Benavides & Cardona, 2012)

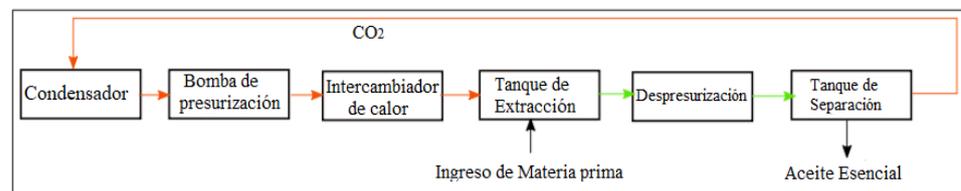


Figura 1.7 Esquema de equipo de hidrodestilación asistido por microondas
Fuente: [Peredo, Gracia & López, 2009]

1.4.2.4 Extracción por Hidrodestilación

El proceso de hidrodestilación es el más empleado en cuanto a procesos de extracción se refiere, consiste en calentar agua hasta su punto de evaporación haciendo que el vapor entre en contacto con la biomasa y actúe como agente extractor. Posteriormente, la mezcla de vapor de agua con aceite esencial se colecta en un embudo metálico para ser condensado y recolectado en un recipiente. (Moreno, López & Siche, 2010).

El condensado es una mezcla de agua y aceite esencial, el cual con diferentes métodos físicos o químicos pueden ser separados,

generalmente se utiliza la decantación. El agua puede volver a utilizarse en el proceso, mientras que el aceite debe ser almacenado en un sitio en el que no sea expuesto a la luz solar y de clima fresco, puesto que es susceptible a estos. (Montoya Gildardo, 2010)

Destilación Agua-Vapor

Es un tipo de hidrodestilación empleada en la extracción de aceites esenciales de diferentes biomásas. De hecho, el proceso de evaporación, condensación y separación es el mismo, pero se caracteriza debido a que la biomasa y el agua se encuentran en contacto directo previo a calentarse y evaporarse eventualmente. Luego el vapor penetra los tejidos de la biomasa y disuelve el aceite esencial que se encuentra presente en la biomasa. Se recomienda utilizar materiales metálicos resistentes a corrosión. (Torres Lilian, 2011). A continuación, se presenta un esquema del proceso de hidrodestilación vapor agua:

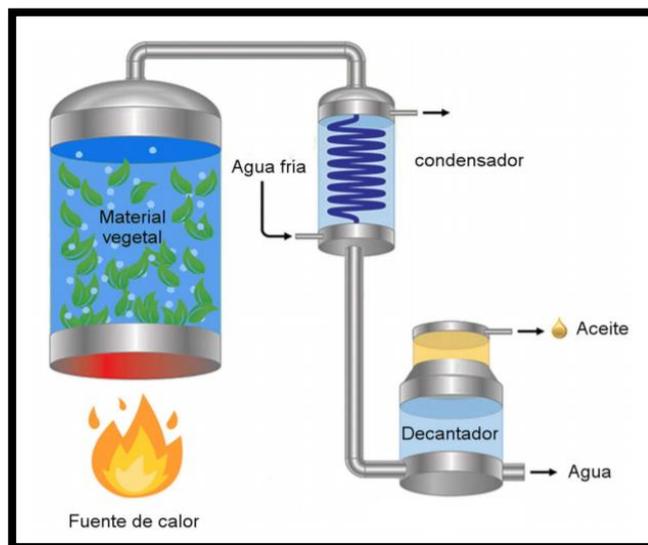


Figura 1.8 Hidrodestilación agua – vapor
Fuente: [José Barotto, 2013]

Destilación por Arrastre de Vapor

La hidrodestilación por arrastre de vapor es un proceso empleado en la extracción de aceites esenciales de fuentes biomásicas, empleando vapor saturado a presión atmosférica, en este tipo de destilación la fuente generadora de vapor no se encuentra en contacto con la materia prima. (Hidalgo & Romero, 2016)

El vapor producido entra en contacto con la materia prima calentándola, extrayendo los aceites esenciales que debido a su alta volatilidad se evaporan, en este punto la mezcla vapor saturado y aceite esencial fluye del alambique hacia el condensador, en donde la mezcla se enfría hasta la temperatura ambiente y, posteriormente por el método de decantación en un separador de fases o florentino se separa el aceite esencial y el agua debido a que estos son inmiscibles y presentan diferencias de densidades. (Paredes & Quinatoa, 2010)

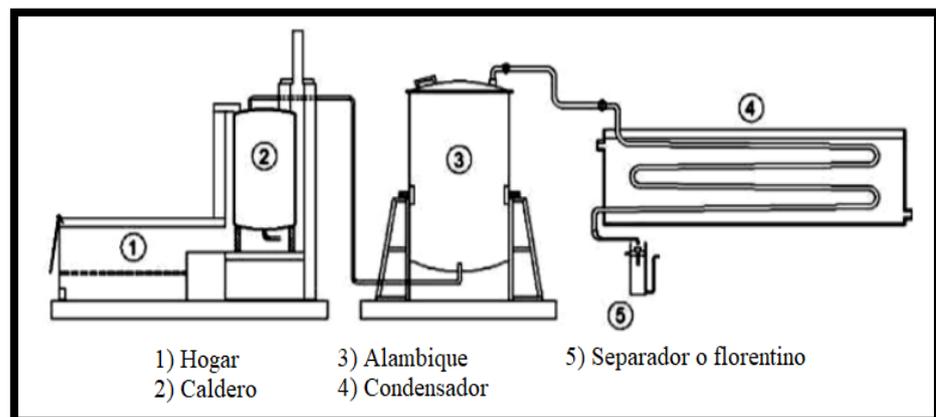


Figura 1.9 Hidrodestilación por arrastre de vapor.
Fuente: [Paredes & Quinatoa, 2010]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El siguiente punto trata del proceso para el diseño del EAE, especificando los elementos mecánicos del cual se compone, junto con sus características tomando como referencias las normativas establecidas en la sección 2.4 y los requerimientos establecidos por el cliente. Los pasos que se realizaron en el proceso de diseño se muestran a continuación:

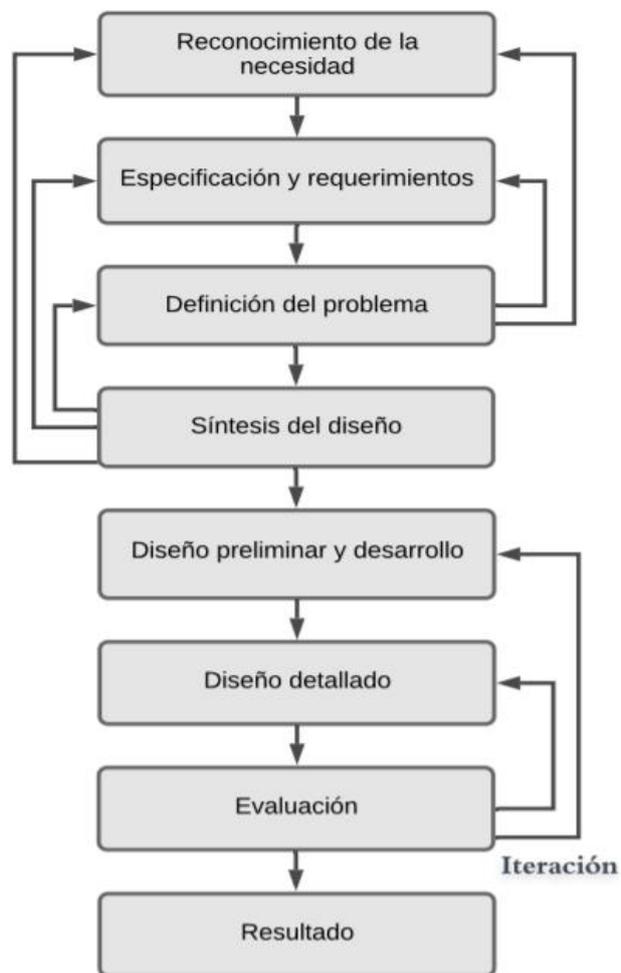


Figura 2.1 Metodología del diseño
Adaptado de [Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley,2008]

2.1 Requerimientos dados por el cliente

Ante todo, se deben considerar ciertos criterios en el diseño del EAE, cuya finalidad es brindar un funcionamiento eficiente y eficaz. A continuación, se detallan los criterios establecidos por el cliente:

1. La biomasa por emplear son las hojas de eucalipto, por lo tanto, se deberán tomar en cuenta sus características durante el proceso de diseño.
2. La producción del equipo debe ser de aproximadamente 200ml de aceite esencial por operación.
3. El material seleccionado para el diseño del alambique debe ser resistente a condiciones del trabajo.
4. El equipo por diseñar debe ser fácil de transportar, es decir sus componentes individuales no deben contar con un peso mayor a 50 [kg], puesto que el peso máximo que puede cargar una persona es de 25 [Kg] (*Normativa ISO 11228*)
5. El equipo debe contar con facilidades de operación.

2.2 Alternativas de diseño para el extractor de aceites esenciales

Con respecto al diseño del extractor de aceites esenciales con base en eucalipto, se ha considerado los diferentes criterios y requerimientos que se mencionan en la sección 2.4 normativas de diseño.

Con el fin de seleccionar la mejor alternativa de diseño para el proyecto, se han presentado varias propuestas de diseño, las cuales se compararán y se seleccionará aquella que mejor cumpla con los requerimientos establecidos, por ejemplo: fácil operación, transportabilidad, costo, fácil mantenimiento, calidad del producto entre otros.

Se presentarán tres alternativas de diseño para el EAE, donde se tomó en cuenta la fuente de energía calorífica del equipo, la capacidad de generación. Las alternativas a presentarse son diseñadas en acero inoxidable SAE 304 y como fluido de trabajo se empleó agua.

2.2.1 Alternativa de diseño 1

En esta alternativa de diseño se propone realizar la extracción de aceite esencial empleando el método de hidrodestilación agua-vapor. En primer lugar, la generación de vapor ocurre dentro del alambique, aunque separado de la biomasa, la cual se encuentra depositada sobre una malla metálica que impide el contacto entre ambas partes. A continuación, el vapor pasa a través de la biomasa actuando como agente extractor, separando el aceite esencial para continuar al condensador, en este punto la mezcla vapor-aceite esencial por medio de transferencia de calor cambia a fase líquida. Finalmente, en un equipo denominado “florentino” se aprovecha la diferencia de densidades que existe entre el agua y el aceite esencial para separarlos.

Este sistema presenta facilidad de fabricación, de ensamble y mantenimiento. A su vez, la separación de biomasa y agua mejora la calidad del aceite esencial a obtener, aunque restringe la capacidad neta de carga de la biomasa, limitando la producción.

A continuación, se muestra un boceto del modelo descrito:

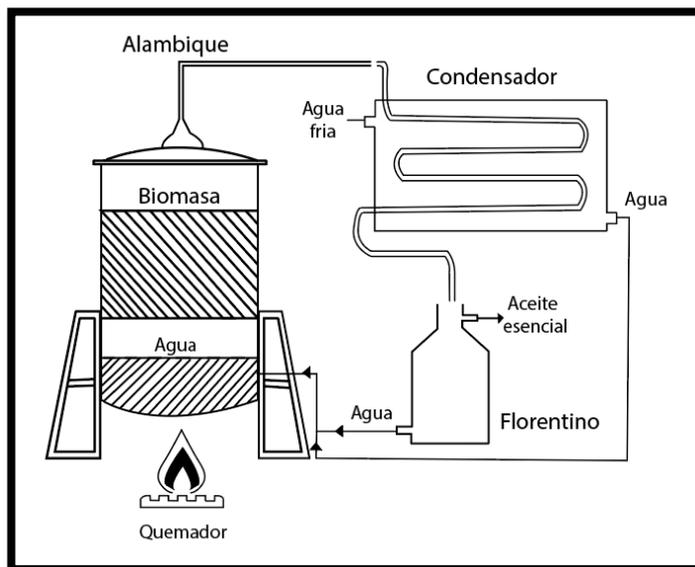


Figura 2.2 Proceso general alternativa de diseño 1

Fuente: [Elaboración Propia]

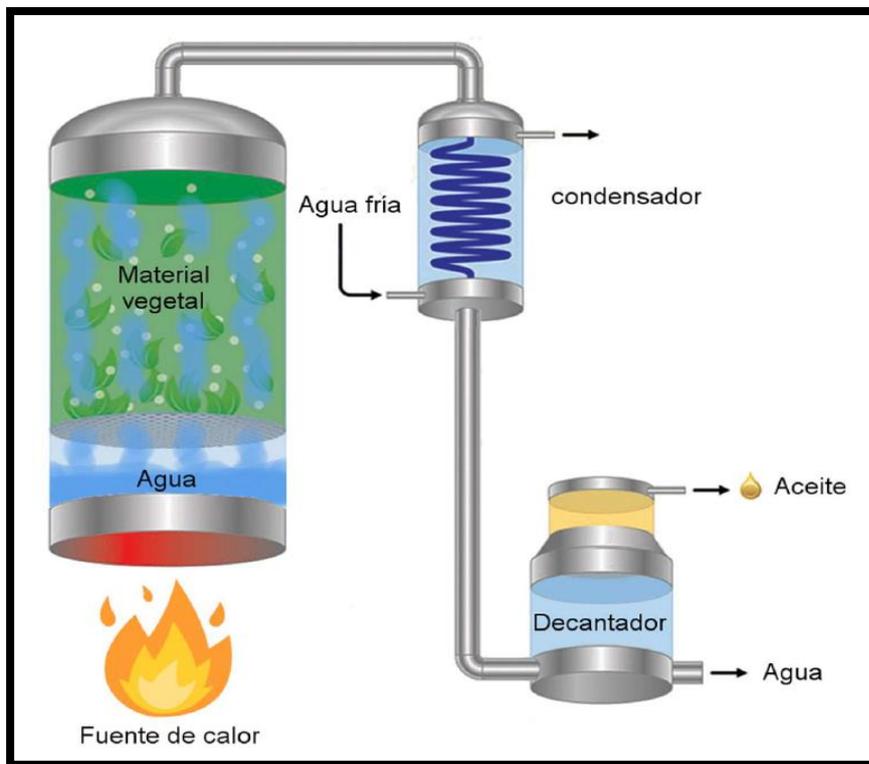


Figura 2.3 Características de la alternativa de diseño 1
Fuente: [José Barotto, 2013]

2.2.2 Alternativa de diseño 2

Esta alternativa de diseño plantea extraer el aceite esencial por medio del método de hidrodestilación por arrastre de vapor. Este método es considerado más seguro y es ampliamente utilizado en la industria, puesto que no requiere de equipos sofisticados, así como un rendimiento y pureza elevada del producto. Además, permite procesar gran cantidad de biomasa, y no opera a presiones y temperaturas elevadas. Con respecto a la fuente generadora de calor, esta se encuentra externa al alambique y el vapor llega a este por medio de tubería, entrando por la parte inferior y subiendo a través de la biomasa. En este punto se extrae el aceite esencial para pasar al condensador. Es aquí donde la mezcla vapor-aceite esencial cambia de fase para finalmente, realizar la separación de fluidos en el florentino a través del proceso de decantación.

A continuación, se muestra un boceto de la alternativa de diseño dos:

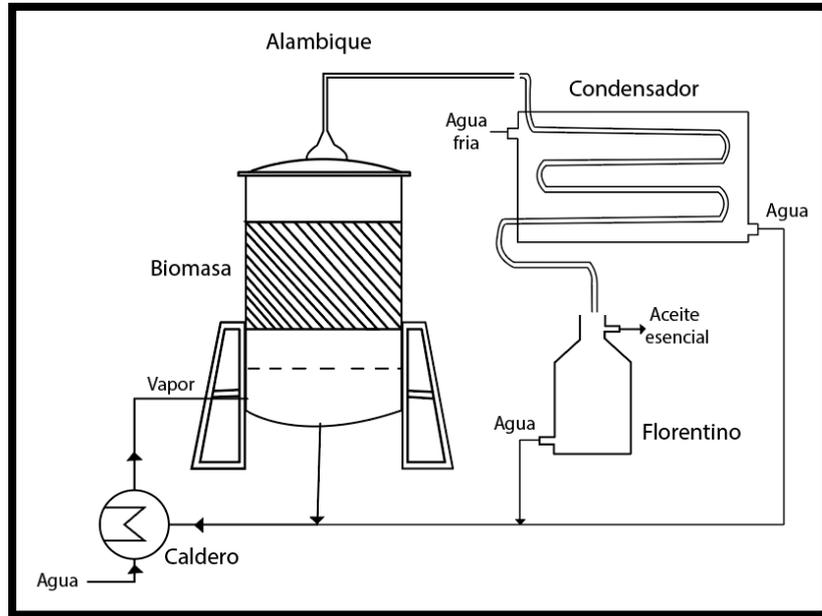


Figura 2.4 Proceso general alternativa de diseño 2
Fuente: [Elaboración propia]

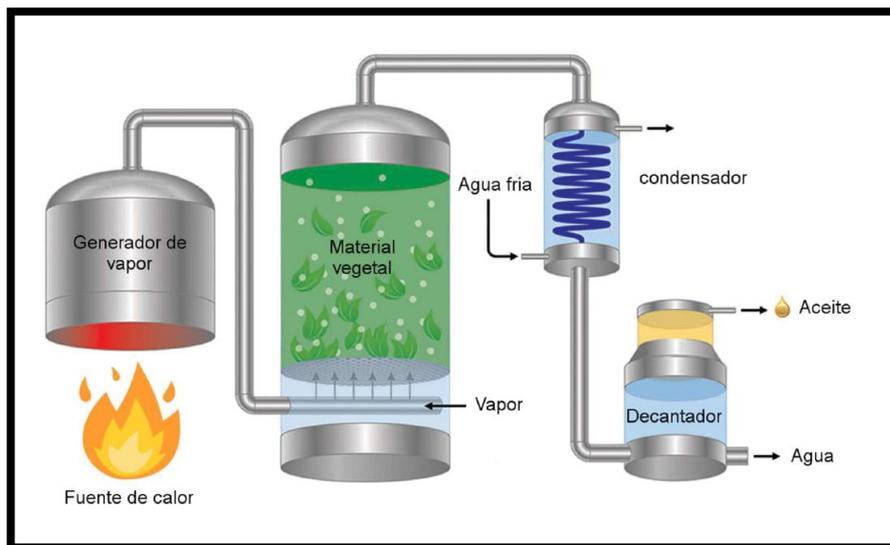


Figura 2.5 Características de la alternativa de diseño 2
Fuente: [José Barotto, 2013]

2.2.3 Alternativa de diseño 3

Este diseño consiste en extraer el aceite esencial del eucalipto aplicando el método de transferencia de calor por convección mediante hidrodestilación por arrastre de vapor.

El método consiste en tener un tanque de agua con una relación de 3:1 (66.7% de agua y 33.3% de biomasa) con relación al volumen de este, pero con la separación de un recipiente de acero SAE 304 que, al ser conductor, se calienta producto del calor generado por la evaporación del agua y por convección calienta el recipiente de biomasa evaporando el agua de esta junto con los aceites esenciales de la misma. Una particularidad de este método es que su fuente de calor es híbrida al tener dos fuentes de calor tales como un quemador de gas y una resistencia eléctrica sumergible.

Si bien es un método cuya eficiencia es relativamente mejor que el método de extracción de hidrodestilación por agua-vapor, no produce una cantidad de aceite esencial significativa en comparación al método de hidrodestilación por arrastre de vapor con un caldero externo.

A continuación, se muestra un boceto de la alternativa tres:

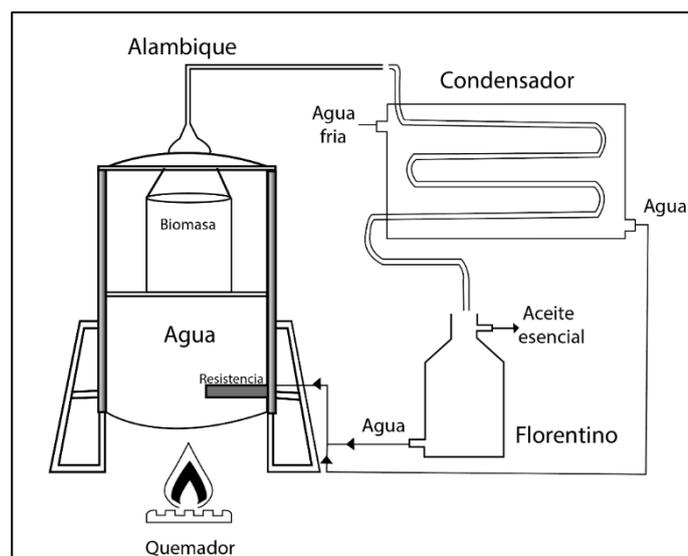


Figura 2.6 Proceso general alternativa de diseño 3
Fuente: [Elaboración Propia]

2.3 Selección del diseño para el extractor de aceites esenciales

Se tomaron en cuenta los siguientes criterios para realizar la matriz de decisión, identificando la solución óptima al problema.

- a) **Ensamblaje:** Facilidad para el montaje o desmontaje del equipo desde/hasta que se encuentre operativo, obtuvo un valor del 6.5%
- b) **Costo:** Es un factor importante pues se busca el diseño sea lo más accesible. Por ende, se le dio un valor de 51%
- c) **Producto:** Este factor toma en cuenta la calidad del aceite esencial obtenido. 32%
- d) **Maniobrabilidad:** Corresponde a la facilidad de operación y movilización del equipo en caso de ser requerido. 10,5%

Con respecto a la ponderación de cada criterio, se procedió a realizar una matriz con la finalidad de compararlos entre si, dando como resultado el valor relativo de cada criterio. Para ello se determinó un rango de valores, dispuesto de la siguiente manera:

- 10: El criterio de la columna es mucho más importante que el criterio de la fila.
- 5: El criterio de la columna es más importante que el criterio de la fila.
- 1: Ambos criterios son importantes.
- 1/5: El criterio de la columna es menos importante que el criterio de la fila.
- 1/10: El criterio de la columna es mucho menos importante que el criterio de la fila.

Tabla 2.1 Ponderación de los criterios de selección.
Fuente: [Elaboración propia]

PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS						
CRITERIOS	Ensamblaje	Costo	Producto	Maniobrabilidad	TOTAL	PONDERACIÓN APROXIMADA
Ensamblaje		1/5	1/5	1	1.4	6.5 %
Costo	5		1	5	11	51 %
Producto	5	1		1	7	32 %
Maniobrabilidad	1	1/5	1		2.2	10.5 %
TOTAL					21.6	100 %

A continuación, se determinó un rango para la ponderación de los criterios previamente mencionados, con lo cual se pretende identificar la alternativa de diseño que mejor satisfaga dichos criterios. Se seleccionó un rango con cuatro parámetros cualitativos para relacionar cada alternativa con cada criterio. (Norton, 2011).

Los rangos cualitativos (ver Tabla 2.2) están relacionados con números arbitrarios asumiendo una relación lineal, de esta manera se obtiene los parámetros cuantitativos para calificar las alternativas.

Al final se realiza una suma de los productos entre la ponderación y el rango, la alternativa que cuente con mayor puntaje será la seleccionada.

Tabla 2.2 Ponderación de los parámetros de calificación de alternativas
Fuente: [Elaboración propia]

PARAMETROS CUALITATIVOS	ABREVIACION	VALOR
Muy Bueno	MB	4
Bueno	B	3
Regular	R	2
Malo	M	1

Tabla 2.3 Matriz de decisión de la alternativa de diseño.
Fuente: [Elaboración propia]

CRITERIOS	ALTERNATIVAS							
	Ponderación		EAE por Hidrodestilación Agua-Vapor		EAE por Hidrodestilación por arrastre de vapor		EAE compacto por arrastre de vapor	
Ensamblaje	6.5%	1.4	MB	5.6	B	4.2	R	2.8
Costo	51%	11	MB	44	B	33	B	33
Producto	32%	7	M	7	MB	28	MB	21
Maniobrabilidad	10.5%	2.2	B	6.6	MB	8.8	MB	8.8
RESULTADO								
Total	100%	86.4	63.2		74		65.6	
Porcentaje	100%		73.15%		85.6%		75.9%	
Porcentaje entre las alternativas			85.4%		100%		88.7%	

Como se puede observar en la tabla 2.3, de acuerdo con los criterios de selección previamente definidos y con las ponderaciones de estos, el diseño que más se ajusta con los requerimientos del cliente es la segunda alternativa. Esta consiste en un sistema de EAE por el método de hidrodestilación por arrastre de vapor con un caldero externo, alimentado por una fuente de calor que puede ser producida por un quemador a gas o por una resistencia eléctrica, dependiendo de donde se lo requiera utilizar.

Para el desarrollo de la alternativa 2 es necesario seleccionar un caldero acorde a las necesidades de producción de aceite esencial diaria. Además, diseñar un alambique en el cual se deposite la biomasa de eucalipto para su extracción mediante arrastre por vapor. A su vez, el diseño de un condensador tipo serpentín para el vapor extraído de la biomasa. Finalmente diseñar el florentino para la separación entre agua y aceite esencial.

2.4 Normativas de diseño

2.4.1 Norma ISO 11228

La Organización Internacional de Normalización (ISO) elaboro un grupo de normas 11228 en donde se especifican los limites recomendados para el levantamiento y transporte manual de cargas. En esta norma se especifica que la masa máxima para un levantamiento que no es repetitivo es de 25 [kg]. Por ende, en base a esta normativa y teniendo en cuenta los requerimientos del cliente se establece que los componentes del equipo a diseñar no deberán contar con un peso mayor al que la normativa nos restringe, y en caso de requerirlo el componente deberá contar con la ergonomía necesaria para que dos personas puedan realizar el transporte manual y no deberá contar con un peso mayor a 50 [kg].

2.4.2 Código ASME sección VIII división 1

El código ASME SECCION VIII DIVISION 1 “Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión” establece las reglas para el diseño de recipientes a presión, tales como los materiales a utilizar, las cargas aplicadas, temperaturas máximas y mínimas para el diseño, presiones internas admitidas y recomendaciones para la fabricación. Por ello, es utilizado como guía principal para el diseño del alambique.

Dicho lo anterior, los parámetros geométricos y la comprobación del diseño, además de los cálculos realizados en este apartado están fundamentados en este código.

2.5 Diseño del alambique

2.5.1 Cálculo del volumen y masa de Biomasa

En este apartado se pretende establecer la masa y el volumen de la biomasa a utilizar para satisfacer el requerimiento del cliente, el cual establece que el equipo deberá extraer 200 [ml] de aceite esencial por operación. En consecuencia, como fuente de biomasa se trabajará con las hojas del del eucalipto globulus y en concordancia con el resultado se procederá a realizar el diseño del equipo.



Figura 2.7 Eucalipto Globulus
Fuente:[J. Damián Esquivel Díaz,2019]

De acuerdo con (Casado Irene, 2018) y (Montoya Gildardo, 2010) se establece un rango de rendimiento de masa de aceite esencial respecto a la masa de la planta de 0,5 – 5% y 0,5 – 2%, respectivamente. Por ello para efecto de cálculos se toma en cuenta el caso de rendimiento más crítico de la planta, es decir 0,5%.

Acerca del Eucalipto globulus (Moreno, López & Siche,2010) establece que la densidad del aceite esencial extraído cuenta con un valor de $908 \frac{kg}{m^3}$ y la densidad de la hoja de eucalipto globulus presenta un valor de $875 \frac{kg}{m^3}$. Para la determinación de la masa de eucalipto a utilizar se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\rho_{ae} = \frac{m_{ae}}{V_{ae}} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ_{ae} : Densidad de aceite esencial de eucalipto [$\frac{kg}{m^3}$].

V_{ae} : Volumen de asenté esencial requerido [m^3]

Dando un resultado de $m_{ae} = 0,18 [kg]$, si tenemos en cuenta que este valor representa solo el 0,5% de la masa inicial de eucalipto empleado, podemos establecer la masa de eucalipto a emplear para la extracción del aceite esencial, la cual es de 36 [kg]. Entonces, por consideraciones de diseño a este valor se le añade un factor de seguridad del 10%, resultando en una masa inicial de eucalipto de 40 [kg].

Avanzando con el razonamiento para la determinación del volumen de eucalipto a utilizar se debe tener en cuenta la densidad de empaquetamiento del lecho¹. La cual es un indicador de que tan compactado se encuentran las hojas eucalipto dentro del alambique, mientras más compactado se encuentren el vapor que actuará como agente extractor, encontrará mayor dificultad para traspasarlo. Por otro lado, si el vapor no presenta resistencia este no cumplirá su función de actuar como agente extractor y la cantidad de aceite extraído disminuirá. En consecuencia, se define una densidad de empaquetamiento optima de 350 [$\frac{kg}{m^3}$] (López Carvajal,2009).

¹ Lecho: Biomasa a la cual se le extrae el aceite esencial.

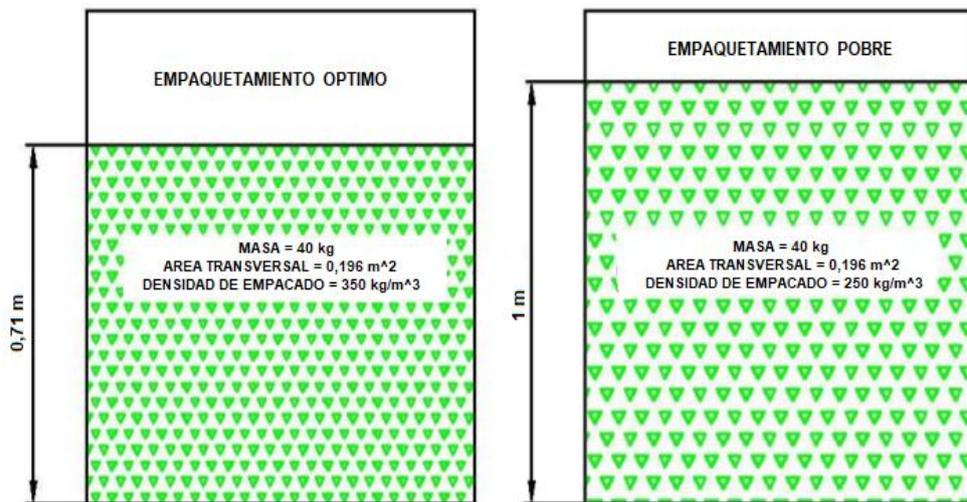


Figura 2.8 Densidad de empaquetamiento del eucalipto
Adaptado de: [López Carvajal,2009]

Así, por ejemplo, considerando el factor de empaquetamiento optimo establecido y adaptándolo al diseño, se obtiene 40 [kg] de biomasa con un volumen de 0,11 [m^3] para las hojas de eucalipto.

2.5.2 Colador

Uno de los componentes más importantes es el colador, puesto que es donde se encontrará la biomasa a la cual se le extraerá el aceite esencial. De manera que se definen las dimensiones del colador, para ello se trabajó con el volumen de eucalipto requerido para cumplir con el requerimiento del cliente. Por su parte para diseñar el colador se toma en cuenta que el volumen utilizable representa el 80% del volumen total, es decir, el volumen del colador (Bandoni Arnaldo,2003).

$$V_{utilizable} = 0,8 V_{total} \quad (2.2)$$

Partiendo de ello, el volumen utilizable es de 0,11 [m^3], resultando en un valor de volumen total del colador de 0,14 [m^3]. Este volumen se utilizará para determinar las dimensiones del colador y el material a emplearse.

Para ello hacemos uso de la ecuación de volumen de un cilindro.

$$V_c = \frac{\pi D^2}{4} * h \quad (2.2)$$

Donde:

V_c : Volumen del colador

D : Diámetro del colador

h : Altura del colador

Por ende, se asigna un valor fijo a una variable, sea esta el diámetro o la altura del colador. En este caso se establece un diámetro de colador de 0,5 [m] por practicidad de diseño, arrojando como resultado 0,71 [m].



Figura 2.9 Colador
Fuente: [Elaboración propia]

2.5.3 Cuerpo Alambique

CÁLCULOS BASADOS EN EL CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII DIVISION 1
“Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión”

El siguiente punto trata sobre el dimensionamiento del cuerpo del alambique. De manera que una vez calculado el diámetro del colador se define el diámetro del tanque de 0,55 [m] ,considerando una holgura de 5 [cm] entre el colador y el cuerpo del alambique. De la misma forma, se obtiene la altura del tanque en 0,80 [m] y basado en la revisión de la bibliografía se establece la presión de operación de 40 [psi] (Paredes & Quinatoa ,2010).

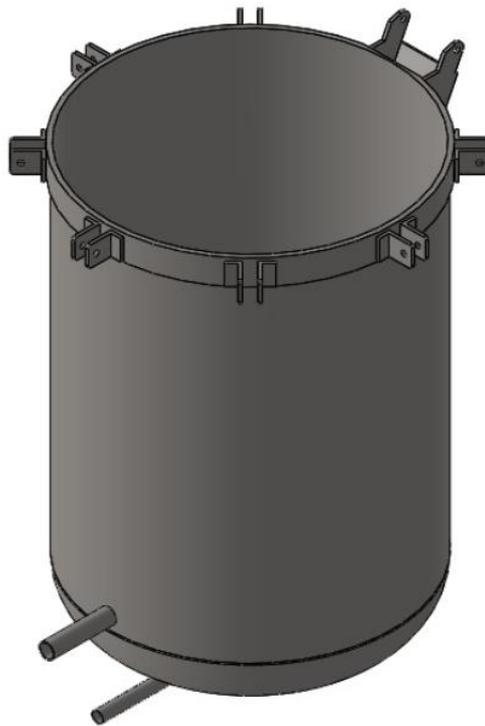


Figura 2.10 Cuerpo alambique
Fuente: [Elaboración propia]

Como la presión de operación interna en el cuerpo del alambique es menor a 300 [psi]

$$P_o < 300[psi]$$

Entonces la presión de diseño P_D deberá ser calculada de la siguiente manera:

$$P_D = P_o + 30[\text{psi}] \quad (2.3)$$

Donde:

P_D : Presión de diseño [psi]

P_o : Presión interna nominal [psi]

Calculada la presión de diseño se determina el espesor de la pared del cuerpo del alambique, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{P_D \left(\frac{D}{2}\right)}{S_y(ES) - 0.5P_D} \quad (2.4)$$

Donde:

t : Espesor del cuerpo del tanque [m]

P_D : Presión de diseño [kPa]

S_y : Esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [kPa]

ES : Eficiencia de soldadura de un solo lado.

Dando como resultado 1 [mm] de espesor, sin embargo, este cálculo no toma en cuenta las condiciones adversas a las que será sometido el tanque al momento de ser transportado. Por ello, se escoge un espesor de plancha de acero inoxidable SAE 304 de 3 [mm].

2.5.4 Tapa del Alambique

Con base en los resultados obtenidos en los incisos anteriores, se realiza el diseño de la tapa y el fondo del alambique. Para estos se estableció que el material a utilizar es acero inoxidable SAE 304. Por practicidad de diseño se determinó que el diámetro de ambos debe ser igual al diámetro del cuerpo del alambique calculado en el inciso anterior, es decir 0,55 [m].

Ahora bien, teniendo en cuenta esto resulta primordial definir el tipo de forma que presentara la tapa y fondo. Es por esto que existen diversos tipos de formas, entre las cuales se detallan las tres más utilizadas en la siguiente figura:

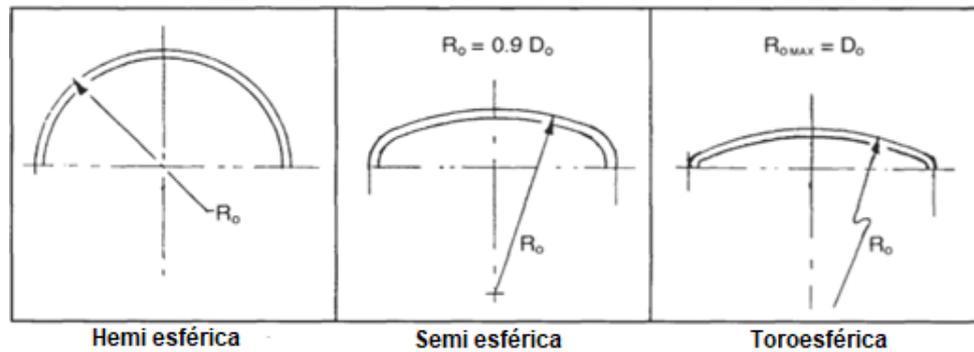


Figura 2.11 Tipo de tapas para tanques a presión
Adaptado de: [Dennis Moss,2003]

De aquí, se selecciona la forma de tapa toroesférica, debido a que permite disminuir las dimensiones del equipo ayudando a su maniobrabilidad. Además, cabe mencionar que tanto la tapa como el fondo del cuerpo del alambique presentarán la misma forma. Por ende, se procede a mostrar los parámetros geométricos que deben considerarse en el diseño de la tapa cilíndrica toroesférica:

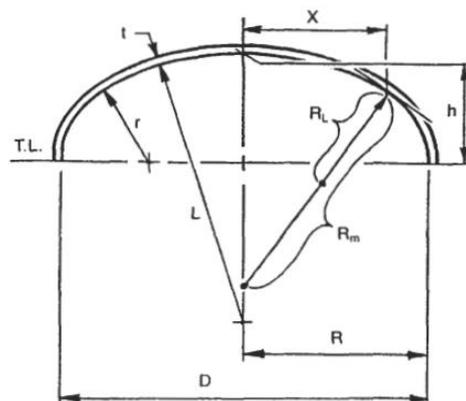


Figura 2.12 Dimensionamiento geométrico de tapa toroesférica
Fuente: [Dennis Moss,2003]

Donde:

L: Radio de corona [in]

r: Radio de nudillo [in]

h: Profundidad de la cabeza [in]

RL: Radio de curvatura latitudinal [in]

Rm: Radio de curvatura meridional [in]

t: Espesor de la tapa [in]

2.5.4.1 Cálculo de radio de corona (L)

Una vez denotadas las características geométricas se procede a realizar el cálculo del radio de la corona. Es por esto que, se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = L_{TT} + 0.112D \quad (2.5)$$

Donde:

L: Radio de curvatura de corona

L_{TT} : Distancia de tangente a tangente de la curva toroidal

D: Diámetro interior

2.5.4.2 Cálculo de radio del nudillo (r_k)

Para el cálculo del radio de nudillo se debe cumplir con el siguiente requisito, el cual establece que debe ser mayor a 3 veces el espesor de la tapa del tanque a presión.

$$r_k > 3t \quad (2.6)$$

Después, fue necesario asumir una relación entre el radio del nudillo y el radio de curvatura de la corona:

$$r_k = 0.17L$$

Una vez establecido esto, podemos realizar el cálculo para el coeficiente (M), el cual será utilizado posteriormente para la determinación del espesor de la pared.

$$M = 0.25 \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r_k}} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

M: Coeficiente de forma de relación entre radio de corona y radio de nudillo

r_k: Radio de nudillo [in]

L: Radio de corona [in]

2.5.4.3 Cálculo de la profundidad de cabeza (h)

Haciendo uso de la siguiente ecuación se determinó que la altura requerida de la tapa y del fondo del alambique de ser 14 [cm].

$$h = L - \frac{\sqrt{3L^2 - 4Lr_k}}{2} \quad (2.8)$$

Donde:

h: Profundidad de cabeza de [m]

L: Radio de corona [m]

r_k: Radio de nudillo [m]

2.5.4.4 Cálculo del espesor de la tapa del alambique (t)

De igual modo, para determinar el espesor de la tapa del alambique, se utilizó la siguiente ecuación, dando como resultado un espesor de 3 [mm].

$$t = \frac{P_D M L}{2S_y(ES) - 0.2P_D} \quad (2.9)$$

Donde:

t : Espesor de placa de tapa toro esférica [m]

P_D : Presión de diseño [kPa]

M : Coeficiente geométrico

L : Radio de curvatura de corona [m]

S_y : Esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [kPa]

ES : Eficiencia de soldadura por un solo lado

A continuación, se presenta el diseño de forma de la tapa toro esférica calculada:

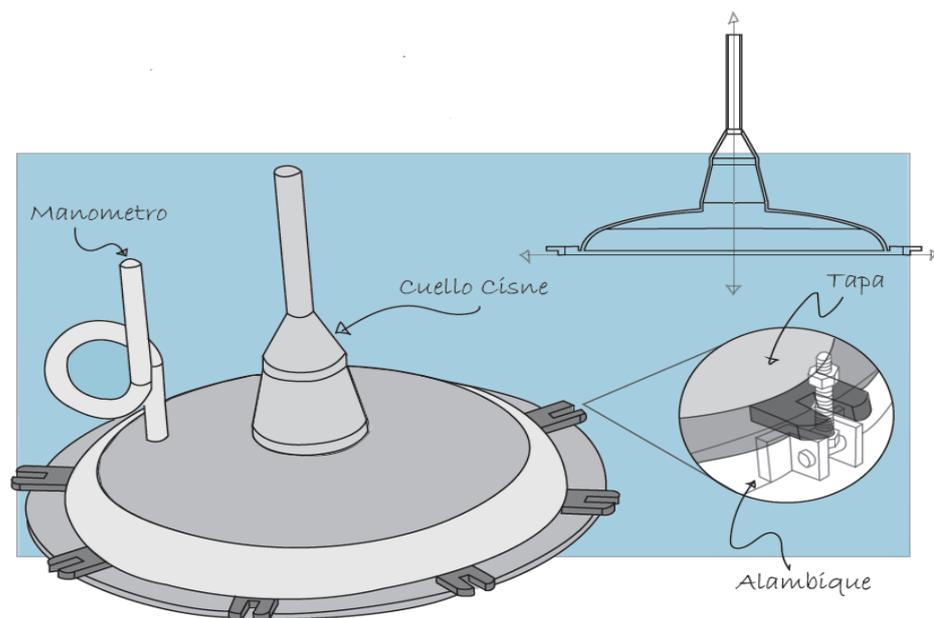


Figura 2.13 Tapa alambique
Fuente: [Elaboración propia]

2.6 Diseño del condensador

Este apartado contempla el diseño del sistema de enfriamiento para el extractor de aceites esenciales.

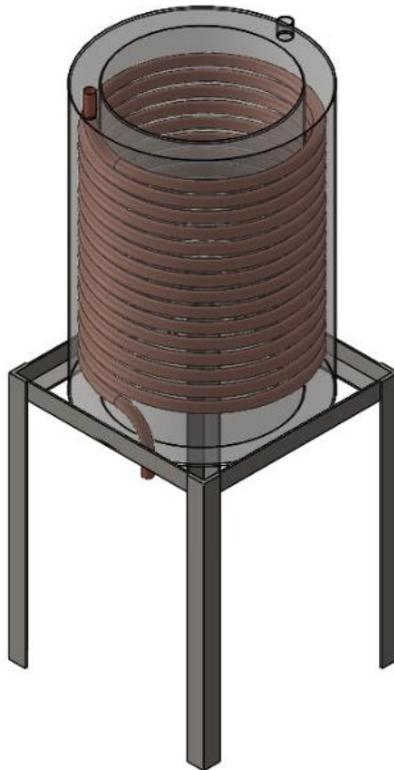


Figura 2.14 Diseño forma condensador

Fuente: [Elaboración propia]

2.6.1 Parámetros y propiedades del fluido de trabajo caliente

El fluido de trabajo es la mezcla de vapor-aceite esencial, debido a que la mezcla está constituida en su mayoría por vapor de agua y para simplificación del cálculo, las propiedades se aproximarán a las del agua saturada a la temperatura de saturación.

En la siguiente tabla, se muestran los parámetros de operación del fluido de trabajo.

Tabla 2.4 Parámetros de fluido de trabajo caliente
Fuente: [Elaboración propia]

Parámetros del fluido de trabajo caliente	
Entalpia de vaporización [KJ/kg]	$h_{fg,h}$
Capacidad calorífica del agua [KJ/Kg°C]	$c_{p,h}$
Temperatura de entrada del fluido de trabajo [°C]	$T_{h,i}$
Temperatura de salida del fluido de trabajo [°C]	$T_{h,o}$
Flujo másico	\dot{m}_h

2.6.2 Parámetros y propiedades del fluido de trabajo frio

Por otro lado, el fluido refrigerante con él se trabajará será agua a temperatura ambiente que proviene de una torre de enfriamiento una torre de enfriamiento. Para ello se tomó en cuenta los requerimientos establecidos por el cliente, dado que se tiene previsto que el equipo trabaje en lugares rurales.

A continuación, se detallan los parámetros de operación del fluido de trabajo frio:

Tabla 2.5 Parámetros de fluido de trabajo frio
Fuente: [Elaboración propia]

Parámetros del fluido de trabajo frio	
Entalpia de vaporización [KJ/kg]	$h_{fg,c}$
Capacidad calorífica del agua [KJ/Kg°C]	$c_{p,c}$
Temperatura de entrada del fluido de trabajo [°C]	$T_{c,i}$
Temperatura de salida del fluido de trabajo [°C]	$T_{c,o}$
Flujo másico	\dot{m}_c

2.6.3 Diseño térmico del condensador

2.6.3.1 Cálculo de calor sensible y latente

A continuación, se define las ecuaciones de calor a utilizar en el diseño del condensador. Para ello se debe tener en cuenta que el calor latente, representa la cantidad de energía que se le debe suministrar a una sustancia para que cambie de fase.

$$Q_l = \dot{m} * h_{fg} \quad (2.10)$$

Donde:

Q_l : Calor latente [KJ]

\dot{m} : Flujo masico del fluido [Kg/h]

h_{fg} : Entalpia del fluido [KJ/kg]

Por otra parte, el calor sensible se define como la cantidad de energía necesaria para que exista un cambio de temperatura en el fluido sin que cambie de fase.

$$Q_s = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (2.11)$$

Donde:

Q_s : Calor latente [KJ]

\dot{m} : Flujo masico del fluido [Kg/h]

C_p : Capacidad calorífica del fluido [KJ/Kg°C]

ΔT : Variación de temperatura [°C]

2.6.3.2 Coeficiente global de transmisión de calor

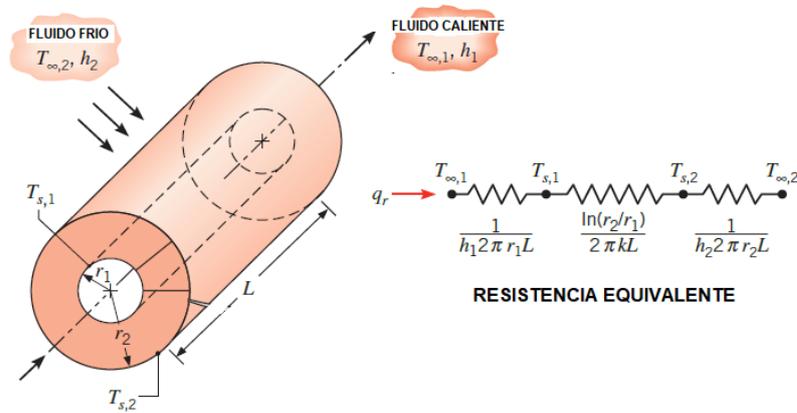


Figura 2.15 Coeficiente de transmisión de calor
Adaptado de: [adaptado de: Frank P. Incropera, 2011]

Este coeficiente se define términos de resistencia térmica para la transferencia de calor entre dos fluidos. En la imagen 2.13, se aprecia un arreglo de resistencias térmicas que ilustran las condiciones de diseño para el condensador.

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_1}{r_2 * h_c} + \frac{r_1 * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_{cu}} + \frac{1}{h_h}} \quad (2.12)$$

Donde:

U_o = Coeficiente global de transferencia de calor [W/m²°C]

r_2 = Radio exterior del tubo [m]

r_1 = Radio interno de la tubería de cobre [m]

h_c = Coeficiente de convección del fluido caliente [W/m²°C]

h_h = Coeficiente de convección del fluido frío [W/m²°C]

K_{cu} = Conductividad térmica del tubo [W/m°C]

2.6.3.3 Temperatura media logarítmica

Corresponde a un método que emplea la temperatura máxima de un fluido en caliente y la temperatura mínima del fluido en frío, este método es el más utilizado para el diseño de intercambiadores de calor en la industria, debido a su sencillez.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}} \right)} \quad (2.13)$$

Donde:

ΔT_{ml} = Temperatura media logarítmica [°C]

$T_{h,i}$ = Temperatura del fluido caliente entrada [°C]

$T_{h,o}$ = Temperatura del fluido caliente salida [°C]

$T_{c,i}$ = Temperatura del fluido frío entrada [°C]

$T_{c,o}$ = Temperatura del fluido frío salida [°C]

2.6.3.4 Área de transferencia de calor

Una vez establecido los parámetros anteriores se procede a definir el área de transferencia de calor, con la cual se calculará la longitud del tubo necesario para cumplir con los requerimientos del cliente.

$$A_s = \frac{Q_t}{U_o * \Delta T_{ml}} \quad (2.14)$$

Donde:

A_s = Área de transferencia de calor [m^2]

Q_t = Calor total a transferir [W]

U_o = Coeficiente global de transferencia de calor [$W/m^2°C$]

ΔT_{ml} = Temperatura media logarítmica [°C]

2.6.3.5 Longitud de la tubería

Finalmente procedemos a calcular la longitud de la tubería a emplearse en el diseño del intercambiador.

$$L_t = \frac{A_s}{r_2 * 2 * \pi} \quad (2.15)$$

Donde:

L_t = Longitud de la tubería del evaporador [m^2]

A_s = Área de transferencia de calor [m^2]

r_2 = Radio exterior de la tubería [m]

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diseño del Extractor de Aceites Esenciales – EAE.

En este capítulo se desarrolló la alternativa seleccionada previamente. Así mismo, se añadieron los elementos auxiliares para la tapa del alambique y el intercambiador de calor. Los accesorios como pernos, uniones de tubería y codos son seleccionados y considerados dentro del análisis de costo final.

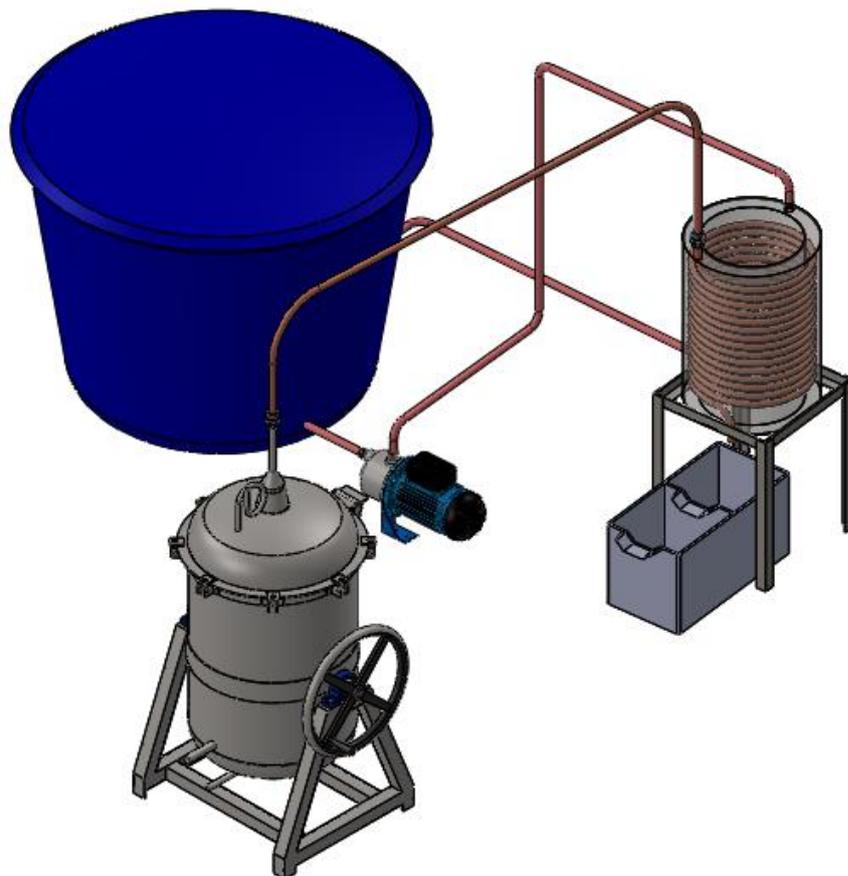


Figura 3.1 Vista del equipo diseñado
Fuente: [Elaboración Propia]

3.1.1 Estructura del alambique.

El alambique es el componente principal del EAE, por ello se detalla los componentes empleados para su diseño. El cuerpo del alambique cumple la función de estructura principal para los demás componentes, este fue diseñado empleando una plancha de acero inoxidable AISI 304 de 3 [mm] de espesor, la cual por medio de un rolado en frío adoptara las dimensiones del diámetro establecido. De igual manera para el diseño del colador se seleccionó una plancha perforada de acero inoxidable AISI 304, que por medio del mismo proceso adoptara las dimensiones de diámetro requeridas. Los demás elementos serán añadidos al cuerpo del alambique por medio de uniones soldadas. Para más detalle revisar la sección de apéndice D.

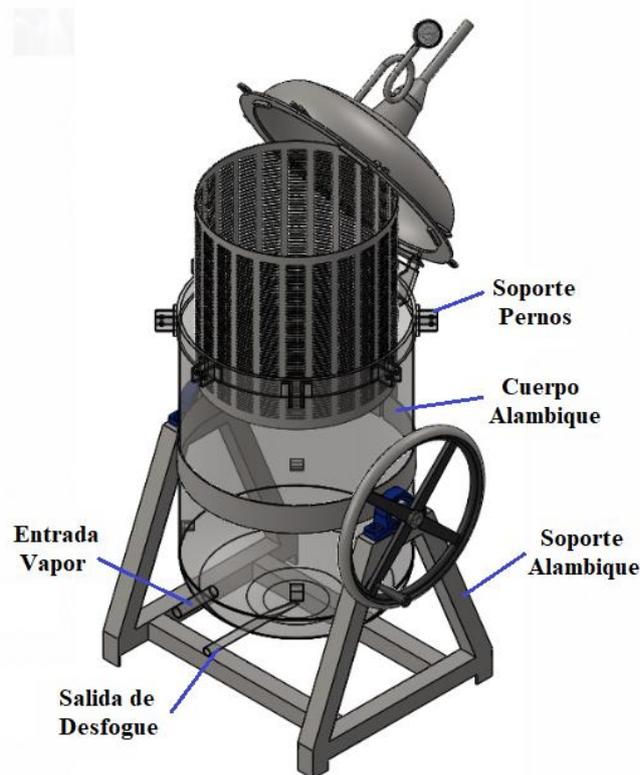


Figura 3.2 Cuerpo del Alambique
Fuente: [Elaboración Propia]

Tabla 3.1 Datos Estructura Alambique
Fuente: [Elaboración Propia]

Elementos Alambique	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Plancha (Cuerpo Alambique)	Acero Inoxidable AISI 304	1	1700x700	3
Plancha (Tira Refuerzo)		1	1700x 40	3
Plancha Soporte Pernos		16	100x35	3
Tubo Cuadrado 2" (Soporte)		8	500	2
Chumacera 1" (Soporte)		1	-	-
Volante		1	500	10
Plancha (Soporte Alambique)		1	1700x100	2
Tubo 1" (Entrada Vapor)		1	250	2
Tubo 1" (Salida Desfogue)		1	500	2
Plancha (Colador)		1	1700x1200	2

3.1.2 Estructura de la Tapa del alambique.

De igual manera que el cuerpo del alambique se seleccionó AISI 304 para el diseño de la tapa del alambique. Alrededor de la base de la tapa se colocó un sello de nitrilo para asegurar que la unión entre la tapa y el cuerpo del alambique sea hermética. En la tapa a su vez se coloca un condensador de vapor para el manómetro (Rabo de chancho) y un cuello de cisne que ayudara a la salida del vapor en el alambique.

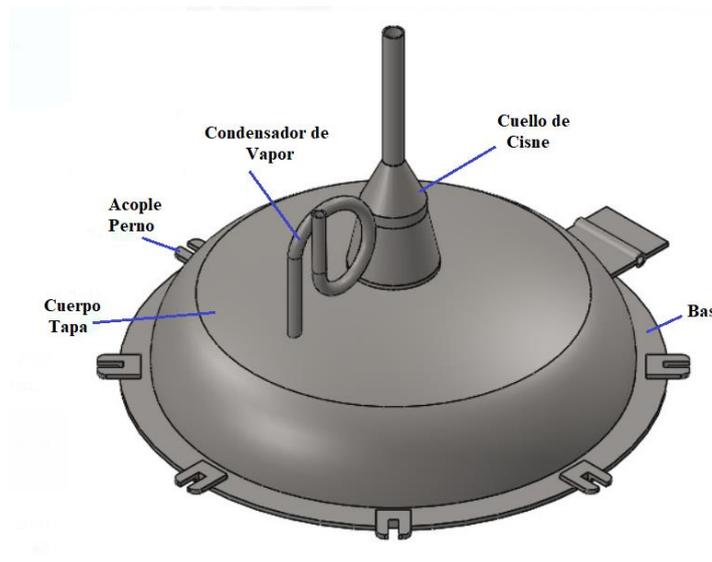


Figura 3.3 Tapa del Alambique
Fuente: [Elaboración Propia]

Tabla 3.2 Datos de la tapa Alambique
Fuente: [Elaboración Propia]

Elementos Tapa Alambique	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Plancha (Cuerpo Tapa)	Acero Inoxidable AISI 304	1	900x900	3
Plancha (Base)		1	600x600	6
Plancha (Acople Perno)		8	70x50	6
Tubo redondo 1"		1	300	2
Tubo redondo 1/2" (Condensador Vapor)		1	350	2
Reductor 6-3" (Cuelo Cisne)		1	-	2
Reductor 3-1" (Cuelo Cisne)		1	-	2

3.1.3 Estructura del Intercambiador de Calor.

El EAE realiza la condensación del aceite esencial por medio del intercambiador de calor, este fue diseñado teniendo en cuenta la viabilidad económica. Para ello se emplea como material de la coraza acero inoxidable AISI 304 y como tubería interior cobre. Esto disminuye los costos de material y facilita su construcción.

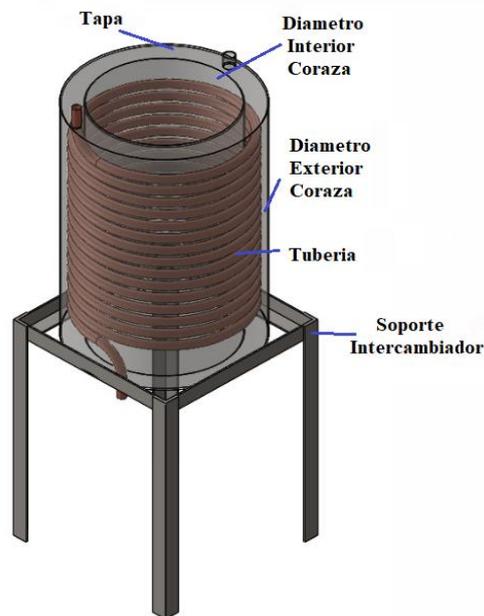


Figura 3.4 Intercambiador de Calor
Fuente: [Elaboración Propia]

Tabla 3.3 Datos del intercambiador de Calor
Fuente: [Elaboración Propia]

Elementos Intercambiador de Calor	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]
Plancha (Coraza exterior)	Acero Inoxidable AISI 304	1	1420x800	3
Plancha (Coraza Interior)		1	1100x800	3
Plancha (Tapa y Base)		2	450x450	3
Angulo 2" (Soporte)		1	6000	2
Tubería 3/4"	Cobre	1	24000	1.15

3.1.4 Accesorios.

Por último, se contempla el uso de ciertos accesorios para el ensamble de equipo, los cuales se seleccionaron de acuerdo con el modelo de diseño descrito anteriormente y los requerimientos del cliente mencionados en el capítulo 1. En el apéndice D se puede denotar la disposición de los accesorios descritos en la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Accesorios
Fuente: [Elaboración Propia]

Accesorios	Material	Cantidad	longitud [m]
Tubería 1"	cobre	1	2
Reductor de cobre 1" a 3/4"	cobre	1	-
Aislante térmico	Goma espuma	1	2
Unión Hembra/Macho	cobre	2	-
Manómetro	Acero inox	1	-
Reservorio Agua 1000 ml	PVC	1	-
Tubería 1"	PVC	1	5
Codo 1"	PVC	6	-
Unión Hembra/Macho	PVC	4	-
Pernos M10	Acero inxo	8	-
Varilla 8 mm	Acero Inox	1	1/2
Tuercas M10	Acero Inox	8	-
Arandelas M10	Acero Inox	8	-
Empaquetadura Tapa Alambique	Nitrilo	1	2
Brida 1"	Acero Inox	2	-
Válvula Globo 1"	Acero Inox	1	-
Válvula Globo 3/4"	Acero Inox	1	-
Angulo 2"	Acero A36	1	6

3.2 Otros equipos

3.2.1 Fuente de Vapor

Como se puede observar en el Anexo C, se realizan los diferentes cálculos para poder seleccionar un calderín que pueda cumplir con las condiciones térmicas del sistema de extracción de aceites esenciales. Se define previamente que la presión manométrica de trabajo del alambique será de 40psi y, dado que la máquina va a trabajar a nivel del mar, la presión atmosférica es de 14.7psi dando así una presión de 54.7psi (se redondea a 55psi).

Se observa, que la temperatura de saturación (punto en el que hay cambio de fase o estado) es de 135°C para la presión de 55psi. Se trabaja con una temperatura superior a la de saturación para evitar problemas de condensación no deseada.

Posterior a eso, se procede a estimar los valores de calor latente y calor sensible con un factor de seguridad del 15% por las diferentes pérdidas térmicas en los accesorios que se utilicen al conectar al alambique.

Se puede observar que la potencia expresada en Boiler Horse Power (BHP) mínima es de 1.8BHP, pero por los diferentes catálogos disponibles la potencia mínima de diseño corresponde a 3.0BHP.

3.2.2 Separador de Aceite

El mecanismo seleccionado para separar la mezcla de agua con aceite esencial de eucalipto consiste en un recipiente metálico de acero inoxidable AISI 304 que cumpla con un volumen de 0.03m³ con un separador metálico en el medio con el objetivo de evitar que existan movimientos no deseados y la mezcla se agite más de lo normal.

En la parte inferior del recipiente se coloca una válvula de paso tipo bola de un diámetro de ½ pulgada, en el otro extremo de la válvula se coloca una codera de PVC con un embudo de decantación o embudo de separación que consiste en un recipiente transparente utilizado comúnmente en laboratorios químicos para separar líquidos de diferentes densidades.

En el embudo de decantación se procede a extraer el agua condensada de la mezcla primero por gravedad y se regula mediante una pequeña válvula propia del embudo hasta llegar al nivel en el que sólo quede el extracto de aceite esencial de eucalipto y se procede a recolectarlo en un recipiente de vidrio (preferible tonalidad ámbar para mantener su calidad).

3.3 Simulaciones Térmicas del Equipo EAE

Mediante la ayuda del programa SolidWorks y su complemento Flow Simulation se realiza la simulación del alambique y del intercambiador de calor.

3.3.1 Alambique

Se definen parámetros de ingreso al alambique que asemejen un calderín de 3 BHP con una temperatura de vapor sobrecalentado de presión manométrica de 40psi y 177°C (450K) y se simula un bloque de biomasa poroso y de densidad de 875kg/m³ y de una masa de 40 kg como se puede observar en la figura 3.4.



Figura 3.5 Simulación del Alambique con Biomasa.
Fuente: [Elaboración Propia]

Al simular el proceso térmico y el comportamiento del vapor de agua dentro del alambique se puede observar en la figura 3.5 que el fluido tiene un comportamiento turbulento. Así mismo se puede observar el comportamiento de la presión y su disminución dentro del alambique debido a la interferencia de la biomasa desde la entrada hacia la salida del vapor

dentro del alambique, aunque dicho decrecimiento es mínimo ya que es menor a 0.15 kPa.

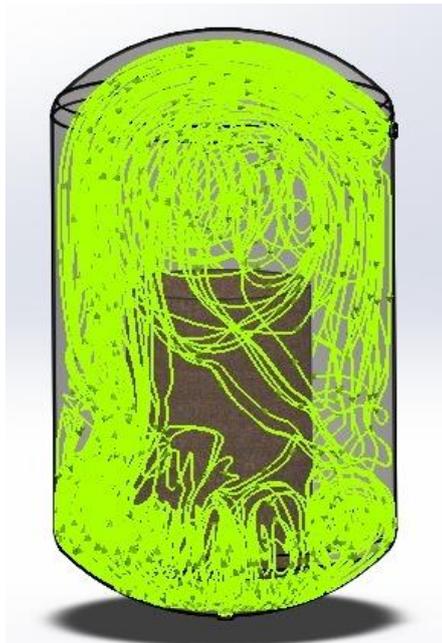


Figura 3.6 Simulación del Comportamiento del Vapor Dentro del Alambique
Fuente: [Elaboración propia]

Valores Obtenidos de la Simulación Térmica

La simulación en Flow Simulation generó los valores mostrados en la tabla 3.5. La simulación se realizó con un bloque de madera porosa cuya densidad y calor específico era muy similar a la información hallada sobre el eucalipto. La simulación se realizó respetando todas las normas de diseño mecánico para tanques de presión y diferentes normas para procesar productos que pudieran ser utilizados para el sector alimenticio. En el anexo D se muestra el reporte de la simulación.

Tabla 3.5 Valores Obtenidos de la Simulación en Solidworks
Fuente: [Elaboración propia]

Temperatura de ingreso [°C]	177
Temperatura de salida [°C]	148
Presión de ingreso [KPa]	275.93
Presión de salida [KPa]	275.79
Calor específico $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	1386
Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	0.2256
Densidad $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	875

3.3.2 Intercambiador de Calor (Condensador)

Los datos de ingreso al intercambiador de calor del vapor corresponden a los mismos valores de salida de vapor del alambique puesto que la tubería que lo transporta se encuentra totalmente aislada térmicamente por un aislante llamado lana de vidrio que evita la interacción de la tubería con la temperatura exterior.

En la figura 3.6, se puede observar el ensamble del intercambiador con la coraza de acero inoxidable en el cual se va a desarrollar el intercambio de calor entre la mezcla de vapor y el agua fría que va a actuar como agente refrigerante y condensar el vapor. Las tuberías son de cobre ya que es un material anticorrosivo y con una gran capacidad de transferencia de calor, idóneo para situaciones en las que se necesita condensar un fluido; el material del recipiente es de acero inoxidable AISI 304 utilizado para la industria alimenticia.



Figura 3.7 Simulación de Intercambiador de Calor
Fuente: [Elaboración Propia]

En la figura 3.7, se observa el comportamiento del fluido utilizado como refrigerante, agua en este caso, que ingresa al sistema con una temperatura ambiente de 22°C y sale del sistema con una temperatura de 35.68°C. Puesto que el sistema de refrigeración se encuentra al ambiente, este no se encuentra sometido ni sufre alteraciones en sus propiedades producto de la presión.

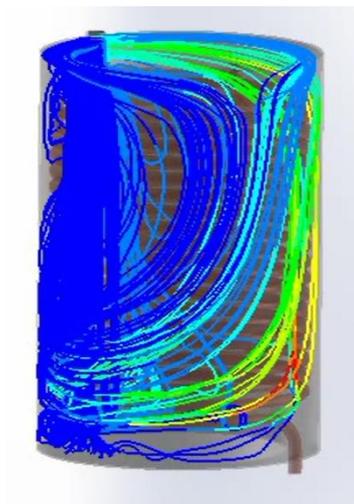


Figura 3.8 Simulación térmica del refrigerante en Solidworks
Fuente: [Elaboración Propia]

En la figura 3.8 se puede observar el comportamiento de la mezcla de vapor de agua con vapor esencial, que ingresa al sistema con una temperatura estimada de 135°C hasta llegar a una temperatura en la salida de 46.89°C.

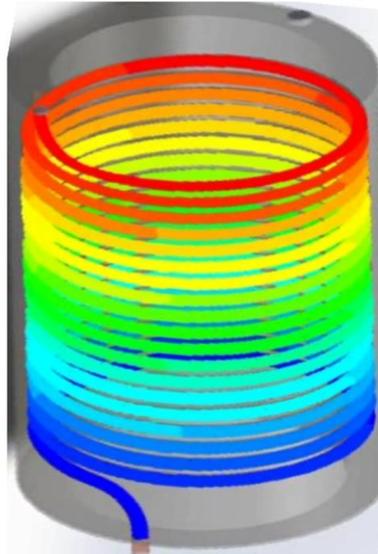


Figura 3.9 Simulación Térmica de Mezcla de Vapor en Solidworks.
Fuente: [Elaboración propia]

Valores Obtenidos de la Simulación Térmica

En relación a la simulación del intercambiador de calor; considerando que son dos fluidos que interactúan, el programa genera un reporte para cada fluido, el anexo E refleja los datos generados para la mezcla de vapor y el anexo F refleja los datos generados para el refrigerante utilizado.

En la tabla 3.6 se pueden observar los valores de la simulación del intercambiador, tanto valores del fluido refrigerante como el fluido caliente de la mezcla de vapor.

Tabla 3.6 Valores Obtenidos de la Simulación en Solidworks
Fuente: [Elaboración propia]

Temperatura de ingreso refrigerante [°C]	25.8
Temperatura de salida refrigerante [°C]	40.6
Temperatura de ingreso vapor [°C]	148
Temperatura de salida vapor [°C]	47
Caudal de vapor $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	0.0056
Caudal de refrigerante $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	0.3375

3.4 Análisis de consumo energético

Para el análisis de consumo energético se tomó en cuenta las fuentes de consumo de energía del sistema, asociado al gas que se emplea que se encarga de calentar el agua en el caldero y la bomba que forma parte del circuito de refrigeración del intercambiador de calor.

Para ello se debe de tener en cuenta que únicamente el 50 % de la energía producida con gas se aprovecha; el 50 % restante pierde como calor. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015). Teniendo en cuenta que 1 cilindro de gas transformado a energía eléctrica equivale a 180 [kW-h], procedemos a realizar el análisis de consumo energético del sistema. (Molina, Palomeque & Méndez, 2018)

Se establece el consumo de gas que utiliza el caldero por medio de un balance de energía realizado en el apéndice B. De aquí se estima el calor que debe ganar el agua en el caldero para que suba su temperatura y realice el cambio de fase, la cual es de 15 KW. Suponiendo una eficiencia del caldero del 70% y tomando en cuenta que el 50% de la energía se pierde en forma de calor se necesitan 43 kW, lo cual es menor a la capacidad que puede entregar el cilindro de gas.

Continuando con nuestro análisis, corresponde analizar el consumo generado por la bomba de recirculación del refrigerante en el intercambiador, la cual de acuerdo con el mercado local se seleccionó con una potencia de ¼ [hp] (186 Wh). A continuación, en la siguiente tabla se detalla el consumo general del equipo para una hora de operación:

Tabla 3.7 Consumo energético del equipo
Fuente: [Elaboración Propia]

POTENCIA DE CONSUMO ENERGÉTICO			
Dispositivo	Potencia [W]	Cantidad	Total [W]
Bomba centrífuga	186	1	186
Caldera	4,30E+04	1	4,30E+04
			43186

3.5 Análisis de costos

Para el análisis de costos se debe tener en cuenta las medidas estándar en las cuales se encuentran las planchas de acero en el mercado local (1220x2440 [mm]) y las tuberías (6 [m]).

Tabla 3.8 Costo de materiales
Fuente: [Elaboración Propia]

DISEÑO DEL CUERPO DEL ALAMBIQUE					
Elementos	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Precio
Plancha (Cuerpo del alambique)	Acero Inoxidable AISI 304	1	1700 x 700	3	93.94
Plancha (Tira de refuerzo)		1	1700 x 40	3	5.50
Plancha (Soporte para pernos)		16	100 x 35	3	16.00
Tubo Cuadrado 2" (Soportes)		8	500	2	30.00

Chumacera 1"		1	-	-	25.00
Volante		1	500	10	40.00
Tubo 1" (Entrada vapor)		1	250	1.2	1.50
Tubo 1" (Salida de desfogue)		1	500	1.2	2.95
Plancha (Colador)		1	1700 x 1200	2	161.00
Plancha (Base tapa)		1	900 x 900	6	54.42
Tubo 2" (Soporte Alambique)		4	600	1.2	18.00

DISEÑO DE TAPA DE ALAMBIQUE					
Elementos	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Precio
Plancha (Cuerpo de la tapa)	Acero Inoxidable AISI 304	1	900 x 900	3	64.00
Plancha (Base)		1	600 x 600	6	54.42
Plancha (Acople del perno)		8	70 x 50	6	8.00
Tubo redondo 1"		1	300	1.2	1.00
Tubo redondo 1/2" (Condensador de Vapor)		1	350	1.2	0.80
Reductor (6" a 3") (Cuello cisne)		1	-	2	25.00
Reductor (3" a 1") (Cuello cisne)		1	-	2	20.00

DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR					
Elementos	Material	Cantidad	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Precio
Plancha (Coraza exterior)	Acero Inoxidable AISI 304	1	1420 x 800	3	89.70
Plancha (Coraza interior)		1	1100 x 800	3	69.50
Plancha (Tapa y base)		1	450 x 450	3	16.00
Tubería	Cobre	3	1500	1,15	210.00
Ángulo de 2"	Acero Inoxidable 304	1	4500	3	33.75

ACCESORIOS					
Elementos	Material	Cantidad	Longitud [mm]		
Tubería 3/4"	Cobre	1	2		8.00
Reductor de tubería (1" a 3/4")	Cobre	1	-		15.00
Aislante Térmico	Goma espuma	1	2		25.00
Unión Hembra/Macho	Cobre	2	-		4.00
Manómetro	Acero Inoxidable	1	-		6.00
Reservorio de agua (1000 mL)	PVC	1	-		131.71
Tubería 1"	PVC	1	5		14.10
Codo 1"	PVC	6	-		0.75
Unión Hembra/Macho	PVC	4	-		12.00
Pernos M10	Acero Inoxidable	8	-		7.40
Varilla 8[mm]	Acero Inoxidable	1	1/2		4.75
Tuercas M10	Acero Inoxidable	8	-		1.60
Arandelas M10	Acero Inoxidable	8	-		0.80
Empaquetadura (Tapa alambique)	Nitrilo	1	2		16.00
Brida 1"	Acero Inoxidable	2	-		25.00
Válvula globo 1"	Acero Inoxidable	2	-		4.00
Válvula globo 3/4"	Acero Inoxidable	1	-		5.00
Costo Final					\$1321.59

Tabla 3.9 Costo de mano de obra
Fuente: [Elaboración Propia]

COSTO POR MANO DE OBRA			
Cantidad de Personas	Horas Trabajadas	Costo por hora	Costo Total
1	80	10	\$800

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Discusión

- Al desarrollar la alternativa seleccionada en el capítulo 2 se tomaron en cuenta los diferentes accesorios como pernos, uniones de tubería y codos que no se habían considerado previamente y cuya inclusión incrementará el valor del equipo como tal como se puede observar en la figura 3.1.
- El alambique se lo diseñó seleccionó el acero inoxidable AISI 304 de un espesor de 3 [mm] que debe ser rolado en frío para poder tomar la geometría deseada, al igual que el colador como se puede observar en la figura 3.2 y en la tabla 3.1 se pueden observar los datos estructurales del alambique y el colador. Adicional, en la figura 3.3 se puede observar el diseño de la tapa del alambique con los diferentes accesorios y en la tabla 3.2 se pueden observar los datos estructurales de la misma.
- El otro componente diseñado del equipo extractor de aceites esenciales es el intercambiador de calor con el fin de condensar la mezcla de vapor de agua con el vapor del aceite esencial. El intercambiador es diseñado en material acero inoxidable AISI 304 con un serpentín interior de cobre como se puede observar en la figura 3.4; así mismo, en la tabla de datos 3.3 se pueden observar los datos estructurales del intercambiador de calor.
- En la tabla 3.4 se pueden observar con más detalles todos los accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del equipo extractor de aceites esenciales y que adicionalmente, cumpla con los requerimientos del cliente y consumidores del producto.

- Los otros componentes que forman parte del equipo extractor de aceites esenciales corresponden a la fuente de vapor, el cual mediante la cantidad de calor necesaria para dentro del alambique y con la presión de trabajo se conoció que la potencia necesaria corresponde a un caldero de 3 BHP. Así mismo, la capacidad de un reservorio para separar la mezcla corresponde a un recipiente de 0.03 m³.

4.2 Conclusiones

- El sistema se conforma de cuatro componentes, cada uno especificado en el capítulo 2; las componentes son una fuente generadora de vapor o caldero, un alambique con su colador metálico para facilitar su manipulación, un intercambiador de calor para poder condensar la mezcla de vapor y un recipiente para que repose la mezcla líquida de agua con aceite esencial para poder ser separado mediante un embudo de destilación.
- Dado que el equipo fue diseñado con un factor de seguridad superior a lo recomendado en el Código ASME, existe un riesgo mínimo de accidentes por altos niveles de presión en el interior del sistema termo mecánico de extracción.
- Todo el sistema termo mecánico de extracción de aceites esenciales de biomasa se considera un sistema cerrado puesto que durante el ciclo se mantiene la presión de trabajo previamente definida en 40 [psi].
- El calderín ingresa el vapor de agua con una presión de 40 [psi] y a una temperatura de 177 °C, lo cual se considera como vapor de agua sobrecalentado, al alambique presurizado a la presión de trabajo. El vapor viaja desde la parte inferior del alambique hacia la parte superior del alambique, cruzando así la biomasa depositada en el colador metálico, con una temperatura de 148 °C.

- En el intercambiador de calor se realiza la condensación de la mezcla de vapor en una mezcla líquida. El fluido caliente ingresa al intercambiador a una temperatura de 148 [°C] y sale del intercambiador con una temperatura de 47 [°C], mientras que el refrigerante utilizado para el proceso de extracción de calor es agua que fluye al intercambiador de calor a una temperatura promedio de 25.8 [°C] y sale del mismo con una temperatura de 40.6 [°C].
- El sistema termomecánico se diseñó con la particularidad de ser un sistema desmontable y de fácil operación. El sistema es desmontable puesto que cada componente se puede desmontar y ser movilizado para ensamblarse en el lugar en el que se va a extraer el aceite esencial de la biomasa que se requiera. Así mismo, el sistema requiere de dos personas para poder movilizarlo y operarlo en el sitio puesto que, por recomendaciones laborales, un trabajador promedio no puede levantar más de 25 [kg].
- De igual manera, el material con el que se diseña el sistema termomecánico para la extracción de aceites esenciales de fuente biomásica corresponde a un tipo de acero inoxidable AISI 304. La implementación del uso de este tipo de acero hace que el aceite esencial extraído pueda ser considerado e implementado en la industria alimenticia, además de las otras industrias que requieran usarlo. El otro material empleado en el sistema es el cobre para el diseño del serpentín debido a sus propiedades térmicas y mecánicas.
- Los resultados calculados en el Anexo A y Anexo D corresponden a los cálculos teóricos y simulación del comportamiento del alambique, respectivamente; mientras que el Anexo B y Anexo E corresponden a los cálculos teóricos y simulación del comportamiento del intercambiador de calor (condensador), respectivamente. Los datos coinciden tanto para el alambique como para el intercambiador de calor. Los resultados térmicos

para el alambique calculados corresponde a una temperatura de ingreso de 177 [°C] y de salida de 148 [°C]; los resultados térmicos para el intercambiador de calor corresponden a 148 [°C] en la entrada y de 47 [°C] a la salida para el fluido caliente, mientras que para el refrigerante corresponde a una temperatura de 26 [°C] para el ingreso y una temperatura de 41 [°C] a la salida del intercambiador.

- En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se puede observar el comportamiento del vapor de agua sobrecalentado en el alambique, del fluido de refrigeración y de la condensación de la mezcla de vapor, respectivamente. Se puede observar cómo varía la temperatura en el intercambiador de calor, mientras el fluido caliente disminuye su temperatura, el fluido refrigerante aumenta su temperatura cumpliendo el principio de termodinámica sobre el equilibrio térmico.

4.3 Recomendaciones

- El sistema termomecánico para extracción de aceites esenciales de fuente biomásica se diseñó en acero inoxidable AISI 304, lo cual eleva su costo de fabricación. Sin embargo, puede reducirse el costo de este al utilizar otro tipo de metal anticorrosivo como acero galvanizado para el alambique y su colador, así como la estructura del intercambiador de calor también puede usarse el acero galvanizado.
- Puesto que el sistema es un sistema térmico que depende de la eficiencia energética, es recomendable aislar los componentes de este tal como el alambique, tuberías metálicas externas y el intercambiador de calor con un material aislante como lo es la lana de vidrio para evitar pérdidas hacia el exterior, lo cual puede influir en la calidad del aceite extraído.
- En caso de que el operador quisiera extraer aceite de otra fuente biomásica, es necesario realizar una limpieza de los ductos internos del alambique e intercambiador de calor para no contaminar el producto final

que es el aceite esencial. La limpieza se la realiza con una limpieza manual del alambique y su colador, mientras que la limpieza del intercambiador de calor se la realiza utilizando el sistema, pero sin la inclusión de alguna biomasa en el alambique.

- Es aconsejable que el(los) operador(es) del sistema termomecánico revisen periódicamente los manómetros, puesto que una variación de presión puede provocar que el aceite extraído se quemara o que exista algún accidente laboral en los accesorios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acán, A., & Pilataxi, C. (2014). Diseño y construcción de un equipo extractor de aceites esenciales por arrastre de vapor berro, espinaca, zanahoria. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- [2] Bandoni, A. (2003). Aprovechamiento industrial de la producción de aromas y sabores. CYTED. Buenos Aires, Argentina.
- [3] Bandoni, Arnaldo. (2003). Recursos vegetales aromáticos en latinoamérica. CYTED.
- [4] Barbara, G., & Silva, V. (2013). Modelamiento para simulación y control del proceso de destilación por arrastre de vapor para obtener aceite esencial de limón. Universidad Nacional de Trujillo.
- [5] Bermudez, C. (2009). Uso Industrial de Plantas Aromáticas y Medicinales. Universidad Politécnica de Madrid.
- [6] Cerpa Chavez, M. G. (2007). Hidrodestilación de aceites esenciales: Modelado y caracterización. Universidad de Valladolid.
- [7] Cerutti, M., & Neymayer, F. (s. f.). Introducción a la obtención de aceite esencial de limón. Invenio 7.
- [8] Cuellar, A. (2017). Diseño de la automatización para una planta piloto de extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente. Pontificia Universidad Católica de Perú.
- [9] Edison Lopez, J. C. (2009). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PARA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESCENCIALES CON CAPACIDAD PARA 300kg DE MATERIAL VEGETAL. Universidad de Santander.
- [10] Extracción de aceite esencial de mandarina (*citrus reticulata*) utilizando dióxido de carbono en condición. (s. f.).
- [11] Fundacion, E. (2003). Análisis de la tendencia del mercado internacional de aceites esenciales. FAO. Santiago, Chile.
- [12] Galrraga Rivera, Y. (2015). Diseño de una presna de tornillo tipo expeller para la extracción de aceite vegetal virgen de la semilla de maíz, para uso comestible. Universidad tecnológica de Pereira.

- [13] Gonzalez, V. (2004). Obtención de aceites esenciales y extractos etanólicos de plantas amazónicas. Universidad Nacional de Colombia.
- [14] Introducción a la industria de los aceites esenciales de plantas medicinales y aromáticas. (2066). SENA, Colombia.
- [15] Irene Casado, M. L. (2018). OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESCENCIALES POR DESTILACIÓN EN CORRIENTE DE VAPOR. INDUSTRIALES.
- [16] Macelo Pintado, A. G. (2017). Diseño y modelado de una máquina peladora de almendras. ESPOL.
- [17] Montoya Cadavid, G. (2010). Alternativa de diversificación para el eje cafetero. Universidad Nacional de Colombia.
- [18] Paredes Pumina, D., & Quinatoa Chicaiza, Fabián. (2010). Desarrollo de un sistema de extracción de aceites esenciales. ESPOCH.
- [19] Paucar, M., & Orta, T. (2018). Diseño y construcción de un sistema de enfriamiento para el equipo de extracción de aceites esenciales por arrastre de vapor. Universidad Superior Politécnica del Chimborazo.
- [20] Peredo Luna, A., Palou García, E., & López Malo, A. (2009). Aceites esenciales: Métodos de extracción. Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos.
- [21] Resico, C. (2001). Análisis de la información sobre productos forestales no madereros en argentina. FAO. Santiago, Chile.
- [22] Rothstein, G., & Roldan, V. (2010). Factibilidad del proyecto de extracción de aceites de la naranja en Antioquía. Escuela de Ingeniería de Antioquía.
- [23] Torres, C. (2018). Análisis comparativo de hidrodestilación con el arrastre de vapor para la extracción de aceites esenciales de la cáscara de naranja. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- [24] Torres, T. (2011). Estudio de la hidrodestilación del aceite esencial de Lippia Alba, en un destilador a escala piloto. Universidad Industrial de Santander.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Diseño del alambique

CÁLCULOS BASADO EN CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII DIVISION 1 “Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión”

En este apéndice se ilustra los cálculos realizados en el diseño del alambique, en concreto el diseño de la tapa y del cuerpo del alambique (Tanque).

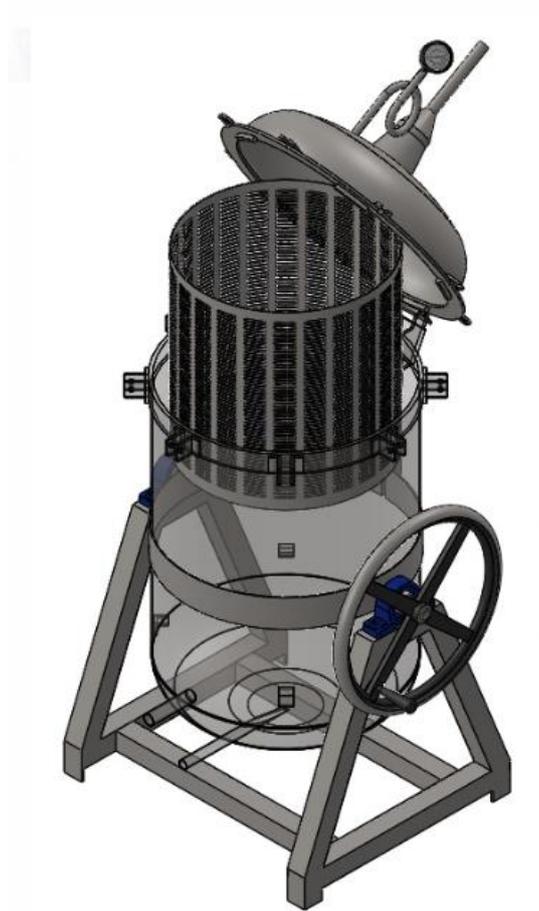


Figura A.1: Diseño de forma del alambique
Fuente: [Elaboración propia]

1. Diseño de la tapa

Para realizar los cálculos se presenta la forma de la tapa seleccionada con sus parámetros geométricos.

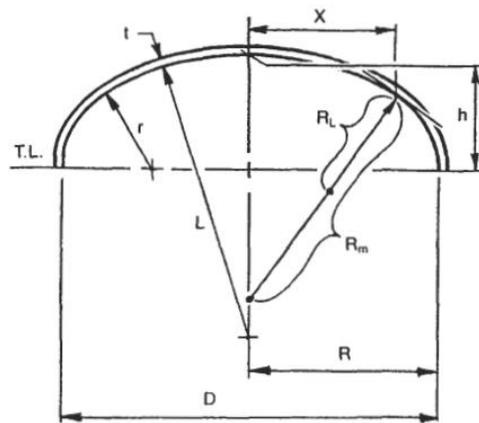


Figura A.2: Geometría tapa toro esférica
Adaptado: [Dennis Moss,2003]

Donde:

L: Radio de corona [in]

r: Radio de nudillo [in]

h: Profundidad de la cabeza [in]

R_L : Radio de curvatura latitudinal [in]

R_m : Radio de curvatura meridional [in]

t: Espesor de la tapa [in]

1.1. Cálculo de la presión de operación

Como la presión nominal interna en el tanque es menor a 300[psi]

$$P_o < 300[\text{psi}]$$

Entonces la presión de diseño P_D deberá ser calculada de la siguiente manera:

$$LP_D = P_o + 30[\text{psi}] \quad (\text{A.1})$$

Donde:

P_D : presión de diseño [psi]

P_o : presión interna nominal [psi]

Entonces, la presión de diseño calculada es:

$$P_D = 30[\text{psi}] + 30[\text{psi}] = 60[\text{psi}]$$

Convirtiendo la presión de diseño a unidades del sistema internacional

$$P_D = 40[\text{psi}] * \frac{6894.76[\text{Pa}]}{1[\text{psi}]} = 206.84 [\text{kPa}]$$

1.2. Cálculo de radio de corona (L)

$$L = L_{TT} + 0.112D \quad (\text{A.2})$$

Donde:

L : radio de curvatura de corona

L_{TT} : distancia de tangente a tangente de la curva toroidal

D : diámetro interior

Como la distancia entre la tangente a tangente de la curva toroidal es igual al diámetro interior ($L_{TT} = D$), entonces el radio de curvatura de la corona sería

$$L = D + 0.112D$$

$$L = 1.112D$$

$$L = 1.112(0.55) = 0.612[m]$$

1.3. Cálculo de radio de nudillo (r_k)

Para el diseño del radio de nudillo se debe cumplir con el requisito, que debe ser mayor a 3 veces el espesor de la tapa del tanque a presión

$$r_k > 3t \quad (\text{A.3})$$

Asumiendo una relación entre el radio del nudillo y el radio de curvatura de la corona:

$$r_k = 0.17L$$

Podemos realizar el cálculo para el coeficiente (M)

$$M = 0.25 \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r_k}} \right) \quad (\text{A.4})$$

Donde:

M : coeficiente de forma de relación entre radio de corona y radio de nudillo

r_k : radio de nudillo [m]

L : radio de corona [m]

$$M = 0.25 \left(3 + \sqrt{\frac{L}{0.17L}} \right)$$

$$M = 0.25 \left(3 + \sqrt{\frac{100}{17}} \right) = 1.35$$

1.4. Cálculo de espesor de tapa de tanque a presión (t)

$$t = \frac{P_D M L}{2S_y(ES) - 0.2P_D} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

t : espesor de placa de tapa toro esférica [m]

P_D : presión de diseño [kPa]

M : coeficiente geométrico

L : radio de curvatura de corona [m]

S_y : esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [kPa]

ES : eficiencia de soldadura por un solo lado

$$t = \frac{(1.35)(206.84 \times 10^3)(0.612)}{2(220 \times 10^6)(0.6) - 0.2(206.84 \times 10^3)} = 0.00065[m]$$

$$t = 0.65 [mm]$$

Sin embargo, este cálculo no toma en cuenta las condiciones adversas a las que será sometido el tanque al momento de ser transportado. Por ello, se escoge un espesor de plancha de acero inoxidable SAE 304 de 3 [mm]. Con esto se pretende evitar abolladuras por golpes al momento de ser transportado. Corroborando con la relación entre el radio de nudillo y el espesor de plancha para tapa toro esférica

$$r_k = 0.17(0.612) = 0.104[m]$$

$$3t = 3(3) = 9 [mm]$$

$$104,04[mm] > 9[mm] \text{ (comprobado)}$$

1.5. Cálculo de profundidad de cabeza (h)

$$h = L - \frac{\sqrt{3L^2 - 4Lr_k}}{2} \quad (A.6)$$

Donde:

h : profundidad de cabeza de [m]

L : radio de corona [m]

r_k : radio de nudillo [m]

$$h = 0.612 - \frac{\sqrt{3(0.612)^2 - 4(0.612)(0.104)}}{2} = 0.146[m]$$

$$h = 146 [mm]$$

2. Diseño del cuerpo del alambique

2.1. Cálculo del espesor del cuerpo del tanque



Figura A.3: Espesor de pared del tanque
Fuente: [Elaboración propia]

$$t = \frac{P_D \left(\frac{D}{2}\right)}{S_y(ES) - 0.5P_D} \quad (\text{A.7})$$

Donde:

t : espesor del cuerpo del tanque [m]

P_D : presión de diseño [kPa]

S_y : esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [kPa]

ES : eficiencia de soldadura de un solo lado

$$t = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.275)}{(220 \times 10^6)(0.6) - 0.5(206.84 \times 10^3)} = 0.0004[\text{m}]$$

$$t = 0.4[\text{mm}]$$

Para selección, se escoge un espesor de plancha de acero inoxidable SAE 304

$$t = 3[mm]$$

3. Cálculo de esfuerzos en el alambique

Una vez establecido los parámetros geométricos del alambique se procede con el cálculo de sus respectivos esfuerzos. Para ello, es imperativo que se defina la sección crítica en el alambique, siendo la tapa o el fondo de este.

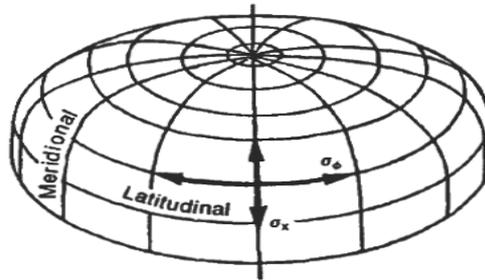


Figura A.3: Espesor de pared del tanque
Adaptado: [Dennis Moss,2003]

Donde:

σ_ϕ : Esfuerzo latitudinal [psi]

σ_x : Esfuerzo meridional [psi]

A continuación, en la siguiente tabla se detallan las fórmulas para el cálculo de los diferentes esfuerzos en los puntos de la tapa toro esférica:

Tabla A.1: Esfuerzos tapa toro esférica
Fuente: [Elaboración propia]

Esfuerzos en tapa toro esférica	
Esfuerzo meridional σ_x	Esfuerzo latitudinal σ_ϕ
Junta Corona - Nudillo	
$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t}$	$\sigma_\phi = \frac{P_D L}{4t} \left(3 - \frac{L}{D/2} \right)$
Corona	

$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t}$	$\sigma_\varphi = \frac{P_D L}{2t}$
Nudillo	
$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t}$	$\sigma_\varphi = \frac{P_D L}{t} \left(1 - \frac{L}{2r_k}\right)$
líneas tangentes	
$\sigma_x = \frac{P_D (D/2)}{2t}$	$\sigma_\varphi = \frac{P_D (D/2)}{t}$

Donde:

P_D : Presión de diseño [psi]

L : Radio de la corona [m]

D : Diámetro interior del tanque [m]

t : Espesor de la tapa toro esférica [m]

3.1. Esfuerzos radiales y longitudinales en corona

$$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t} \quad (\text{A.8})$$

Donde:

σ_x : esfuerzo radial en la corona [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de corona [m]

$$\sigma_x = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{2(0.003)} = 21.09 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_\varphi = \frac{P_D L}{2t} \quad (\text{A.9})$$

Donde:

σ_ϕ : esfuerzo longitudinal en la corona [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de corona [m]

$$\sigma_\phi = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{2(0.003)} = 21.09 \text{ [MPa]}$$

3.2. Cálculo de esfuerzos radiales y longitudinales en junta corona-nudillo

$$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t} \tag{A.10}$$

Donde:

σ_x : esfuerzo radial en la junta corona-nudillo [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de curvatura de la corona [m]

t : espesor de tapa toro esférica [m]

$$\sigma_x = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{2(0.003)} = 21.09 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_\phi = \frac{P_D L}{4t} \left(3 - \frac{L}{D/2} \right) \tag{A.11}$$

Donde:

σ_ϕ : esfuerzo longitudinal en la junta corona-nudillo [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de curvatura de coronilla [m]

D : diámetro interior del tanque [m]

t : espesor de la tapa toro esférica [m]

$$\sigma_\phi = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{4(0.003)} \left(3 - \frac{0.612}{0.55/2} \right) = 8.17 \text{ [MPa]}$$

3.3. Cálculos de esfuerzos radiales y longitudinales en el nudillo

$$\sigma_x = \frac{P_D L}{2t} \quad (\text{A.12})$$

Donde:

σ_x : esfuerzo radial en nudillo [Mpa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de la corona [m]

t : espesor de la tapa toro esférica [m]

$$\sigma_x = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{2(0.003)} = 21.09 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_\varphi = \frac{P_D L}{t} \left(1 - \frac{L}{2r_k}\right) \quad (\text{A.13})$$

Donde:

σ_φ : esfuerzo longitudinal en nudillo [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

L : radio de la corona [m]

t : espesor de la tapa toro esférica [m]

r_k : radio de nudillo [m]

$$\sigma_\varphi = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.612)}{(0.003)} \left(1 - \frac{(0.612)}{2(0.104)}\right) = -81.95 \text{ [MPa]}$$

3.4. Cálculo de esfuerzos radiales y longitudinales en las líneas tangentes

$$\sigma_x = \frac{P_D(D/2)}{2t} \quad (\text{A.14})$$

Donde:

σ_x : esfuerzo radial en las líneas tangente de la tapa toro esférica [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

D : diámetro interior del tanque [m]

t : espesor de la tapa toro esférica [m]

$$\sigma_x = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.55/2)}{2(0.003)} = 9.48 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_\varphi = \frac{P_D(D/2)}{t} \quad (\text{A.15})$$

Donde:

σ_φ : esfuerzo longitudinal en las líneas tangente de la tapa toro esférica [MPa]

P_D : presión de diseño [kPa]

D : diámetro interior del tanque [m]

t : espesor de la tapa toro esférica [m]

$$\sigma_\varphi = \frac{(206.84 \times 10^3)(0.55/2)}{(0.003)} = 18.96 \text{ [MPa]}$$

4. Selección de la sección crítica

La sección crítica de la tapa toro esférica es donde el esfuerzo longitudinal y el esfuerzo radial es el máximo

La sección crítica para el diseño de la tapa toro esférica es el nudillo

4.1. Cálculo de esfuerzo equivalente Von Misses

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (\text{A.16})$$

Donde:

σ' : esfuerzo equivalente Von Misses [MPa]

σ_x : esfuerzo crítico radial [MPa]

σ_y : esfuerzo longitudinal [MPa]

$$\sigma' = \sqrt{(21.09 \text{ [MPa]})^2 + (-81.95 \text{ [MPa]})^2 - (21.09 \text{ [MPa]})(-81.95 \text{ [MPa]})}$$

$$\sigma' = 94,3 \text{ [MPa]}$$

4.2. Cálculo de factor de seguridad

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (\text{A.17})$$

Donde:

η : factor de seguridad

S_y : esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [MPa]

σ' : esfuerzo equivalente Von Misses [MPa]

$$\eta = \frac{220[MPa]}{94[MPa]} = 2.3$$

Como el factor de seguridad es mayor a 1.0 entonces, el diseño si cumple con las condiciones de diseño propuestas al inicio.

5. Cálculo de mecanismo de apertura y cierre de tapa toro esférica

Se diseña el pasador del mecanismo de rotación de la tapa toro esférica, en la posición crítica de la tapa a 90° cuando la tapa está siendo soportada totalmente por el pasador.

Se conoce la masa de la tapa toro esférica de acero inoxidable SAE 304

$$m = 15[kg]$$

Ya que se conoce la masa de la tapa, se puede calcular el peso neto de dicha tapa.

$$W = mg$$

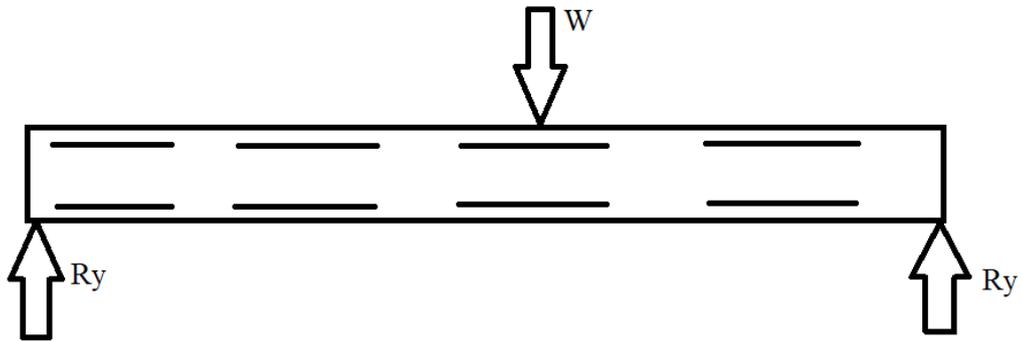
Donde:

W : peso en newton [N]

m : masa de la tapa toro esférica [kg]

g : aceleración de la gravedad (10[m/s²])

$$W = (15)(10) = 150[N]$$



$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ 2R_y - W &= 0 \\ R_y &= \frac{W}{2} \\ R_y &= \frac{mg}{2} \\ R_y &= \frac{150}{2} = 75[N] \end{aligned}$$

6. Cálculo de esfuerzo cortante en los pasadores

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{A.18})$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante en el pasador [N-m]

F : fuerza cortante en los extremos del pasador [N]

A : área de esfuerzo cortante en los pasadores [m²]

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{A.19})$$

Donde:

A : área de esfuerzo cortante en los pasadores [m²]

D : diámetro del pasador [m]

Reemplazando la ecuación 19 en la ecuación 18

$$\tau = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (\text{A.20})$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante [kPa]

F : fuerza cortante [N]

D : diámetro del pasador [m]

Luego se escoge un factor de seguridad, para que con ello se calcula un diámetro estimado

$$\eta_{est} = \frac{0.5S_y}{\tau}$$
$$\eta_{est} = \frac{0.5S_y}{\left(\frac{4F}{\pi D^2}\right)} \quad (\text{A.21})$$

De esta última ecuación, se despeja el diámetro estimado

$$D = \sqrt{\frac{\eta_{est}(4F)}{S_y(0.5)\pi}} \quad (\text{A.22})$$

Donde:

D : diámetro estimado del pasador [m]

S_y : esfuerzo de fluencia [MPa]

F : fuerza cortante [N]

η_{est} : factor de seguridad estático

7. Selección del perno para mecanismo de sujeción

Se seleccionó el material del perno acero inoxidable SAE 304 (A2) clase 50

$$S_y = 500[MPa]$$

$$D = \sqrt{\frac{(1.5)(4)(75)}{(500 \times 10^6)(0.5)\pi}} = 7.6 \times 10^{-4}[m]$$

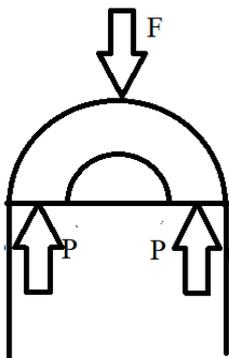
$$D = 0.76[mm]$$

$$D(\text{seleccionado}) = 10[mm]$$

Calculando el factor de seguridad de diseño estático con el diámetro seleccionado

$$\eta_{est} = \frac{(500 \times 10^6)\pi(10 \times 10^{-3})(0.5)}{4(75)} = 261.7$$

Diagrama de fuerzas axiales en los pasadores



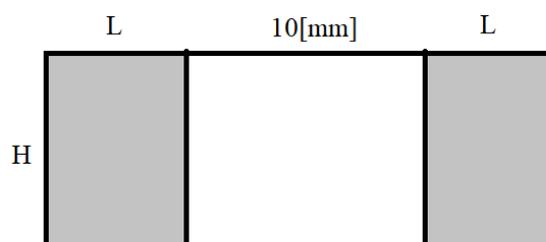
$$\sum F_y = 0$$

$$2P - F = 0$$

$$P = \frac{F}{2} ; F = R_y$$

$$P = \frac{R_y}{2} = \frac{75}{2} = 37.5[N]$$

Área de sección axial del pasador



$$A = L * H \quad (\text{A.23})$$

Donde:

A : área de sección axial [m²]

L : largo de sección axial [m]

H : ancho de sección axial [m]

8. Cálculo de esfuerzo axial (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{A.24})$$

Donde:

σ : esfuerzo axial en el pasador [kPa]

P : fuerza axial sobre el pasador [N]

A : área de sección axial del pasador [m²]

Se selecciona un factor de seguridad estático (η_{est})

$$\eta_{est} = 5$$

El factor de seguridad estático se define mediante la siguiente ecuación

$$\eta_{est} = \frac{S_y}{\sigma} \quad (\text{A.25})$$

Donde:

η_{est} : factor de seguridad estática para esfuerzo axial

S_y : esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [MPa]

σ : esfuerzo axial calculado [kPa]

Reemplazando la ecuación 21 y la ecuación 22 en la ecuación 23, se obtiene la siguiente relación

$$\eta_{est} = \frac{\frac{S_y}{P}}{\frac{L * H}{P}} = \frac{S_y(L * H)}{P}$$

Despejando el ancho de la sección axial

$$H = \frac{P}{L * S_y} \quad (\text{A.26})$$

Donde:

H : ancho de la sección axial [m]

P : fuerza axial en los pasadores [N]

L : largo de la sección axial [m]

S_y : esfuerzo de fluencia de acero inoxidable SAE 304 [MPa]

APÉNDICE B

Diseño del intercambiador de calor

En este apartado se pretende diseñar un intercambiador de calor con el objetivo de condensar la mezcla de vapor-aceite esencial proveniente del alambique. Para ello se propone un intercambiador de tipo serpentín, el cual centra su diseño en un serpentín helicoidal, comúnmente construido en cobre, el cual se encuentra entre dos tubos concéntricos que forman la coraza del intercambiador.

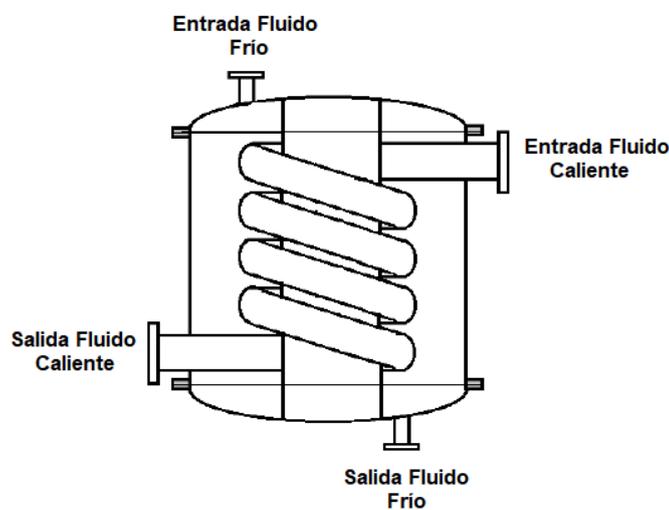


Figura B.1: Intercambiador de calor tipo serpentín
Adaptado: [A. Pérez, E.J. Pérez, A. Heredia & L. Pazos ,2018]

En el diseño de intercambiador el fluido caliente (vapor-aceite esencial) ingresa por el elemento en espiral, en donde por medio de convención entrega calor al fluido frío, que actúa como refrigerante. Este a su vez, entra por la periferia del intercambiador, es decir, la coraza del intercambiador.

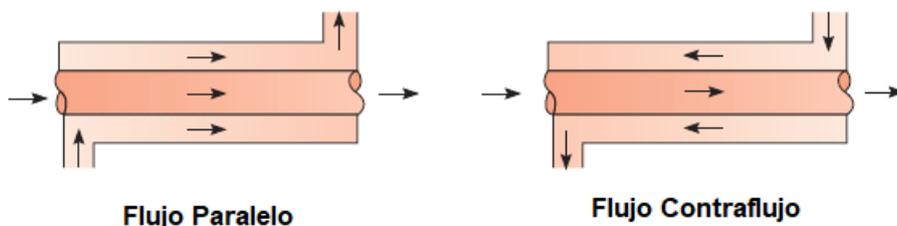


Figura B.2: Tipos de flujo
Adaptado: [Frank Incropera,2011]

En un flujo paralelo ambos fluidos inician en el mismo lado y recorren el intercambiador en la misma dirección, mientras que un flujo cruzados los fluidos inician en lados opuestos y recorren el intercambiador en direcciones opuestas, esto ayuda a que se incremente la transferencia de calor entre estos dos fluidos. Por ello para el diseño del intercambiador tipo serpentín se selección el arreglo flujo contraflujo, con el fin de optimizar al máximo la transferencia de calor.

Se propone condensar 20 kg/h de una mezcla de vapor-aceite esencial proveniente del alambique hasta una fase líquida cuya temperatura no supere los 50C, puesto que a dicha temperatura en la superficie del aceite esencial se desprenden gases que son inflamables, lo cual resulta peligroso y poco eficiente en el proceso de producción. (Montoya Gildardo,2010)

Para ello se define los siguientes datos geométricos del serpentín, dejando como variable la longitud del serpentín y la altura del condensador (tabla B.1). Cabe mencionar que se seleccionaron estas dimensiones puesto que la portabilidad del equipo forma parte de los requerimientos del cliente. Para ello se propone como material a emplearse en la coraza un acero inoxidable 304 y para el serpentín cobre pulido de $\frac{3}{4}$ ".

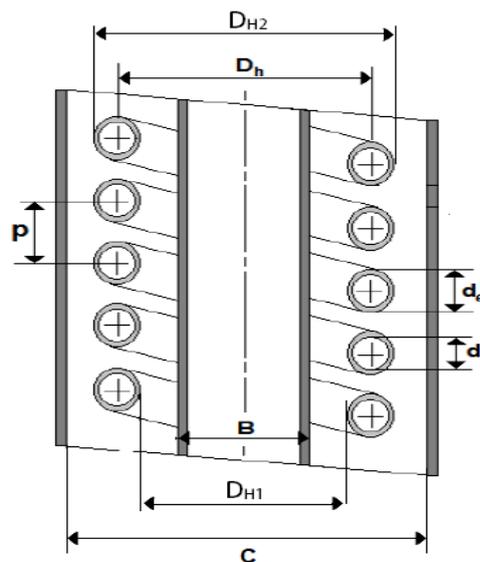


Figura B.3: Geometría del Intercambiador
Adaptado: [A. Pérez, E.J. Pérez, A. Heredia & L. Pazos ,2018]

Tabla B.1: Datos geométricos del Intercambiador
Fuente: [Elaboración propia]

Variable Geométrica	Valor nominal
Diámetro interior del cilindro exterior (C) [m]	0.4500
Diámetro exterior del cilindro interior (B) [m]	0.3500
Diámetro interior del tubo espiral (D) [m]	0.0206
Diámetro exterior del tubo espiral (d_o) [m]	0.0223
Paso (ρ) [m]	0.033
Diámetro promedio de espira (D_H) [m]	0.400
Diámetro interior de espira (D_{H1}) [m]	0.363
Diámetro exterior de espira (D_{H2}) [m]	0.407

Una vez establecido los parámetros geométricos, se procede a definir las condiciones de operación para ambos fluidos. Para ello se selecciona como fluido refrigerante agua, debido a su bajo costo y a la posibilidad de operar el equipo en lugares rurales sin necesidad de transportar un reservorio con al algún otro tipo de refrigerante, conectándolo únicamente a una toma de agua.

Se establecen las temperaturas de entrada y salida de los fluidos. Para ello se tiene en cuenta que en el alambique trabaja a una presión manométrica de 40 psi, teniendo como entrada de fluido caliente vapor de agua a 135 °C, el cual tendrá una temperatura de salida de 48 °C. Para el cálculo de las propiedades termodinámicas debido a que la concentración aceite esencial con respecto al vapor es poca, se toman en cuenta únicamente las propiedades del vapor en la mezcla.

Tabla B.2: Propiedades termodinámicas de los fluidos
Fuente: [Elaboración propia]

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS		
Propiedades Termodinámica	Fluido Caliente	Fluido Frío
Flujo másico (\dot{m}) [kg/h]	20	Por determinar
Temperatura de entrada (T_i) [°C]	135	22
Temperatura de salida (T_o) [°C]	48	32
Calor específico a presión constante (C_p) [kJ/kg-K]	4.209 (365 K)	4.179 (300 K)
Conductividad térmica (k_f) [W/m-K]	0.677	0.613
Viscosidad (μ) [kg/m-s]	306×10^{-6}	855×10^{-6}
Densidad (ρ) [kg/m ³]	964	997
Entalpía de fusión (h_{fg}) [kJ/kg]	2278	-

Una vez establecidos todos los parámetros geométricos y de operación procedemos se procede a realizar los respectivos cálculos para el diseño del intercambiador tipo serpentín.

Cálculos basados en: "FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR" Frank Incropera, 2011; "TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA" Yunus Cengel & Afshin Ghajar, 2011; "DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SERPENTÍN PARA EL ENFRIAMIENTO DE ACETONA" A. Pérez, E.J. Pérez, A. Heredia & L. Pazos, 2018.

1. Cálculo del flujo másico del fluido frío

1.1. Cálculo de carga térmica demandada por el fluido caliente

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \quad (\text{B.1})$$

Donde:

\dot{Q}_T : flujo de calor total disipada por el fluido caliente (vapor de agua) [W]

\dot{Q}_S : flujo de calor sensible disipada por el fluido caliente (vapor de agua) [W]

\dot{Q}_L : flujo de calor latente disipada por el fluido caliente (vapor de agua) [W]

1.1.1. Cálculo de flujo calor sensible disipada por el fluido caliente (vapor de agua)

En el proceso de transferencia de calor involucra dos calores sensibles; es decir, la pérdida de temperatura del vapor de 135° a 100° y la pérdida de temperatura del agua saturada de 100° a 48°.

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_h C_{ph} (\Delta T_h) \quad (\text{B.2})$$

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (\text{B.3})$$

Donde:

\dot{Q}_S : flujo de calor sensible disipada por el fluido caliente (vapor de agua) [W]

\dot{m}_h : flujo másico de agua [kg/h]

C_{ph} : capacidad calorífica de agua saturada a 365 K [kJ/kg-K]

$C_{p-vapor}$: capacidad calorífica del vapor de agua a 390 K [kJ/kg-K]

T_{hi} : temperatura de fluido caliente a la entrada [K]

T_{ho} : temperatura de fluido caliente a la salida [K]

Con ello procedemos a calcular los calores sensibles involucrados en la transferencia de calor

$$\dot{Q}_s = \left(20 \left[\frac{kg}{h} \right] * \frac{1[h]}{3600[s]} \right) \left(2.037 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * \frac{1000[J]}{1[kJ]} \right) (408 - 373)[K]$$

$$\dot{Q}_s = 396 [W]$$

$$\dot{Q}_s = \left(20 \left[\frac{kg}{h} \right] * \frac{1[h]}{3600[s]} \right) \left(4.192 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * \frac{1000[J]}{1[kJ]} \right) (373 - 321)[K]$$

$$\dot{Q}_s = 1,211.02[W]$$

1.1.2. Cálculo de flujo calor latente disipada por el fluido caliente (vapor de agua)

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_h h_{fg} \quad (B.4)$$

Donde:

Q_L : flujo de calor latente disipada por el flujo caliente [W]

\dot{m}_h : flujo másico de vapor de agua a 100°C [kg/h]

h_{fg} : entalpía de cambio de estado (líquido-vapor) a 100°C [kJ/kg]

$$\dot{Q}_L = \left(20 \left[\frac{kg}{h} \right] * \frac{1[h]}{3600[s]} \right) \left(2323 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * \frac{1000[J]}{1[kJ]} \right)$$

$$\dot{Q}_L = 12,905.55[W]$$

Por ende, la carga térmica disipada por el vapor de agua, hasta llegar a condensarse a 48°C sería:

$$Q_T = 396 [W] + 1,211.02[W] + 12,905.55[W] = 14,512.57[W]$$

Una vez calculador el calor total perdido por el fluido caliente se procede a calcular el flujo masico del fluido frio mediante un balance de energía.

$$\dot{Q}_{Th} = \dot{Q}_{Tc} \quad (B.5)$$

$$Q_{Tc} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ci} - T_{co}) \quad (B.6)$$

Donde:

\dot{Q}_{Th} : flujo de calor total disipada por el fluido caliente (vapor de agua) [W]

\dot{Q}_{Tc} : flujo de calor total disipada por el fluido frío (agua) [W]

\dot{m}_c : flujo másico de agua fría [kg/h]

C_{pc} : capacidad calorífica a presión constante de agua a 300 K [kJ/kg-K]

T_{ci} : temperatura de fluido frío a la entrada [K]

T_{co} : temperatura de fluido frío a la salida [K]

$$\dot{m}_c = \frac{14,512.57[W]}{\left(4.179 \left[\frac{kJ}{kg}\right] * \frac{1000[J]}{1[kJ]}\right) (305 - 295)[K]}$$

$$\dot{m}_c = 1250 \left[\frac{kg}{h}\right]$$

1.1.3. Cálculo de la temperatura media logarítmica para un intercambiador de calor en contraflujo.

La transferencia de calor a lo largo del intercambiador de calor varia conforme la ubicación, debido a que la diferencia de temperatura desde la entrada del intercambiador hasta la salida varia de forma no lineal, particularmente en un arreglo en contraflujo. Por ello se utiliza una temperatura media logarítmica.

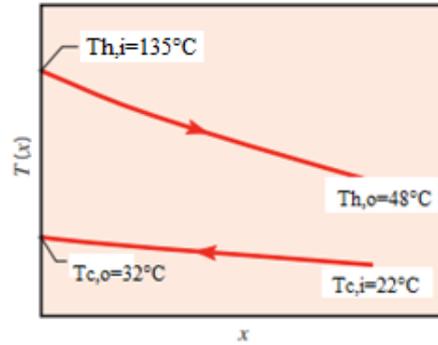


Figura B.4: Temperatura media logarítmica
Fuente: [Elaboración propia]

Para el uso de la temperatura media logarítmica se debe tener en cuenta que la temperatura de salida del fluido caliente no debe ser menor a la temperatura de entrada del fluido frío.

Restricción $T_{ho} > T_{co}$

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co} \quad (\text{B.7})$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci} \quad (\text{B.8})$$

Donde:

T_{hi} : temperatura de fluido caliente a la entrada [K]

T_{ho} : temperatura de fluido caliente a la salida [K]

T_{ci} : temperatura de fluido frío a la entrada [K]

T_{co} : temperatura de fluido frío a la salida [K]

Entonces, la diferencia logarítmica para intercambiador en contraflujo es:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (\text{B.9})$$

Donde:

ΔT_{lm} : diferencia de temperatura logarítmica entre temperaturas caliente y fría [K]

ΔT_2 : diferencia de temperatura [K]

ΔT_1 : diferencia de temperatura [K]

$$\Delta T_{lm} = \frac{(48 - 22) - (135 - 32)}{\ln\left(\frac{(48 - 22)}{(135 - 32)}\right)} = 55.93 \text{ K}$$

1.2. Cálculo de longitud de tubería

Se procede a calcular la longitud del serpentín, para ello se debe tener en cuenta el número de espiras.

$$L = N\sqrt{(2\pi r)^2 + \rho^2} \quad (\text{B.10})$$

Donde:

L : longitud de tubería Helicoidal [m]

N : número de espiras

r : radio promedio de la helicoidal [m]

ρ : paso de tubería helicoidal

$$\frac{L}{N} = \sqrt{\left(2\pi\left(\frac{D_H}{2}\right)\right)^2 + \rho^2} \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{L}{N} = \sqrt{\left(2\pi\left(\frac{0.400}{2}\right)\right)^2 + (0.033)^2} = 1.257$$

1.3. Cálculo de volumen ocupado por el flujo (V_c)

$$V_c = \left(\frac{\pi}{4}\right) d_0^2 L \quad (\text{B.12})$$

Donde:

V_c : volumen ocupado por el fluido [m³]

d_0 : diámetro exterior del tubo espiral [m]

L : longitud de tubería en intercambiador espiral [m]

$$\frac{V_c}{N} = \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.0223)^2 = 0.00048$$

1.4. Cálculo de volumen de la coraza (V_a)

$$V_a = \left(\frac{\pi}{4}\right) (C^2 - B^2) \rho N \quad (\text{B.13})$$

Donde:

V_a : volumen del ánulo [m³]

C : diámetro interno del cilindro exterior [m]

B : diámetro exterior del cilindro interno interno [m]

ρ : paso de tubería helicoidal

N : número de vueltas en condensador espiral

$$\frac{V_a}{N} = \left(\frac{\pi}{4}\right) ((0.450)^2 - (0.350)^2)(0.033) = 0.00209$$

1.5. Cálculo del volumen de fluido disponible en el ánulo

$$V_f = V_a - V_c \quad (\text{B.14})$$

Donde:

V_f : volumen de fluido disponible en el ánulo [m³]

V_a : volumen del ánulo [m³]

V_c : volumen ocupado por el flujo

$$\frac{V_f}{N} = \frac{V_a}{N} - \frac{V_c}{N} \quad (\text{B.15})$$

$$\frac{V_f}{N} = 0.00209 - 0.00048 = 0.0016$$

1.6. Cálculo de diámetro equivalente de la espiral

Debido a que el fluido de la coraza o anulo fluye por una sección que no es circular, se utiliza un diámetro equivalente con el fin de utilizar las ecuaciones de transferencia de calor para tuberías, simplificando los cálculos.

$$D_e = \frac{4V_f}{\pi d_0 L} \quad (\text{B.16})$$

Donde:

D_e : diámetro equivalente de la espiral [m]

V_f : volumen de fluido disponible en el ánulo [m³]

d_0 : diámetro exterior de la espiral [m]

L : longitud de tubería en intercambiador espiral [m]

$$D_e = \frac{4(0.0016)}{\pi(0.0223)(1.275)} = 0.0732[m]$$

1.7. Cálculo de la velocidad flujo másico del fluido frío

$$G_s = \frac{M}{\left(\frac{\pi}{4}\right) [(C^2 - B^2) - (D_{H2}^2 - D_{H1}^2)]} \quad (B.17)$$

Donde:

G_s : velocidad másica del fluido [kg/m²-s]

M : flujo másico [kg/s]

C : diámetro interior del cilindro externo [m]

B : diámetro externo del cilindro interno [m]

D_{H2} : diámetro externo del helicoidal [m]

D_{H1} : diámetro interno del helicoidal [m]

$$G_s = \frac{(0.367)}{\left(\frac{\pi}{4}\right) [((0.450)^2 - (0.350)^2) - ((0.422)^2 - (0.378)^2)]} = 10.43 \left[\frac{kg}{m^2s} \right]$$

1.8. Cálculo del número de Reynolds para fluido frío

$$Re = \frac{D_e G_s}{\mu_l} \quad (B.18)$$

Donde:

Re : número de reynold

D_e : diámetro equivalente de intercambiador espiral

G_s : velocidad másica de fluido [m/s]

μ_l : viscosidad absoluta del fluido frío [kg/m-s]

$$Re = \frac{(0.0732)(10.43)}{(0.00085)} = 900.10 \cong 900$$

1.9. Cálculo del número de Prandtl

$$Pr = \frac{c_{pc}\mu_c}{k_c} \quad (B.19)$$

Donde:

Pr : número de Prandtl

c_{pc} : capacidad calorífica del fluido frío [kJ/kg-K]

μ_c : viscosidad absoluta del fluido frío [kg/m-s]

k_c : conductividad térmica del fluido frío [W/m-K]

$$Pr = \frac{(4179)(0.00085)}{(0.613)} = 5.83$$

1.10. Cálculo de coeficiente de convección de exterior

$$h_o = \left(\frac{k}{D_e}\right) (0.6Re^{0.5}Pr^{0.31}) \quad (B.20)$$

Donde:

h_o : coeficiente de convección del fluido frío [W/m²-K]

k : conductividad térmica del fluido frío [W/m-K]

D_e : diámetro equivalente de la helicoidal [m]

Re : número de Reynold

Pr : número de Prandtl

$$h_o = \left(\frac{0.613}{0.0732}\right) (0.6 \times 900^{0.5} 5.83^{0.31}) = 260.24 \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

Una vez realizado el cálculo del coeficiente de convección del fluido exterior (Frío), se procede a calcular el coeficiente de convección del fluido interior (Caliente).

1.11. Cálculo de coeficiente de convección de interior, fluido caliente

$$h_i = 0.555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s)} \left(h_{fg} + \frac{3}{8} c_{pl} (T_{sat} - T_s) \right) \right]^{1/4} \quad (B,21)$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad ($g = 9.81[\text{m/s}^2]$)

ρ_l : densidad del líquido caliente [kg/m^3]

ρ_v : densidad del vapor [kg/m^3]

ρ_g : densidad del gas caliente [kg/m^3]

k_l : conductividad térmica del fluido caliente [W/m-K]

T_{sat} : temperatura de saturación del líquido caliente [K]

T_s : temperatura de la superficie del líquido frío [K]

h_{fg} : entalpía de líquido-gas para cambio de estado a 410 K [$\text{W/m}^2\text{-K}$]

c_{pl} : capacidad calorífica de fluido caliente a 410 [kJ/kg-K]

μ_l : Viscosidad del fluido caliente [kg/m-s]

$$h_i = 0.555 \left[\frac{(9.81)(945.17)(945.17 - 0,570)(0.677)^3}{(0.000237)(135 - 32)} \left((2153000) + \frac{3}{8} (4278)(135 - 32) \right) \right]^{1/4}$$

$$h_i = 2224 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

1.12. Cálculo de coeficiente de convección de interior corregido

$$h_{i,corregido} = h_i \left(1 + 3.5 \left(\frac{D}{D_H} \right) \right) \quad (B.22)$$

Donde:

$h_{i,corregido}$: coeficiente de convección de interior corregido [W/m²-K]

h_i : coeficiente de convección de interior [W/m²-K]

D : diámetro interno de tubería helicoidal [m]

D_H : promedio del diámetro de la espiral [m]

$$h_{i,corregido} = (2224) \left(1 + 3.5 \left(\frac{0.0206}{0.400} \right) \right) = 2624 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

1.13. Cálculo de coeficiente de convección en el diámetro exterior de la tubería helicoidal

$$h_{io} = h_{i,corregido} \left(\frac{D}{d_o} \right) \quad (B.23)$$

Donde:

h_{io} : coeficiente de convección en el diámetro exterior de la tubería helicoidal [W/m²-K]

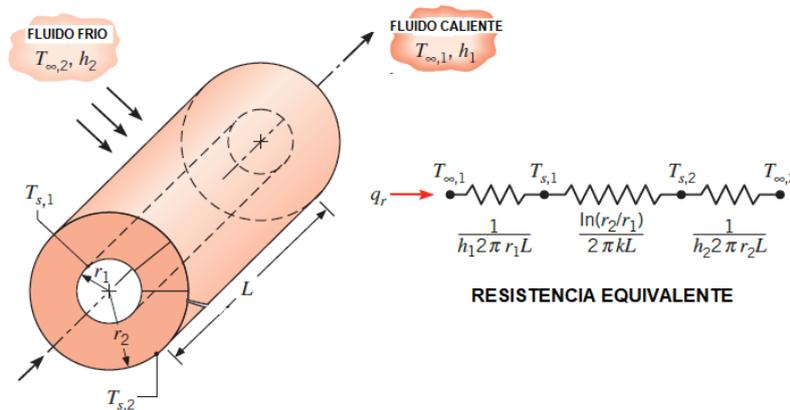
$h_{i,corregido}$: coeficiente de convección interna corregida [W/m²-K]

D : diámetro interno de tubería helicoidal [m]

d_o : diámetro externo de tubería helicoidal [m]

$$h_{io} = (2624) \left(\frac{0.0206}{0.0223} \right) = 2423 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

1.14. Cálculo de coeficiente global de transferencia de calor



$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{io}} + \frac{x}{k_c} + R_t + R_a \quad (B.24)$$

Donde:

U : coeficiente global de transferencia de calor [W/m²-K]

h_o : coeficiente de convección de exterior [W/m²-K]

h_{io} : coeficiente de convección en el diámetro exterior de tubería helicoidal [W/m²-K]

R_t : factor de fallas ($R_t = 0.0002$)

R_a : factor de fallas ($R_a = 0.0002$)

x : espesor de tubería helicoidal [m]

k_c : conductividad térmica del material de tubería helicoidal [W/m-K]

$$U = \left(\frac{1}{249.75} + \frac{1}{2423} + \frac{0.000813}{397.00} + (0.0002) + (0.0002) \right)^{-1} = 214.79 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

1.15. Cálculo de área del condensador requerida

$$A = \frac{Q_T}{U \Delta T_{ln}} \quad (\text{B.25})$$

Donde:

A : área del condensador requerida [m²]

Q_T : flujo de calor total disipado [W]

U : factor global de transferencia de calor [W/m²-K]

ΔT_{ln} : diferencia de temperaturas logarítmicas para intercambiador de calor por contraflujo [K]

$$A = \frac{14,512}{(214.79)(55.93)} = 1.28 [m^2]$$

1.16. Cálculo de número de espiras en el intercambiador de calor

$$N = \frac{A}{\pi d_o \left(\frac{L}{N} \right)} \quad (\text{B.26})$$

Donde:

N : número de espiras del intercambiador de calor

A : área del condensador requerida [m²]

d_o : diámetro externo de tubería helicoidal [m]

L/N : relación entre longitud de tubería helicoidal y número de espiras

$$N = \frac{(1.28)}{\pi(0.0223)(1.257)} = 15$$

1.17. Cálculo de altura del intercambiador

$$H = NP + d_0 \quad (\text{B.27})$$

Donde:

N : número de espiras del intercambiador de calor

P : paso de la helicoidal [m]

d_o : diámetro externo de tubería helicoidal [m]

$$H = (15)(0.033[m]) + 0.0223[m] = 0.52[m]$$

1.18. Tablas empleadas

Tabla B.19.1: Propiedades termodinámicas de Agua saturada
Adaptado: [Frank Incropera,2011]

TABLE A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water

Temperature, T (K)	Pressure, p (bars) ^b	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, h_{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)	
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	664	22.6
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1

Tabla B.19.2: Propiedades termodinámicas del Cobre
Adaptado: [Frank Incropera,2011]

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids

Composition	Melting Point (K)	Properties at Various Temperatures (K)													
		Properties at 300 K				k (W/m · K)/ c_p (J/kg · K)									
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Copper Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339			
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	252	356	397	417	433	451	480			
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17		42	52	59						
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149						
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19	237	362						
Germanium	1211	5360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4			
						190	290	337	348	357	375	395			

Tabla B.19.3: Diámetros estándar tubería de cobre
Adaptado: [Nacobre.com.mx,2020]

Tubería de cobre de temple rígido Tipo "M"								
Medida Nominal	Diámetro Exterior	Diámetro Interior	Espesor de Pared	Peso	Peso por tramo	Presión Máxima	Presión Constante	Flujo
Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Lb/pie	libras	PSI	PSI	G. P. M.
milímetros	milímetros	milímetros	milímetros	kg/m	kilogramos	kg/cm ²	kg/cm ²	L. P. M.
1/4"	0.375"	0.325"	0.025"	0.107	2.132	6,133	1,226	
6.35 mm	9.525	8.255	0.635	0.159	0.968	431.15	86.18	
3/8"	0.500"	0.450"	0.025"	0.145	2.903	4,500	900	2.247
9.50 mm	12.700	11.430	0.635	0.216	1.318	316.35	63.27	8.507
1/2"	0.625"	0.569"	0.028"	0.204	4.083	4,032	806	4.064
12.7 mm	15.875	14.453	0.711	0.304	1.854	283.45	56.66	15.382
3/4"	0.875"	0.811"	0.032"	0.328	6.566	3,291	658	10.656
19 mm	22.225	20.599	0.812	0.488	2.981	231.35	46.25	40.333
1"	1.125"	1.055"	0.035"	0.465	9.310	2,800	560	21.970
25 mm	28.575	26.767	0.889	0.693	4.227	196.84	39.36	83.180
1 1/4"	1.375"	1.291"	0.042"	0.683	13.656	2,749	550	39.255
32 mm	34.925	32.791	1.067	1.016	6.200	193.25	38.66	148.580
1 1/2"	1.625"	1.527"	0.049"	0.941	18.821	2,713	542	62.335
38 mm	41.275	38.785	1.245	1.400	8.545	190.72	38.10	235.940
2"	2.125"	2.009"	0.058"	1.461	29.233	2,470	491	131.000
51 mm	53.975	51.029	1.473	2.176	13.272	173.65	34.51	495.860
2 1/2"	2.625"	2.495"	0.065"	2.032	40.647	2,228	445	231.461
64 mm	66.675	63.373	1.651	3.025	18.454	156.62	31.28	876.010
3"	3.125"	2.981"	0.072"	2.683	53.663	2,073	414	375.189
76 mm	79.375	75.718	1.889	3.994	24.363	145.73	29.10	1,420.09
4"	4.125"	3.935"	0.095"	4.665	93.310	2,072	414	799.395
102 mm	104.775	99.949	2.413	6.945	42.363	145.65	29.10	3,025.71

APÉNDICE C

Selección de equipos

1. CALDERA

Previo a realizar la selección de la caldera adecuada para el funcionamiento del sistema de hidrodestilación por arrastre de vapor es necesario definir los diferentes parámetros de diseño.

- ❖ Tiempo de operación t_{op}

$$t_{op} = 1 [h]$$

- ❖ Flujo másico de operación \dot{m}

$$\dot{m} = 20 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

- ❖ Densidad del agua ρ

$$\rho = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

- ❖ Presión atmosférica P_{atm}

$$P_{atm} = 1 [atm] = 14.7 [psi]$$

- ❖ Temperatura ambiente promedio T_{in}

$$T_{in} = 26^{\circ}C = 299 K$$

- ❖ Calor específico del agua C_p

$$C_p = 4.22 \left[\frac{KJ}{Kg * K} \right]$$

- ❖ Presión de trabajo P_{trab}

$$P_{trab} = 40 psi$$

Una vez definida los parámetros de diseño, se procede a realizar los cálculos.

1.1. Calor Sensible:

$$Q_s = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (C.1)$$

Además, se sabe que P_{abs} es la presión total; es decir, la suma entre la presión de trabajo y la presión atmosférica.

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{trab} \quad (C.2)$$

$$P_{abs} = 14.7 + 40 \text{ [psi]}$$

$$P_{abs} = 54.7 \text{ [psi]} \approx 55 \text{ [psi]}$$

Una vez hallada la presión absoluta al interior del caldero, se revisa en las tablas de propiedades de los materiales la temperatura de saturación T_{sat} a una presión 55 [psi].

TABLE A-5E												
Saturated water—Pressure table												
Press., P psia	Sat. temp., T_{sat} °F	Specific volume, ft ³ /lbm		Internal energy, Btu/lbm			Enthalpy, Btu/lbm			Entropy, Btu/lbm·R		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
1	101.69	0.01614	333.49	69.72	973.99	1043.7	69.72	1035.7	1105.4	0.13262	1.84495	1.9776
2	126.02	0.01623	173.71	94.02	957.45	1051.5	94.02	1021.7	1115.8	0.17499	1.74444	1.9194
3	141.41	0.01630	118.70	109.39	946.90	1056.3	109.40	1012.8	1122.2	0.20090	1.68489	1.8858
4	152.91	0.01636	90.629	120.89	938.97	1059.9	120.90	1006.0	1126.9	0.21985	1.64225	1.8621
5	162.18	0.01641	73.525	130.17	932.53	1062.7	130.18	1000.5	1130.7	0.23488	1.60894	1.8438
6	170.00	0.01645	61.982	138.00	927.08	1065.1	138.02	995.88	1133.9	0.24739	1.58155	1.8289
8	182.81	0.01652	47.347	150.83	918.08	1068.9	150.86	988.15	1139.0	0.26757	1.53800	1.8056
10	193.16	0.01659	38.425	161.22	910.75	1072.0	161.25	981.82	1143.1	0.28362	1.50391	1.7875
14.696	211.95	0.01671	26.805	180.12	897.27	1077.4	180.16	970.12	1150.3	0.31215	1.44441	1.7566
15	212.99	0.01672	26.297	181.16	896.52	1077.7	181.21	969.47	1150.7	0.31370	1.44441	1.7549
20	227.92	0.01683	20.093	196.21	885.63	1081.8	196.27	959.93	1156.2	0.33582	1.39606	1.7319
25	240.03	0.01692	16.307	208.45	876.67	1085.1	208.52	952.03	1160.6	0.35347	1.36060	1.7141
30	250.30	0.01700	13.749	218.84	868.98	1087.8	218.93	945.21	1164.1	0.36821	1.33132	1.6995
35	259.25	0.01708	11.901	227.92	862.19	1090.1	228.03	939.16	1167.2	0.38093	1.30632	1.6872
40	267.22	0.01715	10.501	236.02	856.09	1092.1	236.14	933.69	1169.8	0.39213	1.28448	1.6766
45	274.41	0.01721	9.4028	243.34	850.52	1093.9	243.49	928.68	1172.2	0.40216	1.26506	1.6672
50	280.99	0.01727	8.5175	250.05	845.39	1095.4	250.21	924.03	1174.2	0.41125	1.24756	1.6588
55	287.05	0.01732	7.7882	256.25	840.61	1096.9	256.42	919.70	1176.1	0.41958	1.23162	1.6512
60	292.69	0.01738	7.1766	262.01	836.13	1098.1	262.20	915.61	1177.8	0.42728	1.21697	1.6442
65	297.95	0.01743	6.6560	267.41	831.90	1099.3	267.62	911.75	1179.4	0.43443	1.20341	1.6378

Como se puede observar en la figura C.1, la temperatura de saturación T_{sat} corresponde a 287.05°F (142°C o 415K), por lo que ΔT corresponde a la diferencia entre T_{sat} y T_{in} dando un valor de 116K.

Entonces,

$$Q_s = 20 \left[\frac{kg}{h} \right] \times 4.22 \left[\frac{KJ}{Kg * K} \right] \times 116[K]$$

$$Q_s = 9790.4 \left[\frac{KJ}{h} \right]$$

1.2. Calor Latente

$$Q_L = \dot{m} \times h_{fg} \tag{C.3}$$

Para hallar el valor de entalpía de evaporación h_{fg} , es necesario realizar una interpolación debido a que en las tablas de propiedades no existe el valor de 142°C sino de 140°C y 145° sus respectivas entalpías.

TABLE A-4												
Saturated water—Temperature table												
Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, $kJ/kg \cdot K$		
		Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827

$$\frac{145 - 140}{2129.3 - 2144.3} = \frac{145 - 142}{2129.3 - h_{fg}}$$

$$h_{fg} = 2138.3 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

Entonces,

$$Q_L = 20 \left[\frac{Kg}{h} \right] \times 2138.3 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$Q_L = 42766 \left[\frac{KJ}{h} \right]$$

1.3. Calor Total

$$Q_T = Q_s + Q_L \quad (C.4)$$

$$Q_T = 9790.4 + 42766$$

$$Q_T = 52556.4 \left[\frac{KJ}{h} \right]$$

Adicional, se debe añadir entre el 10% al 20% adicional al calor total Q_T calculado debido al factor de seguridad recomendado en el documento de Paredes y Quinatoa. Para este caso en particular, se selecciona el caso más crítico, es decir, el 20% como factor de seguridad.

$$Q_T = 1.2 \times Q_T$$

$$Q_T = 1.2 \times 52556.4$$

$$Q_T = 63067.7 \left[\frac{KJ}{h} \right]$$

Al valor de Q_T hallado, es necesario llevarlo a Boiler Horse Power [BHP] que es la unidad de energía referencial para calderas o fuentes de calor.

La tasa de conversión es la siguiente:

$$1 \left[\frac{KJ}{h} \right] = 0.947817 \left[\frac{BTU}{h} \right]$$

$$33475 \left[\frac{BTU}{h} \right] = 1 [BHP]$$

$$Q_T = 63067.7 \left[\frac{KJ}{h} \right] \times \frac{0.947817 \left[\frac{BTU}{h} \right]}{1 \left[\frac{KJ}{h} \right]} \times \frac{1 [BHP]}{33475 \left[\frac{BTU}{h} \right]}$$

$$Q_T = 1.78571 [BHP]$$

1.4. Volumen de Agua Requerida

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{C.5}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{20 [Kg]}{1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]} = 0.02 [m^3] = 20 [l] = 4.2 [gal]$$

1.5. Torre de Enfriamiento

Puesto que, para la selección de una torre de enfriamiento, es necesario conocer tanto el espacio disponible para operar como la capacidad calorífica de dispersión. Una torre de enfriamiento es un equipo termomecánico utilizado en la industria en general para disminuir las temperaturas de los fluidos que intervienen dentro de los diferentes procesos a los cuales son sometidos. Su naturaleza consiste en extraer el calor del fluido mediante un ventilador mecánico mientras el fluido cae por gravedad hacia un reservorio para almacenarlo y posteriormente ser bombeado.

La ecuación utilizada para calcular la cantidad de calor a extraer del fluido de refrigeración es la ecuación de calor utilizada para calcular el calor sensible para la selección del caldero.

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \tag{C.6}$$

$$Q = \left(1250 \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3600 s}\right) \cdot \left(4.179 \frac{KJ}{Kg * K} \times \frac{1000 J}{1 KJ}\right) \cdot (10 K)$$

$$Q = 14.51 KW$$

Adicional, se toma un factor de seguridad que oscila entre el 10% y 20%; para este caso en particular, se asumirá el caso más crítico que corresponde al 20%, obteniendo así:

$$Q = 1.2Q$$

$$Q = 1.2 \times 14.51$$

$$Q = 17.41 KW$$

APÉNDICE D

Alambique

Tabla D.1: Resultados Simulación Alambique
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

Name	Unit	Value	Progress	Criteria	Delta	Use in convergence
SG Av Static Pressure 1	Pa	275884.94	100	4241.32791	3.56836033	On
SG Mass Flow Rate 1	kg/s	0.0056	100	5.55555556e-006	0	On
SG Av Static Pressure 2	Pa	275790.00	100	112.627683	1.16415322e-010	On
SG Av Temperature (Fluid) 2	K	293.80	100	3.44597214	0.301438781	On
SG Mass Flow Rate 2	kg/s	-0.0056	100	0.000163734763	2.98794815e-008	On

Tabla D.2: Condiciones Mínimas/Máximas Alambique
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

Name	Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	1.33	2.04
Pressure [Pa]	275790.00	275932.36
Temperature [K]	293.18	450.02
Temperature (Fluid) [K]	293.18	450.02
Velocity [m/s]	0	12.168
Velocity (X) [m/s]	-5.880	5.820
Velocity (Y) [m/s]	-2.471	12.166
Velocity (Z) [m/s]	-8.858	5.784

Mach Number	0	0.02
Vorticity [1/s]	4.45e-003	864.77
Vorticity (X) [1/s]	-812.53	790.97
Vorticity (Y) [1/s]	-117.17	131.95
Vorticity (Z) [1/s]	-784.77	795.13
Relative Pressure [Pa]	174465.00	174607.36
Shear Stress [Pa]	0	0.80
Bottleneck Number []	2.2479644e-024	1.0000000
Heat Transfer Coefficient [W/m^2/K]	0	0
ShortCut Number []	1.3184439e-022	1.0000000
Surface Heat Flux [W/m^2]	0	0
Surface Heat Flux (Convective) [W/m^2]	-9696376.357	1.307e+007
Turbulence Length [m]	2.284e-005	0.018
Turbulent Time [s]	0.004	108.879
Acoustic Power [W/m^3]	1.347e-044	1.222e-009
Acoustic Power Level [dB]	0	30.87

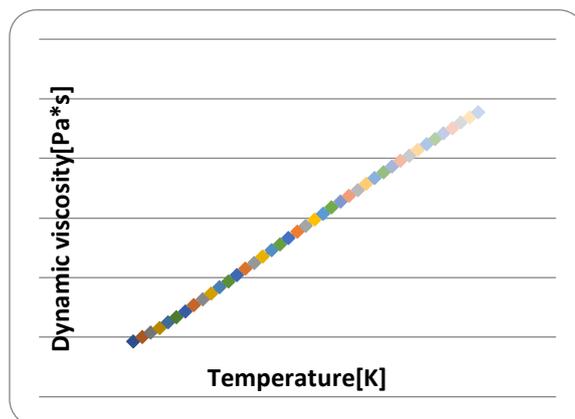


Figura D.1: Viscosidad Dinámica
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

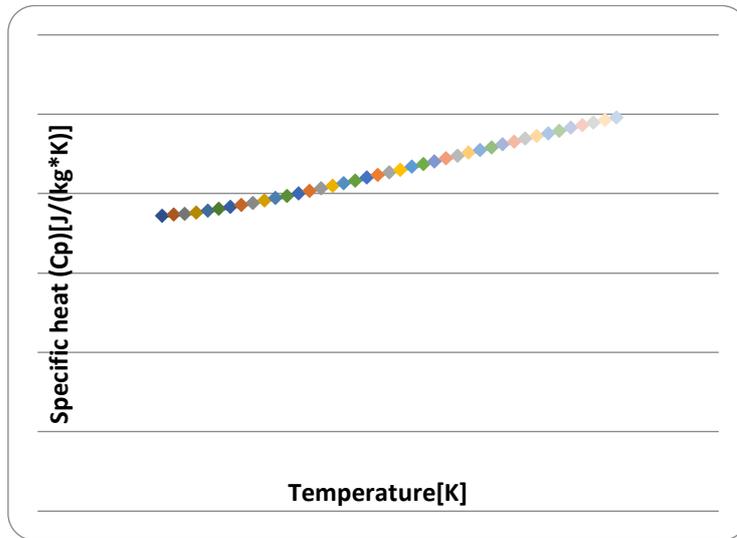


Figura D.2: Calor Especifico
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

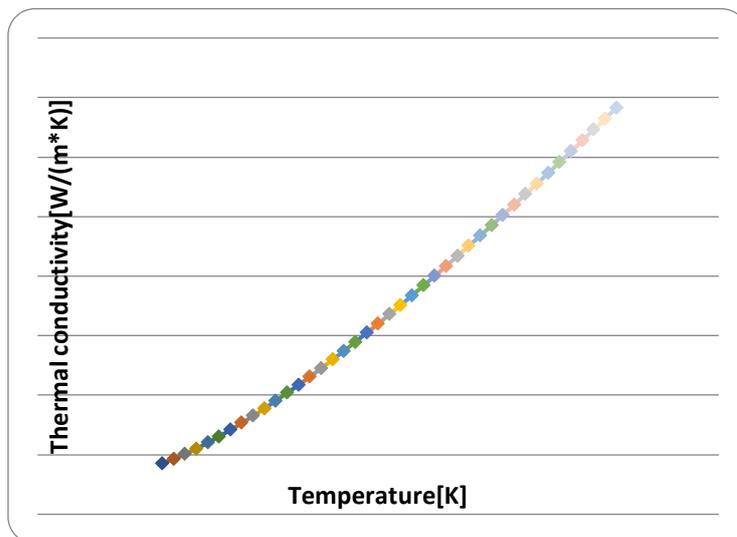


Figura D.3: Conductividad Térmica
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

APÉNDICE E

Condensador

Tabla E.1: Resultados Simulación Condensador
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

Name	Unit	Value	Progress	Criteria	Delta	Use in convergence
SG Min Temperature (Fluid) 1	°C	38.63	100	0.0486041911	0.485986069	On
SG Av Temperature (Fluid) 1	°C	38.78	98	0.043910428	0.482950051	On
SG Max Temperature (Fluid) 1	°C	39.90	95	0.042161744	0.472608601	On
SG Min Temperature (Fluid) 2	°C	44.96	96	0.0966249412	0.356238319	On
SG Av Temperature (Fluid) 2	°C	45.97	99	0.104476441	0.295847714	On
SG Max Temperature (Fluid) 2	°C	46.99	96	0.111681723	0.335423502	On

Tabla E.2: Condiciones Mínimas/Máximas Condensador
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

Name	Minimum	Maximum
Density (Fluid) [kg/m ³]	1.46	996.35
Density (Solid) [kg/m ³]	8000.00	8960.00
Mass Fraction of H2O []	1.0000	1.0000
Mass Fraction of Water []	1.0000	1.0000
Pressure [Pa]	101124.39	275803.74
Temperature [°C]	25.68	135.00
Temperature (Fluid) [°C]	25.68	135.00

Temperature (Solid) [°C]	25.80	64.77
Velocity [m/s]	0	15.662
Velocity (X) [m/s]	-15.322	12.592
Velocity (Y) [m/s]	-12.956	14.782
Velocity (Z) [m/s]	-13.428	2.541
Volume Fraction of H2O []	1.0000	1.0000
Volume Fraction of Water []	1.0000	1.0000
Mach Number []	0	0.03
Vorticity [1/s]	2.65e-003	1614.98
Vorticity (X) [1/s]	-1074.58	1588.55
Vorticity (Y) [1/s]	-1129.70	1040.72
Vorticity (Z) [1/s]	-903.68	1109.09
Relative Pressure [Pa]	-200.61	174478.74
Shear Stress [Pa]	0	7.73
Bottleneck Number []	1.9185887e-013	1.0000000
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	2.544e-006	1605.622
Overheat above Melting Temperature [K]	-1058.013	-1018.285
ShortCut Number []	7.1050932e-013	1.0000000
Surface Heat Flux [W/m ²]	-37469.385	56432.100
Surface Heat Flux (Conductive) [W/m ²]	-37469.385	37469.385
Surface Heat Flux (Convective) [W/m ²]	-1.458e+009	1.020e+009
Turbulence Length [m]	1.666e-005	0.005
Turbulent Time [s]	0.002	1429.182
Acoustic Power [W/m ³]	3.642e-054	1.247e-009
Acoustic Power Level [dB]	0	30.96

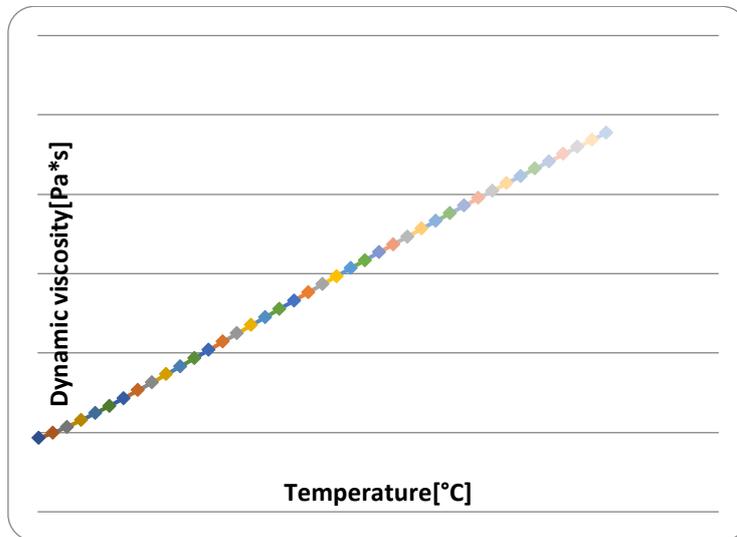


Figura E.1: Viscosidad Dinámica
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

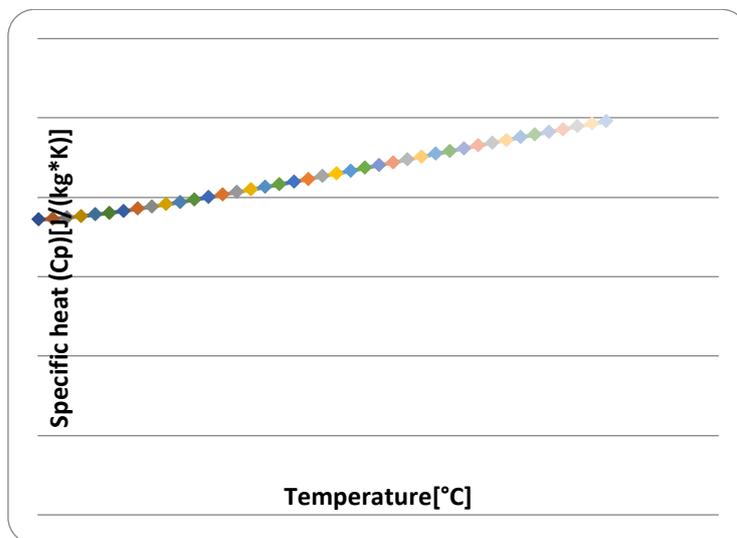


Figura E.2: Calor Especifico
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

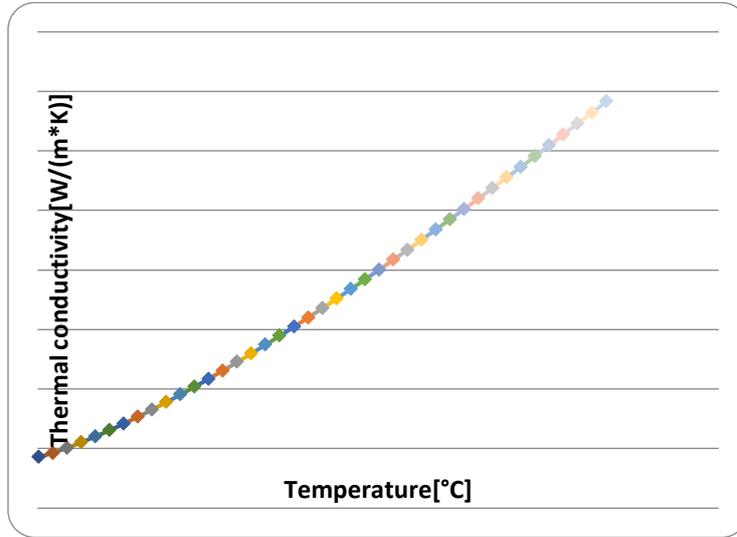
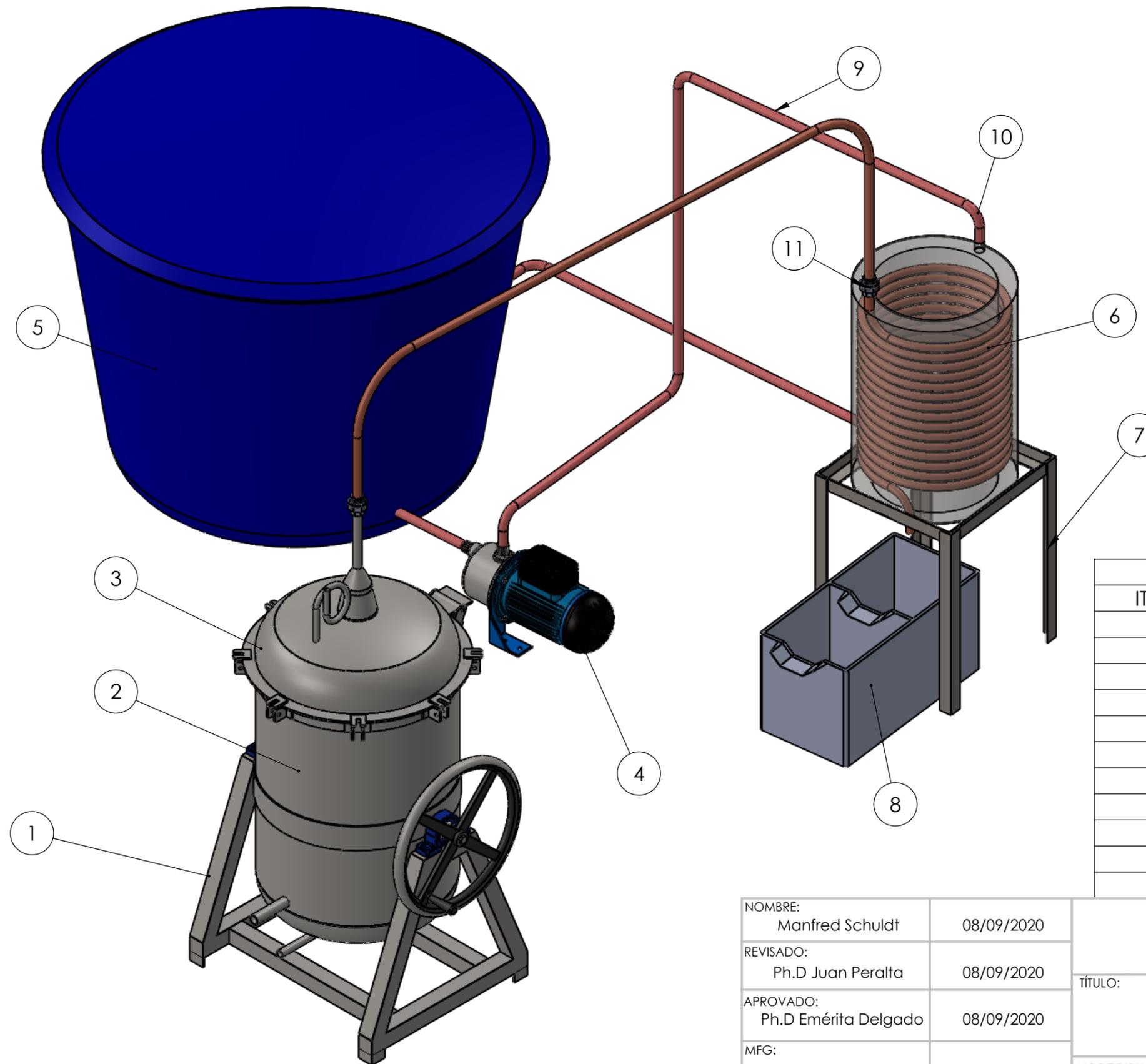


Figura E.3: Conductividad Térmica
Fuente: [Elaboración propia, Solidworks]

APÉNDICE F

Planos

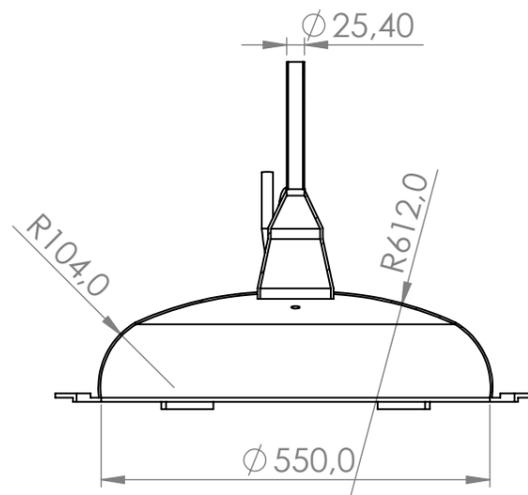
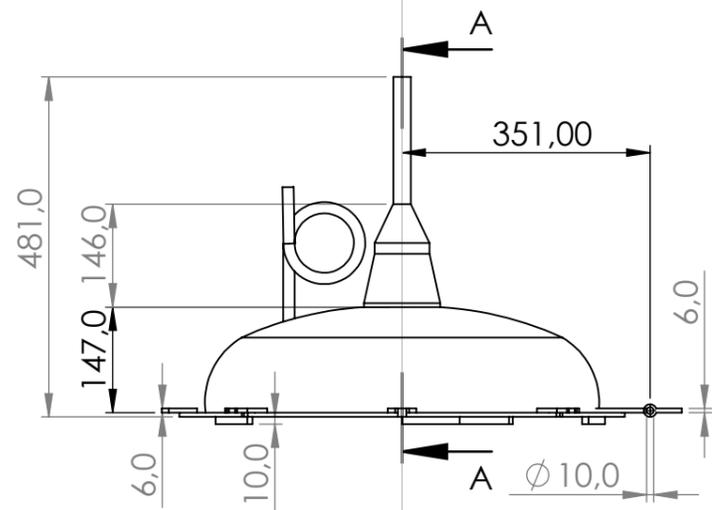
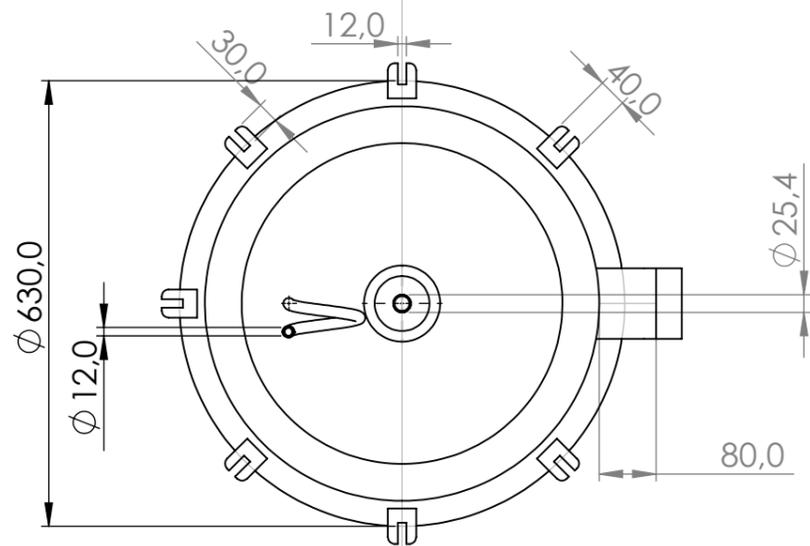


Lista de Partes

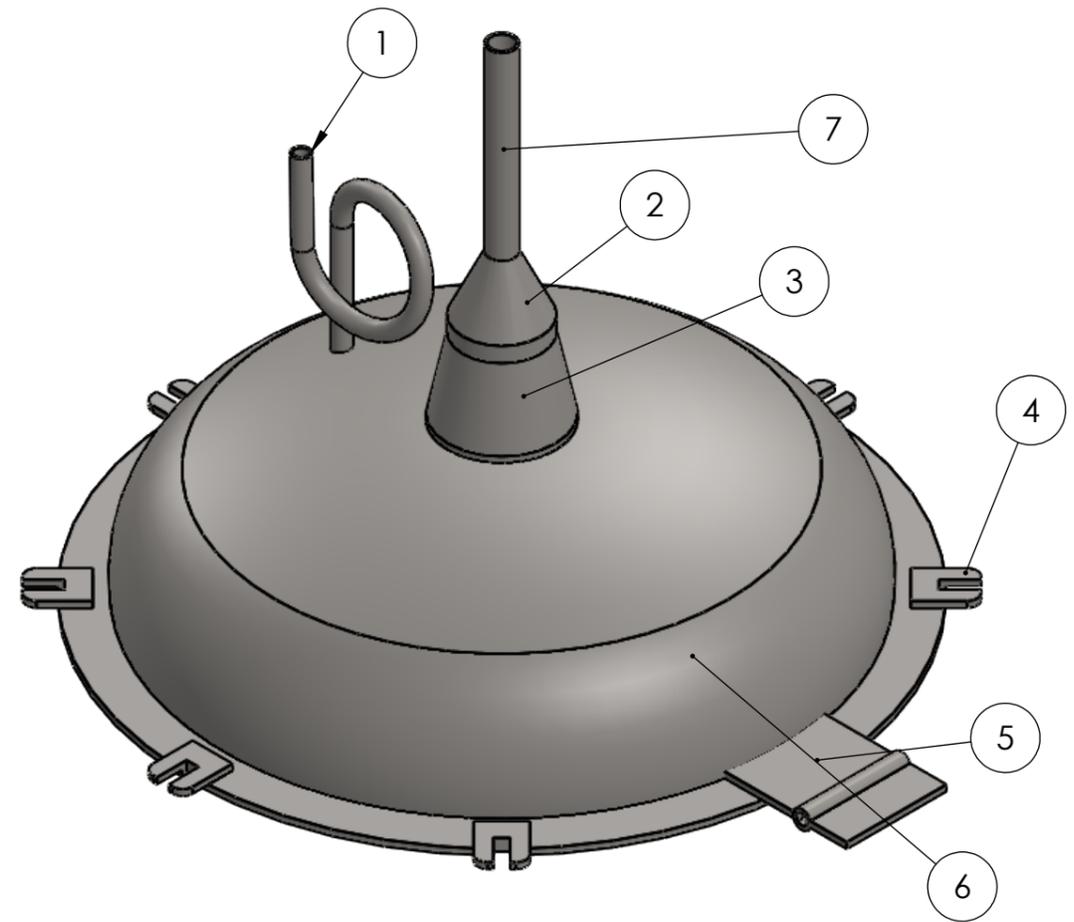
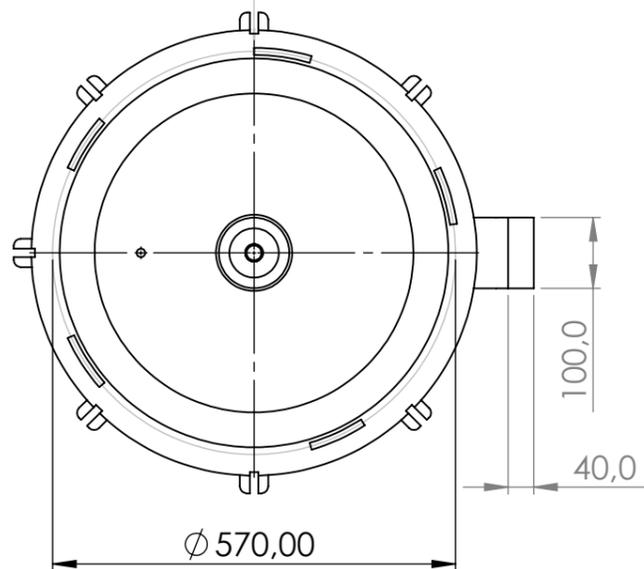
ITEM	DESCRIPCION
1	Soporte Almabique
2	Alambique
3	Tapa Alambique
4	Motor 1/2 Hp
5	Tanque Agua 1000 L
6	Intercambiador de Calor
7	Soporte Intercambiador
8	Florentino
9	Tuberia 1"
10	Codo 1" 90 grados
11	Union 1" Macho/Hembra

NOMBRE: Manfred Schuldt	08/09/2020
REVISADO: Ph.D Juan Peralta	08/09/2020
APROVADO: Ph.D Emérita Delgado	08/09/2020
MFG:	
Masa: indefinido	

ESPOL	
TÍTULO: Extractor de Aceite Esencial	
N.º DE DIBUJO	FORMATO: A3
Ensamble EAE	
ESCALA:1:12	HOJA 1 DE 6



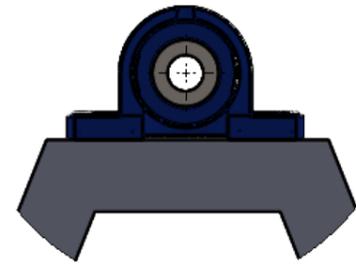
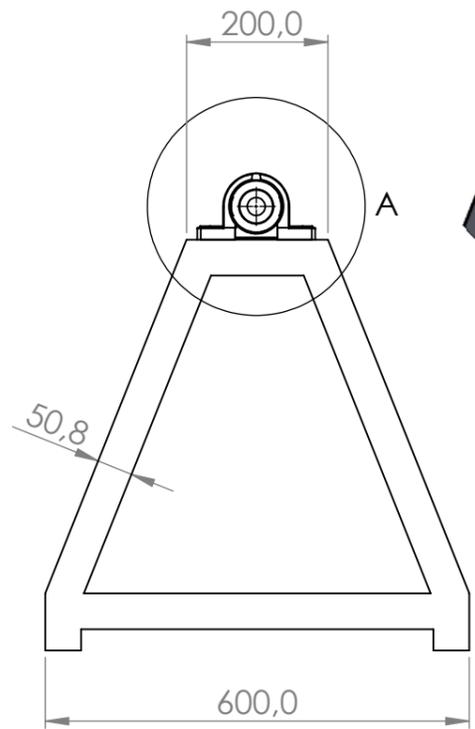
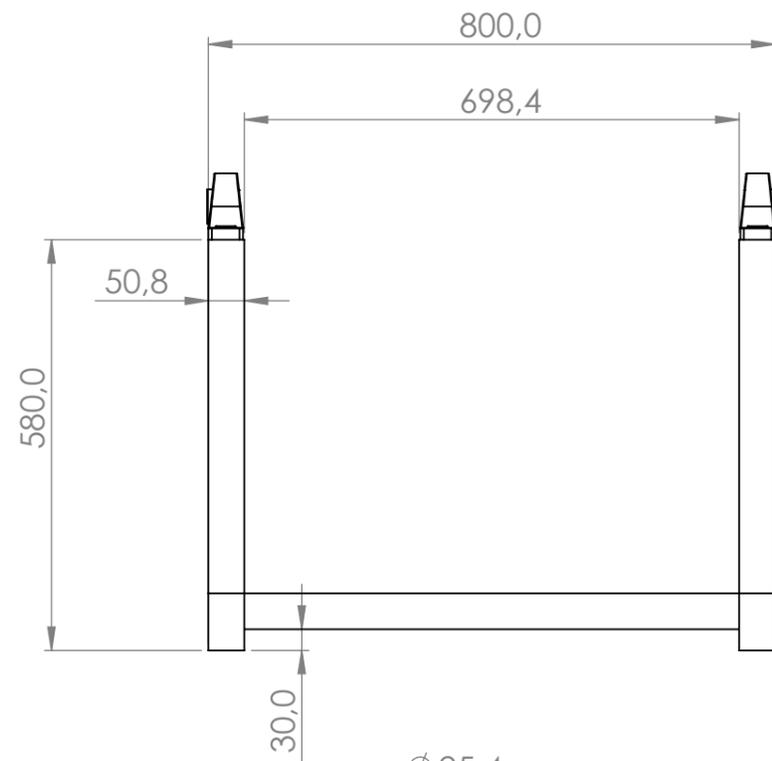
SECCIÓN A-A



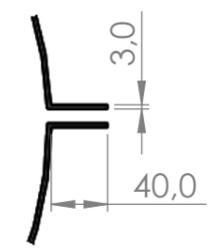
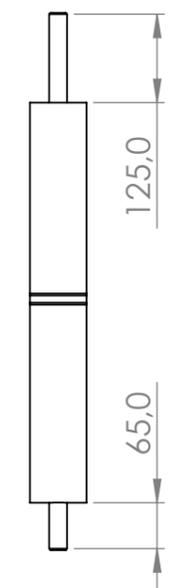
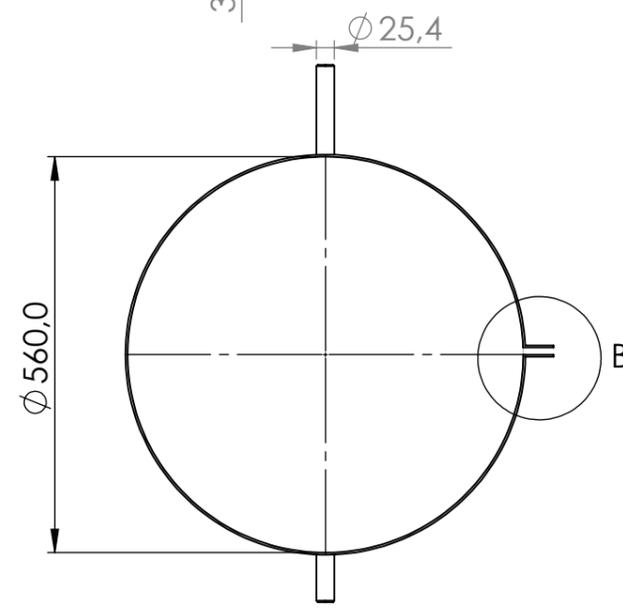
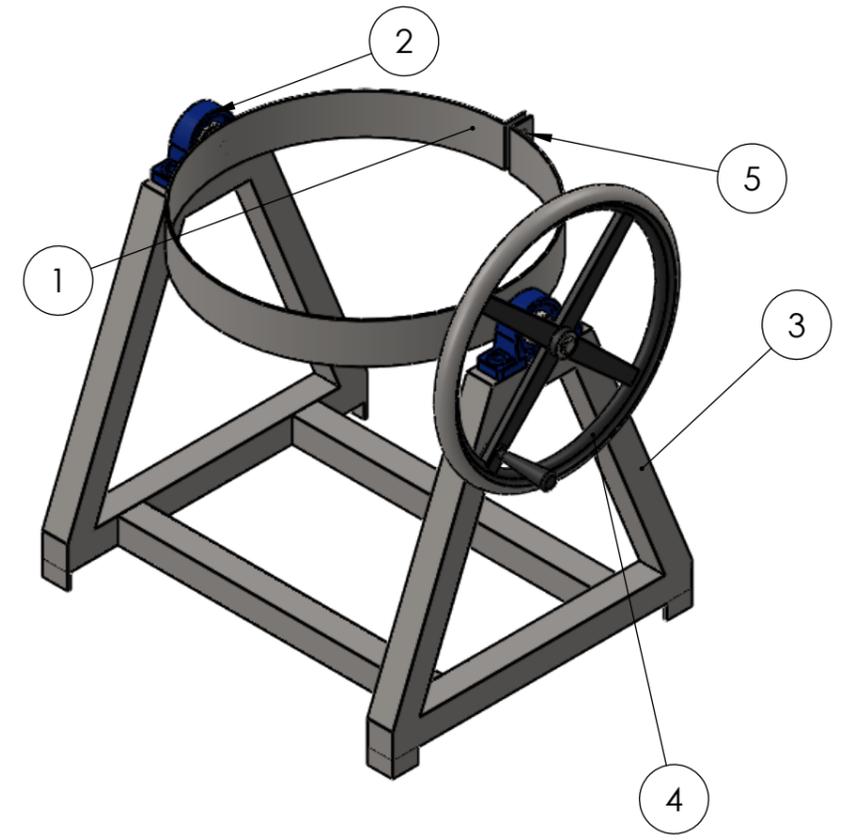
Lista de Partes			
ITEM	QTY	DESCRIPCION	MATERIAL
1	1	Condensador de Vapor	Acero Inox 304
2	1	Reductor 6" a 3"	Acero Inox 304
3	1	Reductor 3" a 1"	Acero Inox 304
4	7	Placa hembra para perno	Acero Inox 304
5	1	Bisagra	Acero Inox 304
6	1	Coraza	Acero Inox 304
7	1	Tubo 1"	Acero Inox 304

NOMBRE: Manfred Schuldt	8/09/2020
REVISADO: Ph.D Juan Peralta	08/09/2020
APROVADO: Ph.D Emérita Delgado	08/09/2020
MFG:	
MASA: 14.92 Kg	

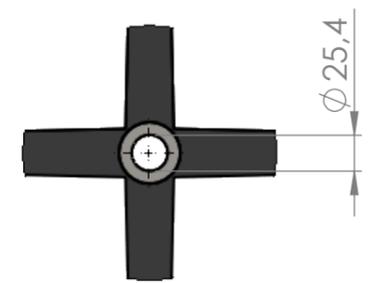
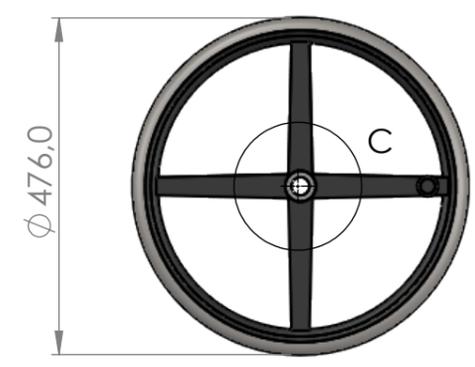
ESPOL	
TÍTULO: Extractor de Aceite Esencial	
N.º DE DIBUJO Tapa Alambique	FORMATO: A3
ESCALA: 1:10	HOJA 2 DE 6



DETALLE A
ESCALA 1 : 5



DETALLE B
ESCALA 1 : 5



DETALLE C
ESCALA 1 : 5

LISTA DE PARTES			
ITEM	QTY	DESCRIPCION	MATERIAL
1	1	Abrazadera	Acero Inox 304
2	1	Chumacera 1"	Acero/Hierro
3	1	Estructura	Acero Inox 304
4	1	Volante	Hierro
5	2	Perno M10	Acero Inox 304

NOMBRE: Manfred Schuldt	08/09/2020
REVISADO: Ph.D Juan Peralta	08/09/2020
APROVADO: Ph.D Emérita Delgado	08/09/2020
MFG:	

Masa: 30.7 Kg

ESPOL

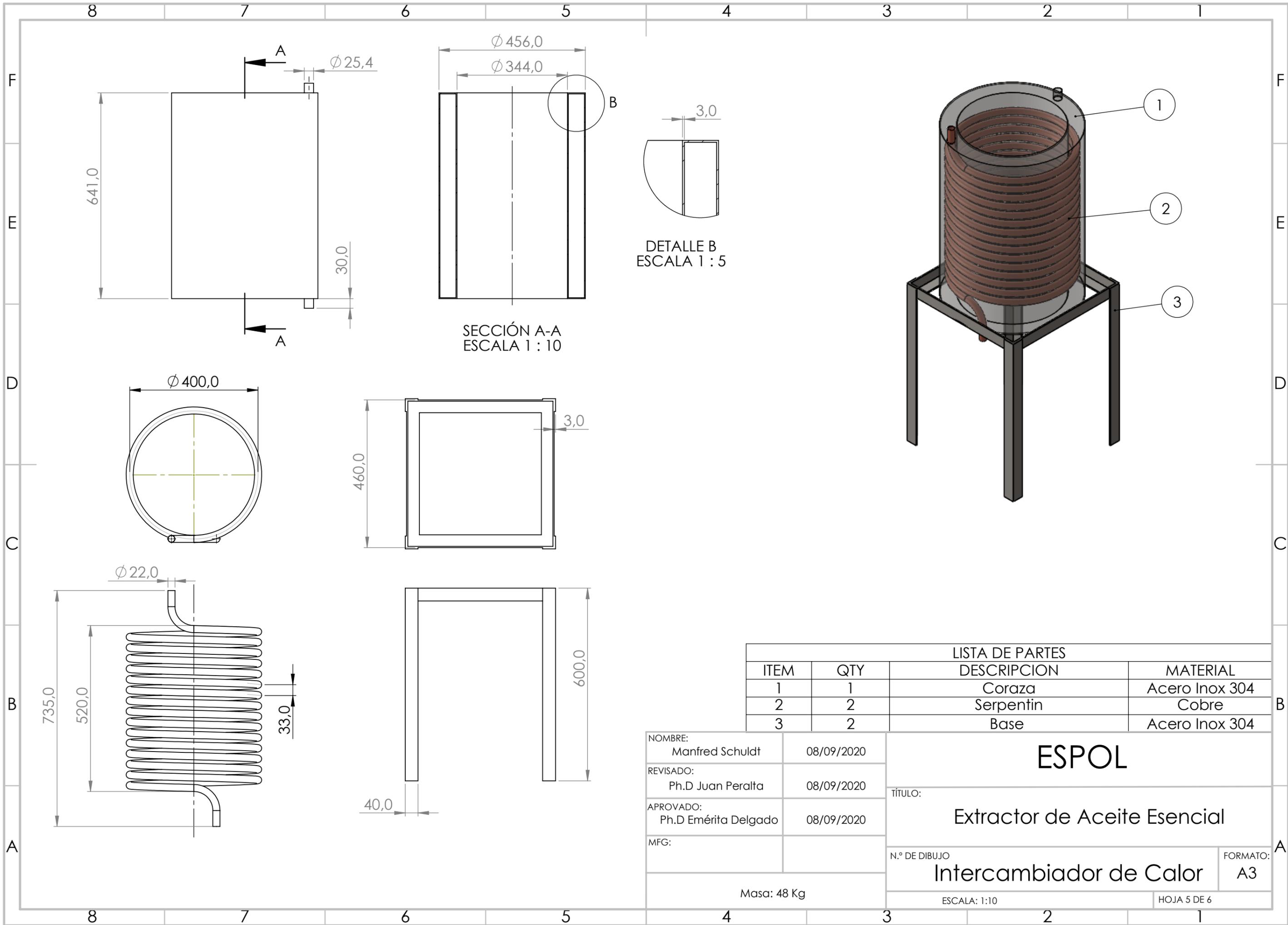
TÍTULO:
Extractor de Aceite Esencial

N.º DE DIBUJO
Base Alambique

FORMATO:
A3

ESCALA: 1:10

HOJA 4 DE 6



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10

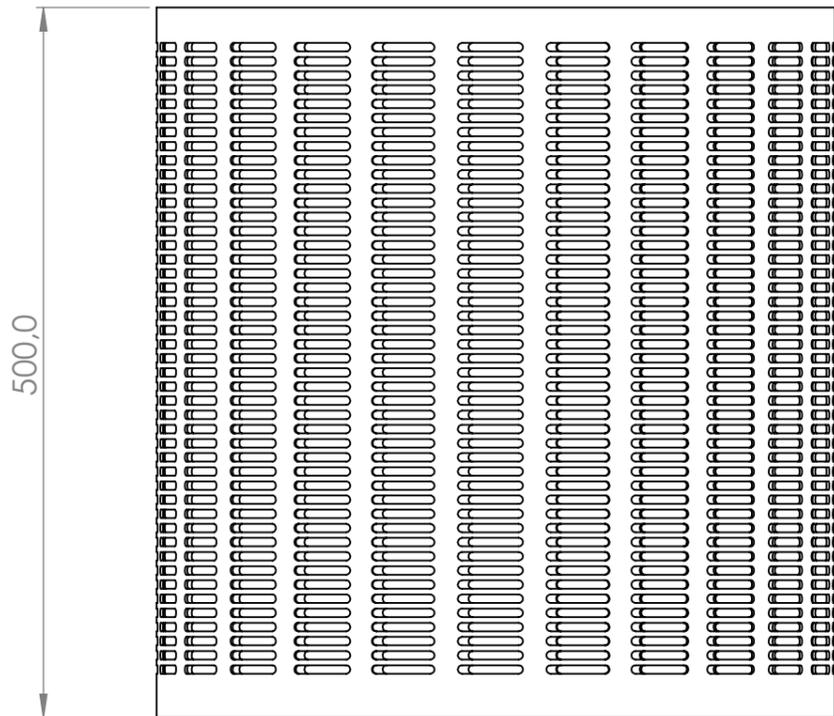
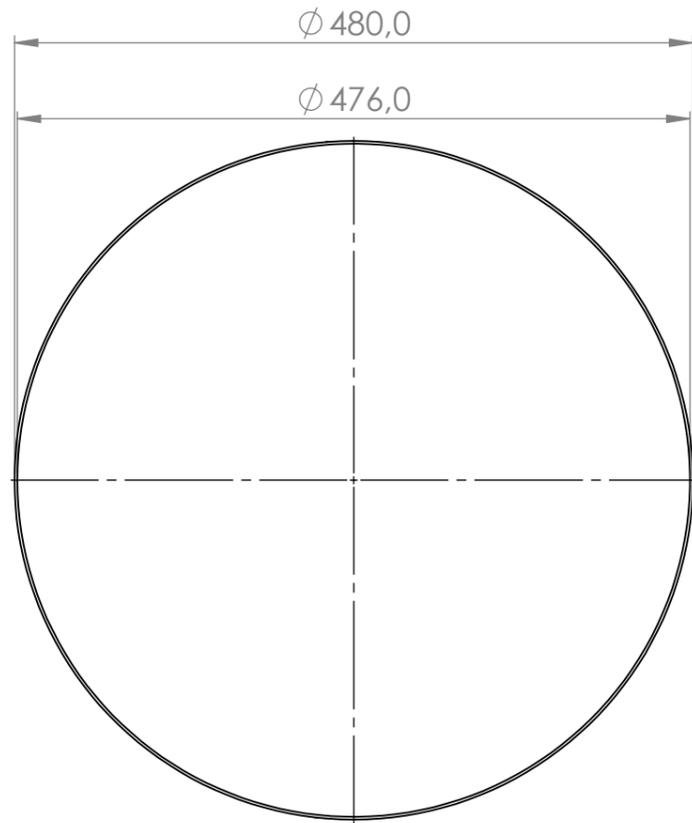
DETALLE B
ESCALA 1 : 5

LISTA DE PARTES

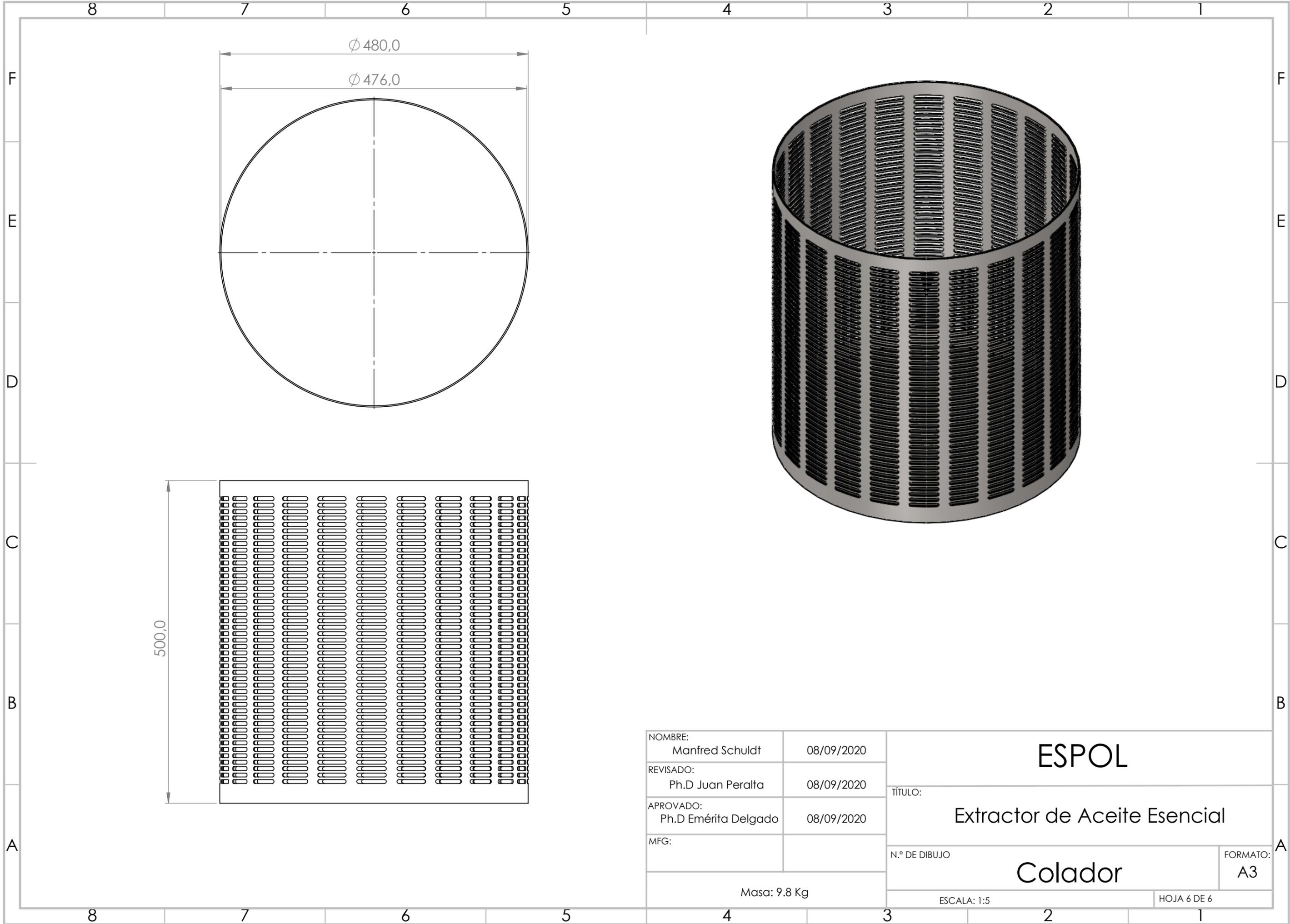
ITEM	QTY	DESCRIPCION	MATERIAL
1	1	Coraza	Acero Inox 304
2	2	Serpentin	Cobre
3	2	Base	Acero Inox 304

NOMBRE: Manfred Schuldt	08/09/2020
REVISADO: Ph.D Juan Peralta	08/09/2020
APROVADO: Ph.D Emérita Delgado	08/09/2020
MFG:	

ESPOL	
TÍTULO: Extractor de Aceite Esencial	
N.º DE DIBUJO Intercambiador de Calor	FORMATO: A3
Masa: 48 Kg	ESCALA: 1:10 HOJA 5 DE 6



NOMBRE: Manfred Schuldt	08/09/2020	ESPOL	
REVISADO: Ph.D Juan Peralta	08/09/2020		
APROVADO: Ph.D Emérita Delgado	08/09/2020	TÍTULO: Extractor de Aceite Esencial	
MFG:		N.º DE DIBUJO	FORMATO: A3
Masa: 9.8 Kg		ESCALA: 1:5	HOJA 6 DE 6



APÉNDICE G

VAN y TIR

En el presente apéndice se pretende mostrar un análisis del VAN y TIR aplicado al proyecto. Para ello se realizó una comparación de mercado con los competidores más relevantes, con el objetivo de definir un precio competitivo para el mercado. A continuación, en la tabla G1 se presentan los precios de los competidores y en la tabla G2 se presenta el precio elegido para el aceite esencial de eucalipto propio.

Tabla G.1: Precio de los Competidores
Fuente: [Elaboración propia]

PRECIOS DE ACEITES ESENCIALES	
ISABRÚ BOTANK	AMBATO
\$5,82	Precio
10	mL
AROMALAB	QUITO
\$12,00	Precio
10	mL
YOUNGLIVING	GUAYAQUIL
\$22,04	Precio
5	mL

Tabla G.2: Precio del producto
Fuente: [Elaboración propia]

PRODUCTO AC. EUCALIPTO		
Precio	\$7,00	
Capacidad	10	mL

Como se estableció previamente en el capítulo 2, el cliente requiere una extracción de 200 ml por operación, se plantea un escenario en donde el cliente pueda operar la maquina dos veces al día, aunque se podría operar tres veces al día sin ningún problema.

Tabla G.3: Producción de Aceite esencial
Fuente: [Elaboración propia]

	Cantidad		Unidades	Densidad [kg/m ³]	Peso [kg]
PROD. DÍA	400	mL	40	908	3,6
PROD. MES	8000	mL	800	908	144

Una vez establecido el precio del producto su producción, calcula los ingresos teniendo en cuenta que en un mes se producen 800 unidades de 10 ml, el cual se vende a 7\$ el frasco. La inversión inicial es de \$2900, lo cual cubre los gastos del equipo y dos meses de arriendo, la inversión se la tomara en cuenta únicamente en el primer mes.

En el apartado de compras se tomó en cuenta el valor del envase, es decir el packaging por unidad de \$1. De igual manera el transporte se definió de un precio referencial de \$2,50 los 25 kg. Adjuntados a esto, también se definió los costos fijos, tomando en cuenta los servicios básicos para la producción de Aceite esencial. Los costos variables representan el pago de los salarios de los operarios, estableciendo un valor de \$550 mensuales por operario.

Con este diagrama de flujo de caja diseñado para el proyecto, se calculó la tasa interna de retorno (TIR) como el porcentaje de ganancia en un año y cuyo valor reflejado corresponde al 15%. De igual manera el valor actual neto (VAN) se calculó como una proyección de todos los saldos acumulados durante los meses. Dando como resultado el retorno de la inversión en un periodo de 6 meses.

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
INGRESOS		\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00
Ventas		\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00	\$ 5.600,00
Cantidad		800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Precio		\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00	\$ 7,00
Aporte Cap.			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EGRESOS		\$ 4.981,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00	\$ 5.071,00
Compras		\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00
Cantidad		800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Precio		\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00	\$ 1,00
Materia Prima		\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00
Transporte		\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00	\$ 360,00
Costos Fijos		\$ 2.621,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00	\$ 2.711,00
Arriendo		\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00	\$ 300,00
Luz		\$ 45,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00	\$ 90,00
Internet		\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00	\$ 31,00
Teléfono		\$ 20,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00	\$ 60,00
Agua		\$ 25,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00	\$ 30,00
Salarios		\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00	\$ 550,00
Personal		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
INVERSION	-2900												
FLUJO DEL MES	-2900	\$ 619,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00	\$ 529,00
FLUJO ACUM.	-2900	\$ 619,00	\$ 1.148,00	\$ 1.677,00	\$ 2.206,00	\$ 2.735,00	\$ 3.264,00	\$ 3.793,00	\$ 4.322,00	\$ 4.851,00	\$ 5.380,00	\$ 5.909,00	\$ 6.438,00
TIR		15%											
VAN		\$17.135,42		%TASA	10%	MENSUAL							