

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
QUÍMICA INDUSTRIAL



**“OBTENCIÓN DE ACEITE ESENCIAL E HIDROLATO DE HIERBABUENA  
(*MENTHA SPICATA*) MEDIANTE EL PROCESO DE DESTILACIÓN POR  
ARRASTRE CON VAPOR”**

**TRABAJO DE APLICACIÓN DE EXAMEN DE GRADO**

PARA OBTENER EL TÍTULO ACADÉMICO DE LICENCIATURA  
EN QUÍMICA INDUSTRIAL

POSTULANTE: BRYANT FABIAN ANTEZANA RUIZ

LA PAZ - BOLIVIA

2017

## ***DEDICATORIA***

*Este trabajo se lo dedico a toda mi familia.*

*En especial a mi madre María y tía Rosa que me brindaron su apoyo incondicional en todo este camino.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Mi infinito agradecimiento a la Facultad de Tecnología de la Universidad Mayor de San Andrés, que me dio la oportunidad de cumplir mis metas y objetivos para realizarme como profesional y de manera especial a la Carrera de Química Industrial.*

*A los catedráticos por sus sabias enseñanzas que me impartieron durante las clases y fuera de ellas, a todos ellos muchas gracias.*

*A todos mis amigos y compañeros que me brindaron su apoyo y amistad, en los momentos en los cuales mas necesitaba.*

*Y mi agradecimiento es especial, a todas esas personas que me colaboraron en la realización de este trabajo.*

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.2.1. Identificación del problema .....	3
1.2.2. Formulación del problema .....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general. ....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1. Aceites esenciales .....	7
2.1.1. Clasificación de los aceites esenciales .....	8
2.1.2. Características físicas .....	9
2.1.3. Características químicas.....	9
2.1.4. Rendimiento de un aceite esencial .....	11
2.2. Definición y características de hidrolato .....	11
2.3. Descripción de la especie hierbabuena .....	12
2.3.1. Características.....	12
2.3.2. Composición del aceite esencial de hierbabuena .....	13
2.3.3. Hidrolato de la hierbabuena.....	14
2.4. Destilación por arrastre con vapor.....	15
2.4.1. Fundamento físico: Ley de Dalton .....	16
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	
3.1. Metodología empleada .....	19

3.2. Prueba a nivel laboratorio.....	19
3.2.1. Materiales y equipos.....	19
3.2.2. Procedimiento.....	19
3.3. Prueba a escala piloto.....	21
3.3.1. Materiales y equipos.....	21
3.3.2. Procedimiento.....	21
<b>CAPÍTULO 4: CÁLCULOS Y RESULTADOS</b>	
4.1. Resultados a nivel laboratorio.....	24
4.1.1. Cálculo del rendimiento.....	24
4.1.2. Propiedades organolépticas.....	25
4.2. Resultados a escala piloto.....	25
4.2.1. Materia prima.....	25
4.2.2. Descripción de los equipos utilizados.....	26
4.2.3. Cálculo de las densidades de aceite esencial e hidrolato.....	32
4.2.4. Balance de materia.....	33
4.2.5. Balance de energía.....	39
4.2.6. Cálculo del rendimiento.....	42
4.2.7. Propiedades organolépticas.....	42
4.2.8. Diagrama de flujo con Balance de Materia.....	43
4.2.9. Diagrama de flujo con Balance de Materia y Energía.....	44
4.2.10. Diagrama de equipos con Balance de Materia y Energía.....	45
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1. Conclusiones.....	47
5.2. Recomendaciones.....	48
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</b>

## RESUMEN

El presente trabajo se basa en la obtención de aceite esencial e hidrolato a partir de la planta de hierbabuena (*Mentha spicata*), a escala laboratorio y escala piloto, mediante el proceso de destilación por arrastre con vapor. En la realización de la prueba a escala piloto, se usó el equipo de extracción de aceites esenciales, instalado en la Carrera de Química Industrial. Se determinó las densidades y las propiedades organolépticas (como ser color, olor y aspecto), del aceite esencial e hidrolato obtenido. Posterior a la prueba a escala piloto, se elaboró un balance de materia con flujos másicos, en los equipos utilizados como ser: caldera, extractor, condensador y separador de fases, obteniendo así, un diagrama de flujo general del proceso. Se efectuó también un balance de energía, determinando el calor suministrado por la caldera, y el calor perdido del condensador, mediante un análisis por Termodinámica. Por último, se hizo el cálculo del rendimiento del aceite esencial obtenido en los procesos.



**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Stashenko (2009), indica que entre muchos metabolitos secundarios aislados de las plantas, se destacan algunos, muy especiales, de amplio uso en diversas ramas de la industria, medicina y en muchos productos empleados en la vida cotidiana. Esta clase de sustancias recibe el nombre de aceite esencial, aceite volátil, aceite etéreo o esencia. Numerosas sustancias forman parte de la esencia, que es una mezcla compleja de compuestos volátiles y de naturaleza química muy diversa. Lo que más la caracteriza y destaca es su olor, generalmente agradable, intenso, que evoca la fragancia de la planta, o de la fruta o de la madera, de la cual proviene. La esencia puede recordar el olor, por ejemplo, de una hierba recién cortada, o de vainilla, dulce y empalagosa, entre otros acordes aromáticos que posee un aceite esencial, formado por una compleja gama de sustancias volátiles con diferentes notas fragantes y distintos umbrales sensoriales para su percepción.

Ortuño (2006), señala que los aceites esenciales no son compuestos puros sino mezclas de multitud de sustancias (es fácil que un aceite esencial sea una mezcla de más de 100 sustancias químicas distintas) que se encuentran en distintas proporciones y que en conjunto proporcionan al aceite esencial sus características propias. Conviene indicar que los productos que detectamos con nuestro sentido del olfato forman parte de la esencia de la planta que se trate. Entre los componentes de los aceites esenciales, una familia de hidrocarburos, los terpenos son a menudo mayoritarios, llegando a alcanzar elevadas concentraciones del 75% al 90% del peso total en aceites esenciales como los de los cítricos (limón, naranja, lima, mandarina, bergamota y pomelo).

Peredo (2009), indica que diversas investigaciones demuestran que la composición de los aceites esenciales y extractos puede variar de acuerdo al método de extracción utilizado. Aunque estas variaciones pueden no ser importantes, son detectables por técnicas sensibles como la cromatografía de gases. Las variaciones radican en diferencias en la proporción de los compuestos e incluso en diferencias en el número de compuestos. Los aceites esenciales



son sustancias aromáticas encontradas prácticamente en todas las plantas; son muy numerosos y están ampliamente distribuidos en las distintas partes de la planta: raíces, tallos, hojas, flores y frutos. Los aceites esenciales son componentes heterogéneos; separables por métodos químicos o físicos, como la destilación, la refrigeración, la centrifugación, entre otros.

García (2014), señala que puesto que el material vegetal es el producto de un proceso predominantemente biológico, existen factores que influyen en la producción y calidad de la esencia como por ejemplo la selección y mejora genética, las condiciones ambientales y la intervención del hombre. Se registran grandes diferencias en el contenido y la composición del aceite esencial de las hojas jóvenes, maduras y flores. Por lo general, hay un significativo aumento en la producción de aceite esencial durante el desarrollo vegetativo, las hojas jóvenes muestran un mayor contenido de aceite esencial, en comparación con las hojas viejas. El mayor rendimiento de aceite se alcanza en la fase generativa entre la formación de yemas y la floración completa, o hasta la producción de frutos o semillas, por esta razón la mayoría de los aceites son producidos a partir de plantas en floración. La formación de aceite esencial en las plantas es altamente dependiente de las condiciones climáticas, especialmente de la temperatura, el suministro de agua y la longitud del día.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Identificación del problema**

Debido a que Bolivia es uno de los países más ricos del mundo en diversidad biológica, y en la variedad de ecosistemas y regiones ecológicas, en suelo boliviano se pueden producir una gran cantidad de plantas, entre las cuales se encuentra la hierbabuena (*mentha spicata*).

A pesar de todas las ventajas que brindan estos recursos vegetales, estos no son totalmente aprovechados en el desarrollo de actividades que promuevan un desarrollo económico sustentable, debido a que no se han planteado proyectos productivos rentables.

Uno de los procesos que se puede dar como alternativa, es la extracción de aceites esenciales, el cual es un proceso que aprovecha las propiedades de la planta para obtener un producto el cual es muy bien valorado en el mercado local e internacional.

Para realizar el proceso de extracción de aceites esenciales se toma en cuenta los rendimientos de las plantas para la extracción.

Muchas industrias se ven obligadas a importar estos productos, debido a que en Bolivia no se producen este tipo de aceites. Un ejemplo claro de esto es que las empresas de confitería utilizan aceite esencial de menta refinado, y a su vez las empresas farmacéuticas utilizan mentol puro que se obtiene del fraccionamiento del aceite esencial de menta. De esta manera se puede confirmar que estos dos productos provienen de materias primas que pueden ser producidas en el país, y por tanto también procesadas.

Además el hidrolato obtenido de la hierbabuena, es un producto poco valorado y estudiado, en el ámbito nacional, debido a que no se realizaron investigaciones sobre sus aplicaciones y usos.

Por lo tanto, en vista de lo anterior expuesto, se pone a consideración un estudio sobre la obtención de aceite esencial e hidrolato de hierbabuena a partir de la misma planta que se produce en el departamento de La Paz y en otras regiones.

### **1.2.2. Formulación del problema**

¿Será posible la obtención de aceite esencial e hidrolato de hierbabuena (*mentha spicata*) con un buen rendimiento?

### **1.3. Justificación**

Se necesita llevar a cabo procesos de transformación, a partir de materias primas existentes en Bolivia, y así obtener productos con características diferentes y con mayor valor económico, para poder crear nuevas industrias, ayudando así al desarrollo productivo del país. Llevando a cabo el compromiso de la Universidad Mayor de San Andrés, con su pueblo, y cumpliendo con la misión de la carrera de Química Industrial.

La hierbabuena (*mentha spicata*) es una planta que se produce en el departamento de La Paz, y el cual no tiene un tratamiento posterior. Tampoco se han desarrollado proyectos sobre su industrialización, por lo que es necesario comprender el grado de importancia y las aplicaciones que pueden tener el aceite esencial e hidrolato de la misma.

Para la realización de este trabajo la carrera de Química Industrial de la Universidad Mayor de San Andrés cuenta con un laboratorio adecuado para la realización de pruebas, y además cuenta con un equipo de extracción semi-industrial (a escala piloto) y con docentes capacitados, los cuales serán de gran ayuda para la realización del presente trabajo.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Obtener el aceite esencial e hidrolato de la hierbabuena (*mentha spicata*), mediante el proceso de destilación por arrastre de vapor a nivel laboratorio y escala piloto.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Conocer las propiedades organolépticas y densidad del aceite esencial e hidrolato obtenido de la hierbabuena (*mentha spicata*).
- b) Realizar el balance de materia y energía, en el proceso de obtención a escala piloto.
- c) Establecer el rendimiento del aceite esencial de menta obtenido, a nivel laboratorio y escala piloto.



**CAPÍTULO 2**  
**MARCO TEÓRICO**

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Aceites esenciales

Los aceites esenciales son compuestos líquidos, volátiles y de agradable aroma, situados en una o más partes del vegetal, extraídos de las plantas mediante procesos de arrastre con vapor o extracción por solvente. Su estructura está formada por moléculas aromáticas y partículas energéticas (Del Valle, 2015).

Son extremadamente volátiles, sensibles a los rayos del sol y a los cambios extremos de temperatura. Son livianos y no grasos, insolubles en agua y levemente solubles en vinagre. Se disuelven bien en alcohol y mezclan en forma excelente con ceras, grasas y aceites vegetales (Del Valle, 2015).

Los aceites esenciales en las plantas pueden encontrarse en las diferentes células oleíferas (jengibre, cúrcuma, vainilla), en los canales secretorios (pino, artemisia, anís, angélica), estar presente en las glándulas (cítricos, eucaliptos) o en los tricomas (muchas plantas de las familias Labiadas, Asteráceas, Solanáceas, Geraniáceas) (Stashenko, 2009).

El material vegetal (planta aromática), al ser sometido al vapor de agua, libera una mezcla odorífera líquida (aceite esencial) de una gran variedad de sustancias volátiles, que recuerdan el olor, en forma muy concentrada, de la misma planta. Esta mezcla puede tener desde 50 hasta más de 300 sustancias químicas y está compuesta por hidrocarburos terpénicos, sus derivados oxigenados, alcoholes, aldehídos y cetonas, así como por éteres, esteroides, compuestos fenólicos, fenilpropanoides y otros derivados (Stashenko, 2009).

La composición varía con el lugar de origen. También varía con el hábitat en que se desarrolle, el momento de la recolección, el método de extracción, etc. (UPM, 2010).

Entre las principales propiedades terapéuticas debidas a la presencia de aceites esenciales, cabe destacar la antiséptica (durante muchísimos años estas especies vegetales se han

empleado como especias, no solo para dar sabor sino también para conservar los alimentos); antiespasmódica; expectorante; carminativa y eupéptica; etc. (UPM, 2010).

Además de sus propiedades terapéuticas, los aceites esenciales tienen un gran interés industrial en la industria farmacéutica, en alimentación y sobre todo en perfumería.

### **2.1.1. Clasificación de los aceites esenciales**

Los aceites esenciales se pueden clasificar en base a diferentes criterios: consistencia, origen y naturaleza química de los componentes mayoritarios (UPM, 2010).

**a) Consistencia:** De acuerdo con su consistencia los aceites esenciales se clasifican en:

- Esencias: son líquidos volátiles a temperatura ambiente
- Bálsamos: son extractos naturales obtenidos de un arbusto o un árbol, se caracterizan por tener un alto contenido de ácido benzoico y cinámico, así como sus correspondientes esteroides. Son de consistencia más espesa, son poco volátiles y propensos a sufrir reacciones de polimerización.
- Resinas: son productos amorfos sólidos o semisólidos de naturaleza química compleja. Pueden ser de origen fisiológico o fisiopatológico (UPM, 2010).

**b) Origen:** De acuerdo a su origen los aceites esenciales se clasifican como:

- Naturales: se obtienen directamente de la planta y no sufren modificaciones físicas ni químicas posteriores, debido a su rendimiento tan bajo son muy costosas.
- Artificiales: se obtienen a través de procesos de enriquecimiento de la misma esencia con uno o varios de sus componentes, por ejemplo, la mezcla de esencias de rosa, geranio y jazmín, enriquecida con linalol, o la esencia de anís enriquecida con anetol.

- Sintéticos: son los producidos por la combinación de sus componentes los cuales son la mayoría de las veces producidos por procesos de síntesis química. Estos son más económicos y por lo tanto son mucho más utilizados como aromatizantes y saborizantes (esencias de vainilla, limón, fresa, etc.) (UPM, 2010).

### **c) Naturaleza química**

Según la estructura química de los componentes mayoritarios que determinan el olor particular de los aceites, estos se dividen en tres grupos principales:

- Monoterpenoides (linalool, nerol, 1-8 cineol, geraniol).
- Sesquiterpenoides (farnesol, nerolidol).
- Compuestos oxigenados (alcoholes, aldehídos, cetonas) (Peredo, 2009).

#### **2.1.2. Características físicas**

Los aceites esenciales son volátiles y son líquidos a temperatura ambiente. Recién destilados son incoloros o ligeramente amarillos.

Su densidad es inferior a la del agua (la esencia de safrán o de clavo constituyen excepciones). Casi siempre dotados de poder rotatorio, tienen un índice de refracción elevado.

Son solubles en alcoholes y en disolventes orgánicos habituales, como éter o cloroformo, y alcohol de alta gradación. Son liposolubles y muy poco solubles en agua, pero son arrastrables por el vapor de agua (UPM, 2010).

#### **2.1.3. Características químicas**

Considerando al aceite esencial como un producto de aroma característico y clasificando su composición sobre la base de esta propiedad, se puede afirmar que un aceite esencial es una

mezcla de sustancias constituida fundamentalmente por una base integrada por hidrocarburos terpénicos. En menor concentración se encuentra un número no muy alto de sustancias químicas volátiles que son los responsables principales del aroma global del aceite esencial. Por último tenemos gran cantidad de sustancias a muy baja concentración que presentan la característica del aroma global. (Peredo, 2009).

Según los grupos funcionales que tengan pueden ser:

- Hidrocarburos terpénicos: terpenos y terpenoides.
- Aldehídos: aldehído benzoico, aldehído cinámico, butanal, propanal.
- Ácidos: acético, palmítico.
- Alcoholes: linalol, geraniol, mentol.
- Fenoles: anetol, eugenol.
- Esteres: acetato de linalilo, acetato de geranilo.
- Cetonas: tuyona.
- Otros: éteres derivados nitrogenados, sulfuros, tioéteres, tioésteres.

Los terpenos son una vasta y diversa clase de compuestos orgánicos derivados del isopreno (o 2-metilbuta-1,3-dieno), un hidrocarburo de 5 átomos de carbono, unidas en cadena (Ortuño, 2006).

Parte del grupo de sustancias responsables del redondeo o perfil aromático del aceite esencial pueden variar según las condiciones climáticas, origen geográfico, variedad de la planta, edad, etc. Estableciéndose diferencias apreciables entre aceites de distintos orígenes.

Otros componentes del aceite esencial no están relacionados con su aroma (ceras, ácido) pero si pueden tener su importancia para determinadas aplicaciones y pueden actuar como conservantes, antibióticos o fijadores del aroma en el aceite esencial. Aparte están aquellos componentes no intencionados que puede incluir un aceite esencial dependiendo del método de obtención utilizado o de las condiciones en que se encontraba la planta, de la utilización de insecticidas (Ortuño, 2006).



#### **2.1.4. Rendimiento de un aceite esencial**

De planta a planta, el rendimiento de un aceite cambia mucho, puede variar desde 0.01% en flores de jazmín y rosa hasta el 4-6% en semillas de cilantro, anís o coriandro. En promedio, las plantas aromáticas herbáceas poseen de 0.5 a 2% del aceite esencial (Cerpa, 2006).

El rendimiento del aceite es una característica transcendental desde el punto de vista económico y de rentabilidad del proceso de su obtención.

Es muy importante establecer correctamente el tiempo de destilación, puesto que de éste dependerá no solamente el rendimiento del aceite, sino su composición, que incide directamente sobre la aceptación y el precio del aceite en el mercado. Al inicio de la destilación se extraen compuestos polares, solubles en agua, de bajo peso molecular, pero a medida que avanza el proceso, “salen” compuestos menos polares, con mayor peso molecular y menor volatilidad, por ejemplo, sesquiterpenos.

Muchos factores inciden sobre la composición y el rendimiento de aceite esencial en la planta. Entre los principales figuran: la localización geo-climática, tipo de suelo, estado de desarrollo de la planta (antes, durante o después de su floración) e inclusive la hora del día cuando se cosecha, entre otros. Los factores geo-climáticos y el tipo de suelo pueden dar origen a diferentes quimiotipos de la planta, de los cuales se destilan aceites esenciales con composición química, propiedades sensoriales y actividad biológica diferentes (Stashenko, 2009).

El rendimiento, se entiende como la cantidad en masa o volumen de aceite esencial (crudo) que es posible extraer de la masa de materia prima vegetal en base seca ó húmeda.

#### **2.2. Definición y características de hidrolato**

El hidrolato también denominado hidrosol es el agua residual que se forma por condensación del vapor que ha atravesado la materia vegetal durante el proceso de

obtención de un aceite esencial por destilación por arrastre de vapor, es un producto acuoso de la destilación (Perdomo D. 2015).

La mayor parte de los componentes de los aceites esenciales son volátiles y relativamente inmiscibles en el agua, característica ésta que permite su separación de la mezcla del destilado. En esta etapa del proceso se obtiene el aceite esencial como producto principal y un hidrolato al que se le considera un subproducto (SENA, 2010).

El agua, después de la destilación (el llamado hidrolato), puede servir para riegos o, a través del sistema de cohobación, puede ser reutilizada en el mismo sistema de destilación. Algunos hidrolatos, como sub-productos de la destilación de aceites, se pueden emplear en baños o jacuzzis, como agua para aromatización y para la limpieza. (Stashenko, 2009).

En la industria fitosanitaria los hidrolatos obtenidos durante el proceso de extracción se utilizan para repeler y controlar plagas, con ellos se preparan herbicidas, insecticidas, fungicidas, nematicidas, acaricidas, desodorizantes, desinfectantes (SENA, 2010).

## **2.3. Descripción de la especie de hierbabuena**

### **2.3.1. Características**

La hierbabuena o menta verde es una hierba perenne de aroma fresco e intenso, perteneciente a la familia de las Lamiaceae. Su nombre botánico es *Mentha spicata*, haciendo referencia a la forma de sus hojas (en latín spica corresponde a lanza) o al término espigado, aludiendo a la fisonomía de sus flores. Procede de la hibridación de dos tipos de menta, la menta negra de color violáceo y la menta blanca con tonos verdes uniformes (Sis, 2015).

Esta planta puede alcanzar el metro de altura, aunque generalmente su porte está entre 30-90 cm, de hojas lanceoladas, con aroma intenso, serradas, glabras y pilosas en su envés. Las flores nacen de espigas en el extremo más alto, muestran un cáliz de cinco sépalos, la corola tiene tonos alilados, rosas o blancos de hasta 3 mm de longitud (Figura 1).

**Figura 1. Hojas de hierbabuena**



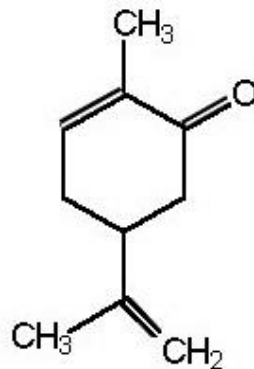
**Fuente: Sis P. (2015)**

### **2.3.2. Composición del aceite esencial de hierbabuena**

La carvona es un compuesto terpenoide que se encuentra naturalmente en el aceite esencial de mentha spicata, puede llegar a ser hasta el 60% o más en el aceite esencial, por lo cual es el componente principal del mismo. Además es una cetona doblemente insaturada, este compuesto presenta dos isómeros ópticamente activos: S- (+) – Carvona y R - (-) – Carvona, este último es el que se encuentra principalmente en la mentha spicata. Además la carvona le transfiere el olor característico de la menta y efectos estimulantes (SENA, 2010).

La carvona se utiliza como aditivo alimentario y en cosmética. Su formula molecular es la siguiente:

**Figura 2. Estructura de la carvona**



**Fuente: Galiano A. (2007)**

Otro compuesto importante es el mentol, el cual es el responsable del olor a menta característico de este aceite esencial y de la mayor parte de su sabor. El mentol es un alcohol secundario que a temperatura ambiente es un sólido de tacto ceroso. Se puede separar del aceite esencial de menta por enfriamiento y filtración (el mentol se hace sólido y lo podemos separar del resto de componentes que permanecen líquidos). (Ortuño, 2006).

Entre otros compuestos minoritarios que estarían presentes en el aceite esencial están el limoneno, cineol, piperitona, acetato de mentilo, isomentona, entre otros (SENA, 2010).

Debido a sus componentes, el aceite esencial tiene las siguientes propiedades:

- Digestivo: antiespasmódico, carminativo y analgésico.
- Respiratorio: Antiséptico y antiinflamatorio
- Piel y mucosas: Antiséptico.

In vitro se han observado efectos antimicrobianos (Sharafi, 2002).

#### **2.3.4. Hidrolato de la hierbabuena**

El hidrolato contiene las moléculas hidrosolubles de la materia destilada, aquellas que el agua puede sostener por su peso molecular, son moléculas miscibles que van en el agua de la destilación. Las moléculas hidrófilas son atraídas por el agua por lo que no van en el aceite esencial, sino solo en el agua de la destilación. Por lo que deducimos que la constitución molecular de un aceite esencial y un hidrolato son parecidos sin embargo difieren.

Nos encontramos que los ácidos y alcoholes de ciertos esteres son los más presentes, son las familias más predominantes en los hidrolatos, por lo que de por sí todos los hidrolatos tienen cualidades comunes (Pecino, 2016).

Normalmente se destila 1 kg de planta para obtener 1 litro de hidrolato (Pecino, 2016).

El hidrolato de la hierbabuena ofrece muchos beneficios terapéuticos. Puede utilizarse en la piel, en la ropa y como ambientador. Tiene olor fresco y agradable. Ayuda a respirar adecuadamente y relajar las mentes hiperactivas (Gonzales, 2004).

Además, tiene un efecto vigorizante en los sentidos cuando se padecen molestias musculares y/o articulares. Posee un efecto refrescante y calmante. Equilibra la respiración y relaja la piel, ayuda a reducir el estrés mental y es adecuado para el cuidado de la piel, aromaterapia y su uso en el hogar (Gonzales, 2004).

#### **2.4. Destilación por arrastre con vapor**

Es una de las técnicas más comunes que permite la separación de sustancias ligeramente volátiles e inmiscibles en agua por medio de una destilación a baja temperatura. Es particularmente útil cuando la sustancia hierve a una temperatura superior a los 100°C y se descompone por debajo de su punto de ebullición o cuando se quiere separar una cantidad relativamente pequeña de una sustancia que se encuentra mezclada con gran cantidad de sólidos o productos alquitranosos y donde la destilación, filtración y extracción son difíciles o impracticables. Se usa generalmente en el aislamiento de productos naturales y de productos de reacción que están impurificados con productos resinosos (García, 2014).

El proceso consiste, en resumen, en una vaporización a temperaturas inferiores a las de ebullición de cada uno de los componentes volátiles por efecto de una corriente directa de vapor de agua, el cual ejerce las funciones de calentar la mezcla hasta su punto de ebullición y disminuir la temperatura de ebullición por adición de la tensión del vapor que se inyecta a la de los componentes volátiles de los aceite esenciales. Los vapores que salen del destilador se enfrían en un refrigerante donde regresan a la fase líquida, agua y aceite esencial, y finalmente se separan en un decantador o vaso florentino (García, 2014).

Si los líquidos son completamente insolubles, la presión de vapor de cualquiera de los componentes no puede ser modificada por la presencia del otro; además, ambos ejercen una presión de vapor verdadera a la temperatura predominante. Cuando la suma de las presiones de vapor por separado es igual a la presión total, la mezcla hierve; la composición del vapor se calcula fácilmente (García, 2014).

Mientras las dos fases líquidas están presentes, la mezcla hervirá a la misma temperatura y producirá un vapor de composición constante.

Mediante este método de destilación por arrastre de vapor, mientras el agua líquida este presente, el líquido orgánico de alto punto de ebullición se evapora a una temperatura bastante menor que su punto normal de ebullición. Sin necesidad de utilizar un equipo de vacío.

Sin embargo, las necesidades caloríficas del proceso por arrastre de vapor son grandes, puesto que se tiene que evaporar simultáneamente una gran cantidad de agua. Las alternativas serían: (1) operar a una presión total diferente en presencia de agua líquida en donde la relación entre las presiones de vapor de las sustancias puede ser más favorable, y (2) burbujear vapor sobrecalentado (u otro gas insoluble) a través de la mezcla en ausencia de agua líquida y evaporar la sustancia para que se sature con vapor (Treybal, 1970).

El efecto de la destilación es que el vapor mediante su acción térmica, fisicoquímica incluso química (sobre todo el vapor húmedo) hincha las paredes de los tejidos facilitando por medio de la osmosis el paso de la esencia al exterior. Una vez aislada la esencia, ésta destila a temperaturas muy inferiores a su punto de ebullición, influyendo favorablemente en la cantidad de agua presente (García, 2014).

**Desventajas:** Pueden ocurrir procesos colaterales como polimerización y resinificación de los terpenos; así como hidrólisis de ésteres y destrucción térmica de algunos componentes.

**Ventajas:** Esta su simplicidad, el tiempo corto de operación y las grandes cantidades de materia prima que se pueden utilizar a bajo costo. Energéticamente es más eficiente, se tiene un mayor control de la velocidad de destilación, existe la posibilidad de variar la presión del vapor, y el método satisface mejor las operaciones comerciales a escala, al proveer resultados más constantes y reproducibles (SENA, 2010).

#### **2.4.1. Fundamento físico: Ley de Dalton**

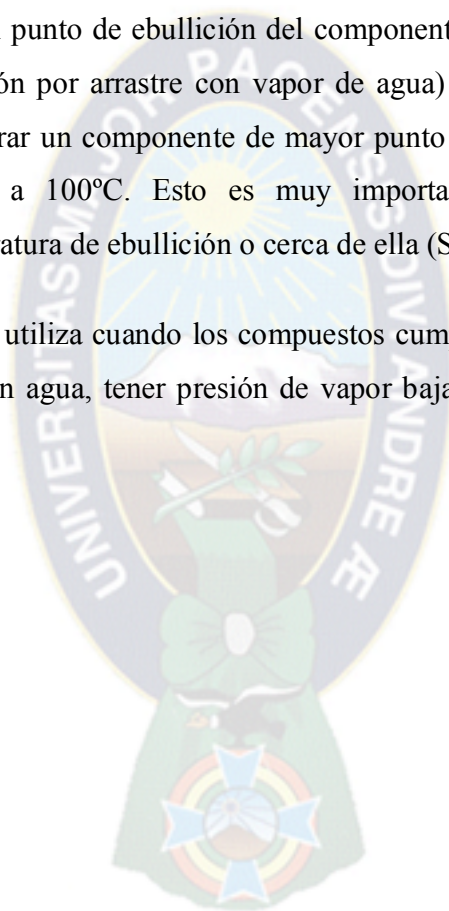
Los vapores saturados de los líquidos inmiscibles sigue la Ley de Dalton sobre las presiones parciales, que dice que: cuando dos o más gases o vapores, que no reaccionan

entre sí, se mezclan a temperatura constante, cada gas ejerce la misma presión que si estuviera solo y la suma de las presiones de cada uno, es igual a la presión total del sistema. Su expresión matemática es la siguiente:

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Al destilar una mezcla de dos líquidos inmiscibles, su punto de ebullición será la temperatura a la cual la suma de las presiones de vapor es igual a la atmosférica. Esta temperatura será inferior al punto de ebullición del componente más volátil. Si uno de los líquidos es agua (destilación por arrastre con vapor de agua) y si se trabaja a la presión atmosférica, se podrá separar un componente de mayor punto de ebullición que el agua a una temperatura inferior a 100°C. Esto es muy importante cuando el compuesto se descompone a su temperatura de ebullición o cerca de ella (Sáez, 2005).

En general, esta técnica se utiliza cuando los compuestos cumplen con las condiciones de ser volátiles, inmiscibles en agua, tener presión de vapor baja y punto de ebullición alto (Sáez, 2005).





**CAPÍTULO 3**  
**METODOLOGÍA DE TRABAJO**



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA DE TRABAJO

#### 3.1. Metodología empleada

En este trabajo se va emplear una metodología cuantitativa, y será un trabajo de tipo documental y experimental. Es documental puesto que para obtener información sobre el tema se precisó de la revisión de material bibliográfico referido al mismo. Y es experimental ya que los datos se obtuvieron de manera directa mediante ensayos y pruebas en laboratorio y escala piloto.

#### 3.2. Prueba a nivel laboratorio

##### 3.2.1. Materiales y equipos

**Tabla 1. Materiales y equipos para laboratorio**

<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>
Matraz erlenmeyer de 500 ml	1	Tapones	3
Refrigerante Liebig	1	Balón con fondo plano de 500 ml	1
Colector	1	Termómetro -20°C a 150 °C	1
Embudo de decantación	2	Varilla de vidrio	1
Probeta de 100 ml	1	Hornilla	2
Vaso de precipitado de 250 ml	2	Soporte universal	3
Mangueras de hule	3	Pinza de nuez	4
Porta embudo con soporte	1	Balón de dos bocas de 200 ml	1
Adaptador de grifo	1		
<b>Insumos y reactivos:</b> Hojas de hierbabuena, agua destilada			

**Fuente: Elaboración propia**

##### 3.2.2. Procedimiento

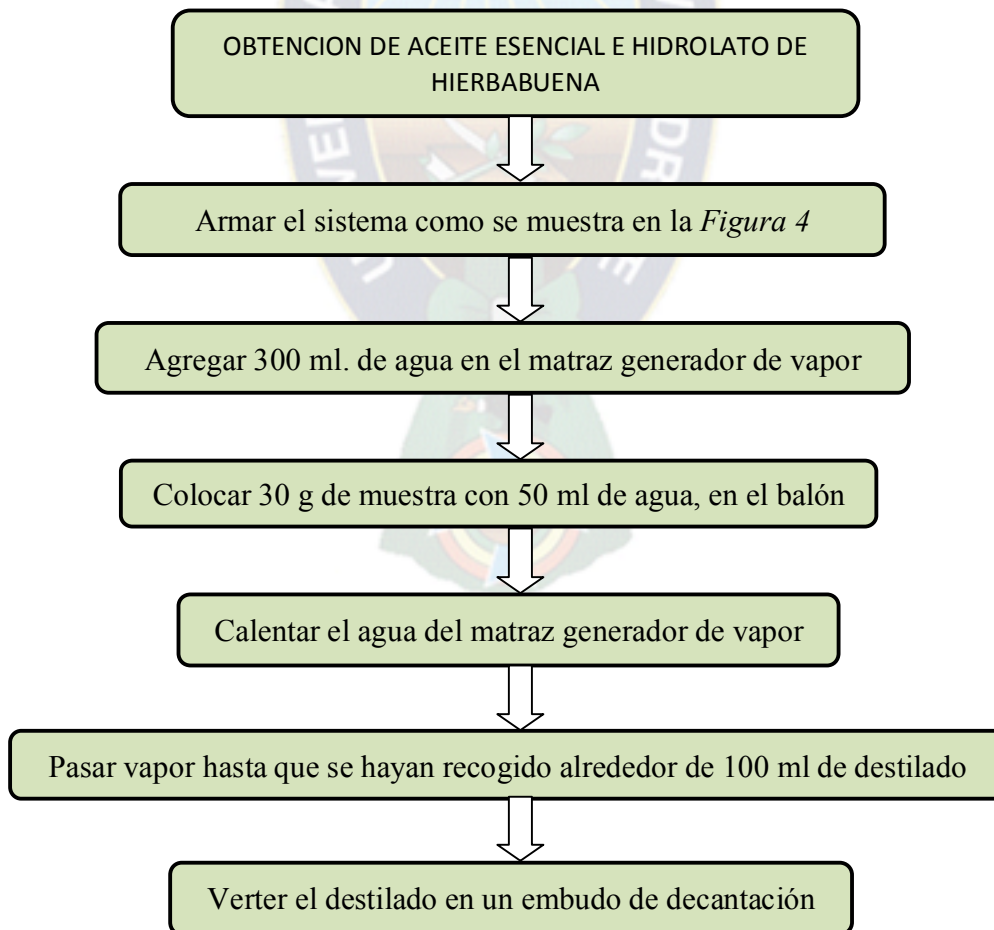
En la siguiente figura se muestra la forma del sistema a emplear (figura 3). Y los pasos del procedimiento en la figura 4.

**Figura 3. Destilación por arrastre de vapor**



**Fuente: Aguilar A. (2012)**

**Figura 4. Diagrama del proceso a nivel laboratorio**



**Fuente: Aguilar A. (2012)**

### 3.3. Prueba a escala piloto

#### 3.3.1. Materiales y equipos

Tabla 2. Materiales y equipos a escala piloto

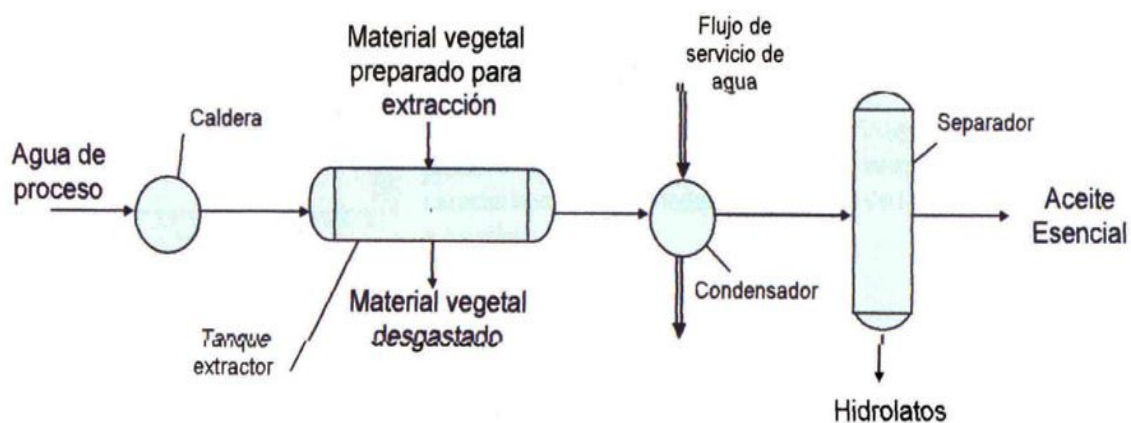
Equipos	Materiales de vidrio
Ablandador de agua	Embudos de decantación
Caldera	Matraz erlenmeyer de 1000 ml
Puente regulador de presión	Vaso de precipitado de 5000 mL
Extractor de aceites esenciales	Embudos para filtrar
Condensador	Picnómetro de 50 ml
<b>Insumos y reactivos:</b> Hojas y tallos de hierbabuena, agua destilada, papel filtro	

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.2. Procedimiento

En la siguiente figura, se muestra el procedimiento con equipos a escala piloto.

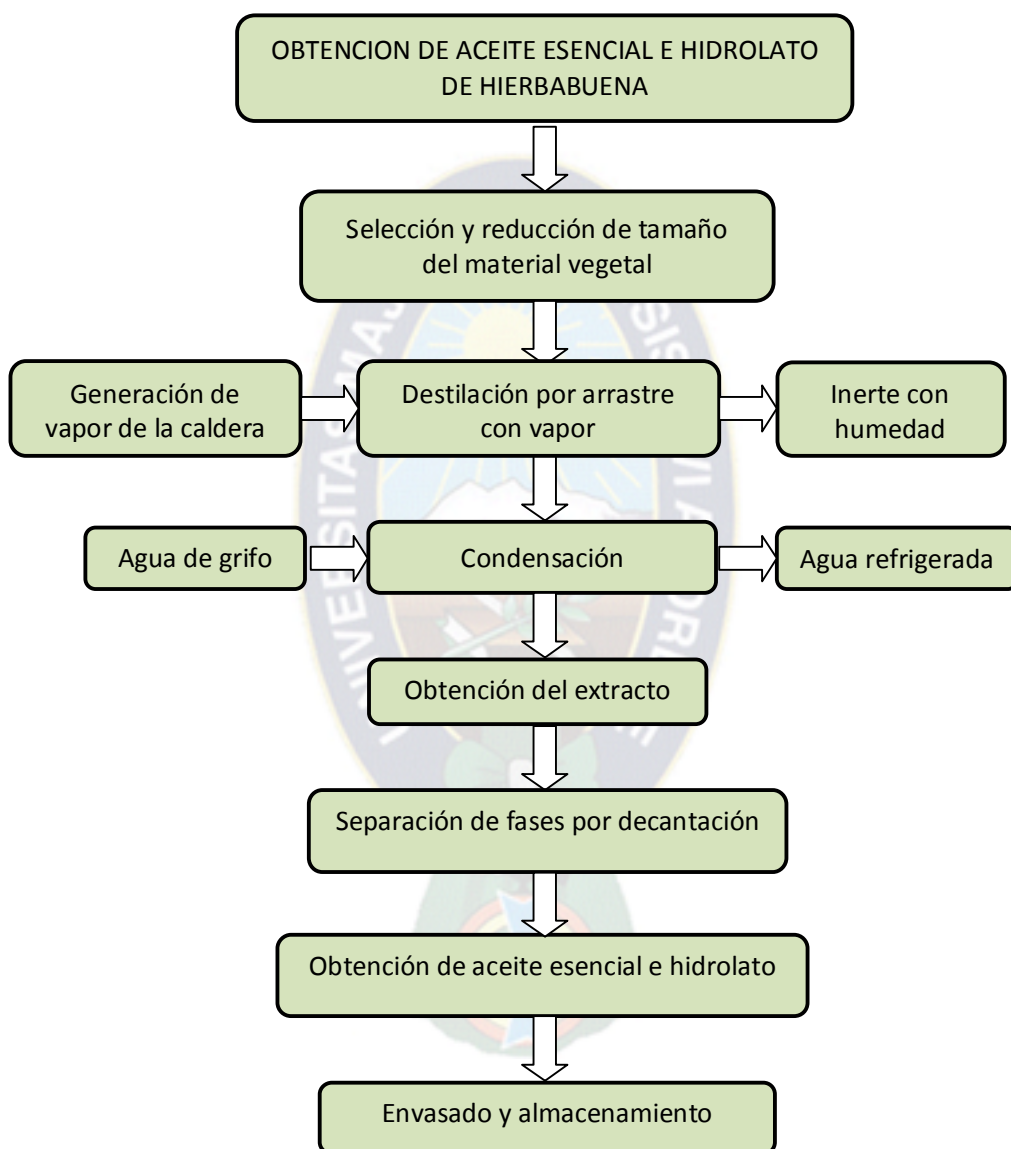
Figura 5. Diagrama cualitativo para la extracción de aceites esenciales



Fuente: SENA, 2010

El diagrama del proceso, se detalla a continuación:

**Figura 6. Diagrama del proceso a escala piloto**



**Fuente: SENA, 2010**



**CAPÍTULO 4**  
**CÁLCULOS Y RESULTADOS**

## CAPÍTULO 4

### CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 4.1. Resultados a nivel laboratorio

La materia prima provino de viveros ubicados en el departamento de La Paz. Se realizaron cuatro pruebas usando solo las hojas de hierbabuena, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 3. Datos de cada prueba**

N° Prueba	Masa de materia prima (g)	Tiempo (min)	Volumen total (ml) (hidrolato+ aceite esencial)
1	30	30	100
2	30	35	100
3	30	40	100
4	30	30	100

**Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 4. Resumen de datos experimentales obtenidos**

N°	Descripción	Valor
1	Masa de la materia prima total	120 g
2	Temperatura de operación	89 ° C
3	Tiempo total de extracción	135 min
4	Volumen total obtenido	400 ml
5	Volumen del aceite esencial obtenido	1.1 ml
6	Volumen de Hidrolato obtenido	398.9 ml

**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.1.1. Cálculo del rendimiento

Para determinar el rendimiento a nivel laboratorio se utilizó la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{v * \rho}{m} * 100 \% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:  $R_1$  : *rendimiento a nivel laboratorio*

$v$  : *volumen de aceite esencial*

$\rho$  : densidad de aceite esencial

$m$ : masa de materia prima

$$R_1 = \frac{1.1 \text{ ml} * 0.9190 \text{ g/ml}}{120 \text{ g}} * 100 \%$$

$$R_1 = 0.842 \%$$

#### 4.1.2. Propiedades organolépticas

Los resultados obtenidos se detallan en el siguiente cuadro:

**Tabla 5. Características organolépticas del aceite esencial e hidrolato**

<b>Muestra</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Color</b>	<b>Olor</b>
Aceite esencial	Líquido oleoso y brillante	Transparente	Penetrante y agradable
Hidrolato	Líquido un poco opaco	Ligeramente amarillo	Agradable y mentolado

**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.2. Resultados a escala piloto

##### 4.2.1. Materia prima

La hierbabuena, provino de viveros ubicados en el departamento de La Paz.

**Foto 1. Material vegetal de la hierbabuena**



**Fuente: Propia**

#### **4.2.2. Descripción de los equipos utilizados**

Duante el proceso a escala piloto se detallan a continuación las características de los equipos utilizados.

##### **a) Ablandador de agua**

La técnica para conseguir agua blanda consiste en eliminar los iones del agua dura (calcio y magnesio). En algunos casos los iones hierro también pueden ser eliminados durante el proceso de ablandamiento. El procedimiento ha resultado en usar una unidad de ablandamiento de aguas y conectarla directamente al suministro de agua. Los ablandadores sustituyen los minerales por otros, generalmente el sodio por intercambio iónico (Foto 2).

La superficie intercambiadora, es catiónica (resina-poliestireno), constituyéndose en un depósito de minerales.

El calcio y el magnesio (cargas positivas) ocuparán los sitios de intercambio catiónico (ocupados previamente por sodio). Cuando una salmuera concentrada pasa a través del depósito que contiene los granos plásticos saturados con calcio y magnesio, se mezcla con el volumen de iones de sodio, esta supuesto que esto arrastra los iones de calcio y de magnesio fuera de los granos de plástico. El ablandador de agua tiene un depósito de salmuera separado de los granos que usa una sal común para crear esta salmuera.

En la operación normal, el agua dura entra en el tanque mineral y los iones de calcio y de magnesio se mueven a los granos, substituyendo iones del sodio. Los iones del sodio entran el agua. Cuando los granos se saturan con calcio y el magnesio, la unidad comienza un ciclo trifásico de la regeneración. Primero, la fase de retro lavado invierte el flujo del agua para quitar la suciedad del depósito. En la fase de la recarga, la solución de sal concentrada y sodio-rica fluye del depósito de la salmuera al depósito mineral. El sodio recoge en los granos, substituyendo el calcio y el magnesio, que van abajo del dren. Cuando esta fase se termina, se elimina el exceso de la salmuera del depósito mineral y se rellena el depósito de la salmuera.



Las aguas duras se miden en gramos por galón (GPG), o miligramos por litro (mg/l, equivalente a partes por millón (ppm)). El agua hasta 1 GPG (17.1 mg/L) es considerada suave y un agua de 60 a 120 GPG es considerada moderadamente dura.

La eficacia del ablandador de agua depende de cuánto es la dureza del agua entrante. El agua sobre 100 GPG puede no ser completamente ablandada.

**Foto 2. Ablandador de agua, en la Carrera de QMC-IND**



**Fuente: Propia**

El presente ablandador tiene una capacidad de  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , y consta de las siguientes partes: Dos columnas con resinas catiónicas, dos recipientes para adicionar la solución de NaCl (situados en la parte superior del equipo), un recipiente para desechar la solución de regeneración de la resina catiónica (situada en la parte inferior del equipo), un tanque para depositar el agua blanda y una serie de conexiones con mangueras y tuberías. Todo el sistema está sujetado por un soporte metálico de 1.74 m de alto, 40 cm de fondo y 60 cm de ancho.

## **b) Caldera**

La caldera es una maquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. En general, la caldera es todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte (Foto 3).

**Foto 3. Generador de vapor, de la Carrera de QMC-IND**



**Fuente: Propia**

La caldera esta construida en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. En la caldera, el fluido en estado líquido (agua blanda) se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes productos a la circulación de los gases de escape, por tratarse de un caldero pirotubular.

El caldero posee accesorios que permite su utilización en forma segura, los que son:

- Accesorios de observación: indicador de nivel de agua y manómetro. En el caso del manómetro, esto indica con una línea roja indeleble la presión máxima de la caldera.

- Accesorios de seguridad: válvula de seguridad, sistema de alarma, sellos o puertas de alivio de sobre presión en el quemador y tapón fusible. El sistema de alarma visual, se activa cuando el nivel de agua llegue al mínimo, y además detiene el sistema de combustión.

La caldera generador de vapor, constan de dos partes principales:

- Cámara de agua: es el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera. El nivel de agua se fija en su fabricación, de tal manera que sobrepase en unos 15 centímetros por lo menos a los tubos o conductos de humo superiores. Con esto, a toda caldera le corresponde una cierta capacidad de agua, lo cual forma la cámara de agua.

- Cámara de vapor: Es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, en ella debe separarse el vapor del agua que lleve una suspensión. Cuanto más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara, de manera que aumente también la distancia entre el nivel del agua y la toma de vapor.

La unidad cuenta con un quemador automático QV (Voltaje: 220V, Frecuencia: 50/60 Hz - Monofásico). Además cuenta con una bomba de agua de 1.5 HP MOCHI MF-CB 110/55M. La caldera es de marca SUSSMAN, industria USA, modelo MBA9.

Las dimensiones de la caldera, son: 45 cm de alto, 51 cm de largo y 40 cm de fondo. La unidad utilizó como combustible GLP para suministrar energía calorífica, a través de un quemador. La caldera tiene una capacidad de vapor de 50 Lb/h.

#### **d) Extractor de aceites esenciales**

El equipo escala piloto consta de un tanque de extracción de 100 litros de capacidad, construido con acero inoxidable (material). El equipo está diseñado para soportar 2 bares de presión (presión de trabajo) y una temperatura de 130°C a dicha presión (Foto 4).

El extractor tiene un sistema de control automático de temperatura (sensor térmico), y está provisto de un manómetro para el control de presión. Las salidas cuentan con válvulas

esféricas de acero inoxidable, roscada de ½ ”. El equipo cuenta con purga en el fondo de la cámara y posee válvula de seguridad o alivio de ½ ”.

**Foto 4. Extractor, de la Carrera de QMC-IND**



**Fuente: Propia**

Se cuenta con un canastillo (capacidad de 100 litros), donde se aloja el material vegetal, y el espesor del aislante térmico (lana mineral) es una pulgada.

El casco cilíndrico (espesor) se ha sido diseñado sometiendo a las cargas elástica, sísmica y presión interna. Los dispositivos de cierre son fácilmente desmontables, sobre todo teniendo en cuenta que cada vez que se cargue y descargue material vegetal. El vapor de agua es inyectado por los fondos del equipo (destilación por arrastre con vapor) o generado en esa sección (método directo), en el que el material está en contacto íntimo con el vapor generado en esa sección. En este caso, se dejan en un mismo compartimento el agua y el material a extraer (hidrodestilación), y debe colocarse una trampa al final del refrigerante.

El equipo tiene un peso aproximado de 100 kg, y sus dimensiones son: 47,5 cm de diámetro y 1 m de altura. Está provisto de un disco de vidrio en la tapa de vaciado, para ver el interior de la cámara.

### e) Condensador

Este es un intercambiador de calor, en el cual se presenta un cambio de fase vapor – líquido, debido a la transferencia de calor del vapor a un refrigerante (agua). Uno de los condensadores más utilizados es el intercambiador de calor de casco y tubos. Este tipo de condensador ha obtenido una gran aplicabilidad y aceptabilidad en la industria de extracción de aceites esenciales, debido a la alta capacidad de estos equipos (Foto 5).

**Foto 5. Condensador, de la Carrera de QMC-IND**



**Fuente: Propia**

El condensador cuenta con tres tubos (serpentes), por donde circula el vapor, y la carcasa para el flujo de refrigerante (agua potable), ambos circulan en contracorriente. El intercambio de calor es realizado con agua potable.

### f) Separador de fases

Es un dispositivo destinado para la separación del aceite esencial e hidrolato del extracto obtenido, luego de pasar por el condensador (Foto 6).

En el trabajo se usaron dos embudos de separación (material de vidrio) de medio litro de capacidad cada uno, asegurados en un soporte universal. Para coleccionar el hidrolato, se dispuso de un matraz Erlenmeyer de 5 litros de capacidad. El hidrolato se separa gradualmente del aceite esencial, al abrir las llaves de los embudos .

Foto 6. Separador de Fases, de la Carrera de QMC-IND



Fuente: Propia

#### 4.2.3. Cálculo de las densidades de aceite esencial e hidrolato

Para el cálculo de las densidades , se usará la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:  $\rho$ : Densidad

$M_2$ : Masa del picnómetro + muestra

$M_1$ : Masa del picnómetro vacío

$V$ : Volumen de muestra

Tabla 6. Densidades del aceite esencial e hidrolato

Muestra	Picnómetro vacío (g)	Picnómetro con muestra (g)	Volumen de muestra (ml)	Densidad (g/ml)
Aceite esencial	9.8726	14.4676	5.0	0.9190
Hidrolato	9.7921	14.8327	5.0	1.0081

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.4. Balance de materia

##### I) Balance de materia en el extractor

a) Datos experimentales:

**Tabla 7. Datos obtenidos del proceso a escala piloto**

Nº	Descripción	Valor
1	Tiempo de extracción	100 min
2	Materia vegetal	3854.3 g
3	Residuo de extracción	4215.2 g
4	Volumen total obtenido	5022.7 ml
5	Volumen de aceite esencial	21.7 ml
6	Volumen de hidrolato	5001.0 ml

**Fuente: Elaboración propia**

b) Determinación del flujo de alimentación, de materia prima:

$$F_1 = \frac{3854.3 \text{ g}}{100 \text{ min}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 2.3126 \text{ kg/h}$$

c) Determinación de los flujos máscos de hidrolato y aceite esencial:

$$F_{H_2O}^4 = \frac{1.0081 \text{ g}}{1 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{5001 \text{ ml}}{100 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 3.0249 \text{ kg/h}$$

$$F_{aceite}^4 = \frac{0.9190 \text{ g}}{1 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{21.7 \text{ ml}}{100 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 0.0119 \text{ kg/h}$$

d) Determinación del flujo de extracto:

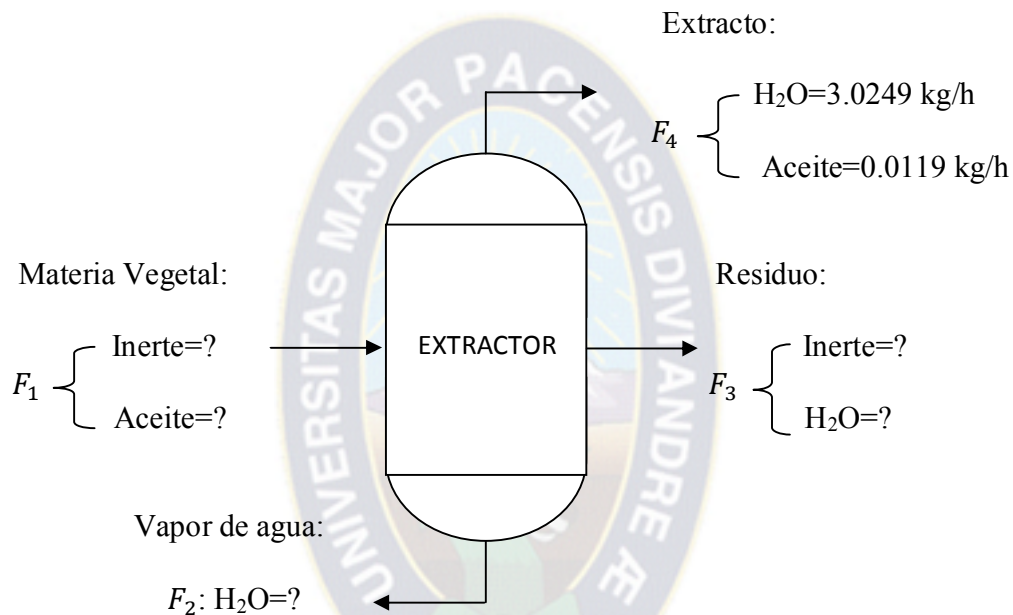
$$F_4 = F_{H_2O}^4 + F_{aceite}^4 = 3.0249 + 0.0119 = 3.0368 \text{ kg/h}$$

e) Determinación de residuo vegetal al final de la extracción:

$$F_3 = \frac{4215.2 \text{ g}}{100 \text{ min}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 2.5291 \text{ kg/h}$$

f) Diagrama de flujo, en el equipo extractor:

**Figura 7. Diagrama de flujo en el extractor**



**Fuente: Elaboración propia**

g) Balance general:

$$F_1 + F_2 = F_3 + F_4$$

h) Determinación del flujo de vapor de agua:

$$F_2 = F_3 + F_4 - F_1 = 2.5291 + 3.0368 - 2.3126 = 3.2533 \text{ kg/h}$$

i) Balances parciales:

$$H_2O: F_2 = F_{H_2O}^3 + F_{H_2O}^4$$

$$F_{H_2O}^3 = F_2 - F_{H_2O}^4 = 3.2533 - 3.0249 = 0.2284 \text{ kg/h}$$

$$Aceite: F_{aceite}^1 = F_{aceite}^4 = 0.0119 \text{ kg/h}$$



j) Determinación del inerte en la materia vegetal:

$$F_{inerte}^3 = F_3 - F_{H_2O}^3 = 2.5291 - 0.2284 = 2.3007 \text{ kg/h}$$

$$F_{inerte}^1 = F_{inerte}^3 = 2.3007 \text{ kg/h}$$

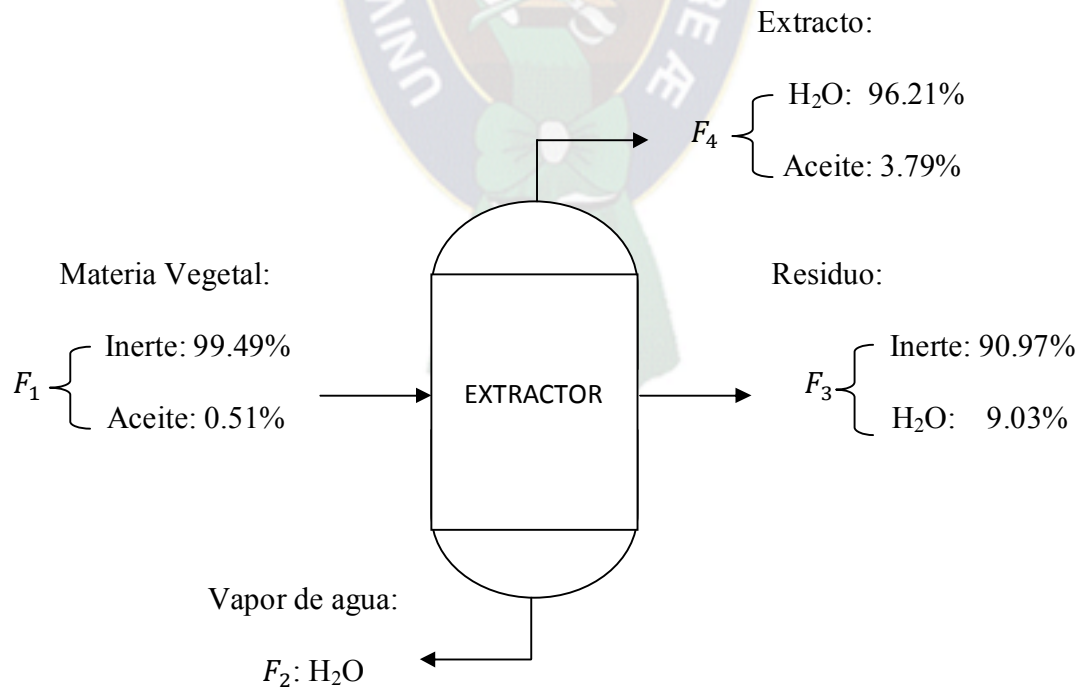
k) Fracciones másicas:  $W_{aceite}^1 = \frac{F_{aceite}^1}{F_1} = \frac{0.0119}{2.3126} = 0.005146$

$$W_{inerte}^3 = \frac{F_{inerte}^3}{F_3} = \frac{2.3007}{2.5291} = 0.9097$$

$$W_{H_2O}^4 = \frac{F_{H_2O}^4}{F_4} = \frac{3.0249}{3.1439} = 0.9621$$

l) Diagrama con los resultados obtenidos:

**Figura 8. Diagrama del extractor, con fracciones másicas**



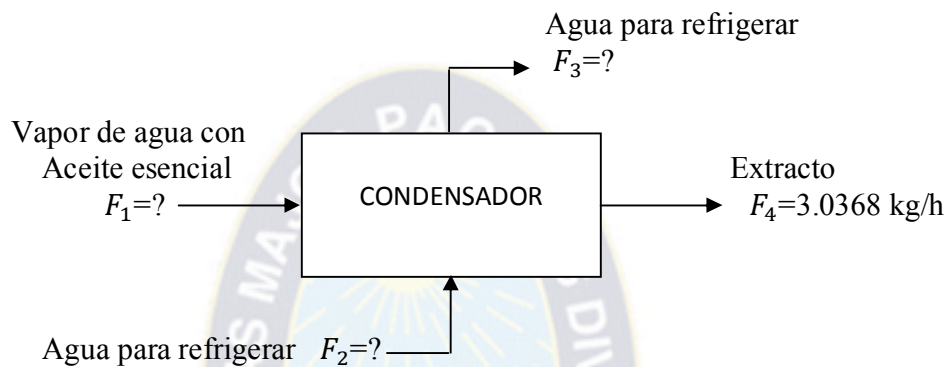
**Fuente: Elaboración Propia**

## II) Balance de materia en el condensador

a) Flujo de salida de extracto :  $F_4 = 3.0368 \text{ kg/h}$

b) Diagrama de flujo:

**Figura 9. Diagrama de flujo del condensador**



**Fuente:Elaboración propia**

c) Flujo de entrada de vapor:  $F_1 = F_4 = 3.0368 \text{ kg/h}$

d) Flujo de agua de refrigerante:  $F_2 = F_3 = \frac{4 \text{ l}}{1 \text{ min}} * \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ L}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 240 \text{ kg/h}$

## III) Balance de materia de la caldera

a) Determinación del flujo de combustible (G.L.P.)

**Tabla 8. Datos de combustible (GLP)**

Nº	Descripción	Valor
1	Masa de la garrafa con combustible al inicio	21.5 kg
2	Masa de la garrafa con combustible al final	18.3 kg
3	Tiempo de uso	4.42 h

**Fuente: Elaboración propia**

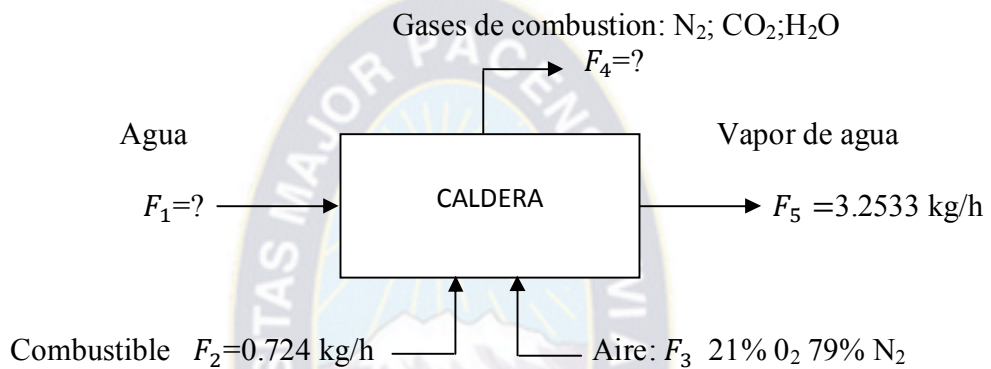
$$\text{masa de combustible consumida} = (21.5 - 18.3) \text{ kg} = 3.2 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el flujo de combustible entrante a la caldera será:

$$F_2 = \frac{\text{masa de comb. consumida}}{\text{tiempo de uso}} = \frac{3.2 \text{ kg}}{4.42 \text{ h}} = 0.724 \text{ kg/h}$$

b) Diagrama de flujo:

**Figura 10. Diagrama de flujo de la caldera**



**Fuente: Elaboración propia**

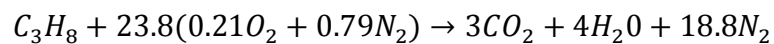
c) Determinación del flujo de agua entrante:

$$F_1 = F_5 = 3.2533 \text{ kg/h}$$

d) Determinación del flujo de gases de combustión:

El G.L.P. contiene alrededor del 80% de propano y 20% butano (teórico).

Combustión del propano:



$$F_{\text{propano}} = 0.724 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.8 = 0.579 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Cantidad de gases de combustión:

$$F_{CO_2} = 0.579 \frac{kg C_3H_8}{h} * \frac{1 kmol C_3H_8}{44 kg C_3H_8} * \frac{3 kmol CO_2}{1 kmol C_3H_8} * \frac{44 kg CO_2}{1 kmol CO_2} = 1.737 kg/h$$

$$F_{H_2O} = 0.579 \frac{kg C_3H_8}{h} * \frac{1 kmol C_3H_8}{44 kg C_3H_8} * \frac{4 kmol H_2O}{1 kmol C_3H_8} * \frac{18 kg H_2O}{1 kmol H_2O} = 0.947 kg/h$$

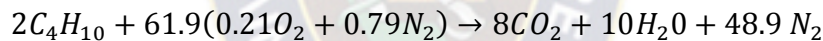
$$F_{N_2} = 0.579 \frac{kg C_3H_8}{h} * \frac{1 kmol C_3H_8}{44 kg C_3H_8} * \frac{18.8 kmol N_2}{1 kmol C_3H_8} * \frac{28 kg N_2}{1 kmol N_2} = 6.927 kg/h$$

$$F_{gases (1)} = 1.737 + 0.947 + 6.927 = 9.611 kg/h$$

Cantidad de aire consumido (de propano):

$$F_{aire(1)} = 9.611 kg - 0.579 kg = 9.032 kg/h$$

Combustión del butano:



$$F_{butano} = 0.724 \frac{kg}{h} * 0.2 = 0.145 \frac{kg}{h}$$

Cantidad de gases de combustión:

$$F_{CO_2} = 0.145 \frac{kg C_4H_{10}}{h} * \frac{1 kmol C_4H_{10}}{58 kg C_4H_{10}} * \frac{8 kmol CO_2}{2 kmol C_4H_{10}} * \frac{44 kg CO_2}{1 kmol CO_2} = 0.440 kg/h$$

$$F_{H_2O} = 0.145 \frac{kg C_4H_{10}}{h} * \frac{1 kmol C_4H_{10}}{58 kg C_4H_{10}} * \frac{10 kmol H_2O}{2 kmol C_4H_{10}} * \frac{18 kg H_2O}{1 kmol H_2O} = 0.225 kg/h$$

$$F_{N_2} = 0.145 \frac{kg C_4H_{10}}{h} * \frac{1 kmol C_4H_{10}}{58 kg C_4H_{10}} * \frac{48.9 kmol N_2}{2 kmol C_4H_{10}} * \frac{28 kg N_2}{1 kmol N_2} = 1.712 kg/h$$

$$F_{gases(2)} = 0.440 + 0.225 + 1.712 = 2.377 \text{ kg/h}$$

Cantidad de aire consumido (butano):

$$F_{aire(2)} = 2.377 \text{ kg} - 0.145 \text{ kg} = 2.232 \text{ kg/h}$$

Flujo de gases total:

$$F_4 = F_{gases(1)} + F_{gases(2)} = 9.611 + 2.377 = 11.988 \text{ kg/h}$$

e) Determinación del flujo de aire:

$$F_3 = F_{aire(1)} + F_{aire(2)} = 9.032 + 2.232 = 11.264 \text{ kg/h}$$

#### 4.2.5. Balance de Energía

El análisis y los cálculos se realizaron mediante Termodinámica.

#### I) Cálculo del calor generado por la caldera

Se hizo la lectura de la presión en el barómetro de la caldera, en intervalos de tiempo, resumiendo en el siguiente cuadro los datos del mismo.

**Tabla 9. Valores de la presión en la caldera**

Nº Dato	Tiempo (min)	Presión (PSI)
1	0	64
2	15	33
3	30	54
4	45	60
5	60	64
6	75	47
7	100	40

**Fuente: Elaboración propia**

a) Datos experimentales:

**Tabla 10. Datos del proceso en la caldera**

Nº	Descripción	Valor
1	Temperatura promedio de entrada de agua de grifo	11.5 °C
2	Presión promedio de la caldera	51.7 PSI = 0.356 MPa

**Fuente: Elaboración propia**

b) Balance de energía:

$$\left(\underline{H} + \underline{E}_C + \underline{E}_P\right)_{entr.} - \left(\underline{H} + \underline{E}_C + \underline{E}_P\right)_{sal} + \underline{Q} - \underline{W} = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Nota. Ecuación obtenida de Burghart D. (1984)

Donde:

- $\underline{H}$  = entalpía (kJ/kg)
- $\underline{E}_C$  = energía cinética (kJ/kg)
- $\underline{E}_P$  = energía potencial (kJ/kg)
- $\underline{Q}$  = calor (kJ/kg)
- $\underline{W}$  = trabajo (kJ/kg)

Analizando el sistema, la ecuación queda:

$$\underline{Q} = \underline{H}_{sal} - \underline{H}_{ent}$$

c) Cálculo de la entalpía de entrada a T = 11.5 °C :

$$\underline{H}_{ent} = \underline{H}_f = 48.30 \text{ kJ/kg}$$

d) Cálculo de la entalpía de salida: (x=1, vapor saturado a P = 0.356 MPa)

$$\underline{H}_{sal} = \underline{H}_g = 2733.2 \text{ kJ/kg}$$

e) Cálculo del calor:  $\underline{Q}_{caldera} = 2733.2 - 48.30 = 2684.9 \text{ kJ/kg}$

Nota. Para los cálculos realizados se usaron las tablas de Burghart D, 1984 (Anexo 9 y Anexo 10).

## II) Cálculo de la pérdida de calor en el condensador

a) Datos experimentales:

**Tabla 11. Datos del proceso en el condensador**

Nº	Descripción	Valor
1	Temperatura de entrada al condensador	90 °C
2	Temperatura promedio de salida del extracto	43 °C

**Fuente: Elaboración propia**

b) Balance de energía:

$$\left( \underline{H} + \underline{E}_C + \underline{E}_P \right)_{entr.} - \left( \underline{H} + \underline{E}_C + \underline{E}_P \right)_{sal} + \underline{Q} - \underline{W} = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Analizando el sistema, la ecuación queda:

$$\underline{Q} = \underline{H}_{sal} - \underline{H}_{ent}$$

c) Cálculo de entalpía de entrada a 90° C (x=1, vapor saturado).

$$\underline{H}_{ent} = \underline{H}_g = 2660.1 \text{ kJ/kg}$$

d) Cálculo de entalpía de salida a 43 ° C:

$$\underline{H}_{sal} = \underline{H}_f = 180.098 \text{ kJ/kg}$$

e) Cálculos del calor perdido:  $\underline{Q}_{condensador} = 180.098 - 2660.1 = -2480.0 \text{ kJ/kg}$

Nota. Para los cálculos realizados se usaron las tablas de Burghart D, 1984 (Anexo 9 y Anexo 10).

#### 4.2.6. Cálculo del rendimiento

Para el cálculo del rendimiento a escala piloto, se usará la siguiente ecuación:

$$R_2 = \frac{v * \rho}{m} * 100 \% \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:  $R_2$  : rendimiento a escala piloto

$v$  : volumen de aceite esencial

$\rho$  : densidad de aceite esencial

$m$ : masa de materia prima

Por lo tanto:

$$R_2 = \frac{21.7 \text{ ml} * 0.9190 \text{ g/ml}}{3854.3 \text{ g}} * 100 \%$$

$$R_2 = 0.517 \%$$

#### 4.2.7. Propiedades organolépticas

Los resultados obtenidos se detallan en el siguiente cuadro:

**Tabla 12. Propiedades organolépticas del aceite esencial e hidrolato**

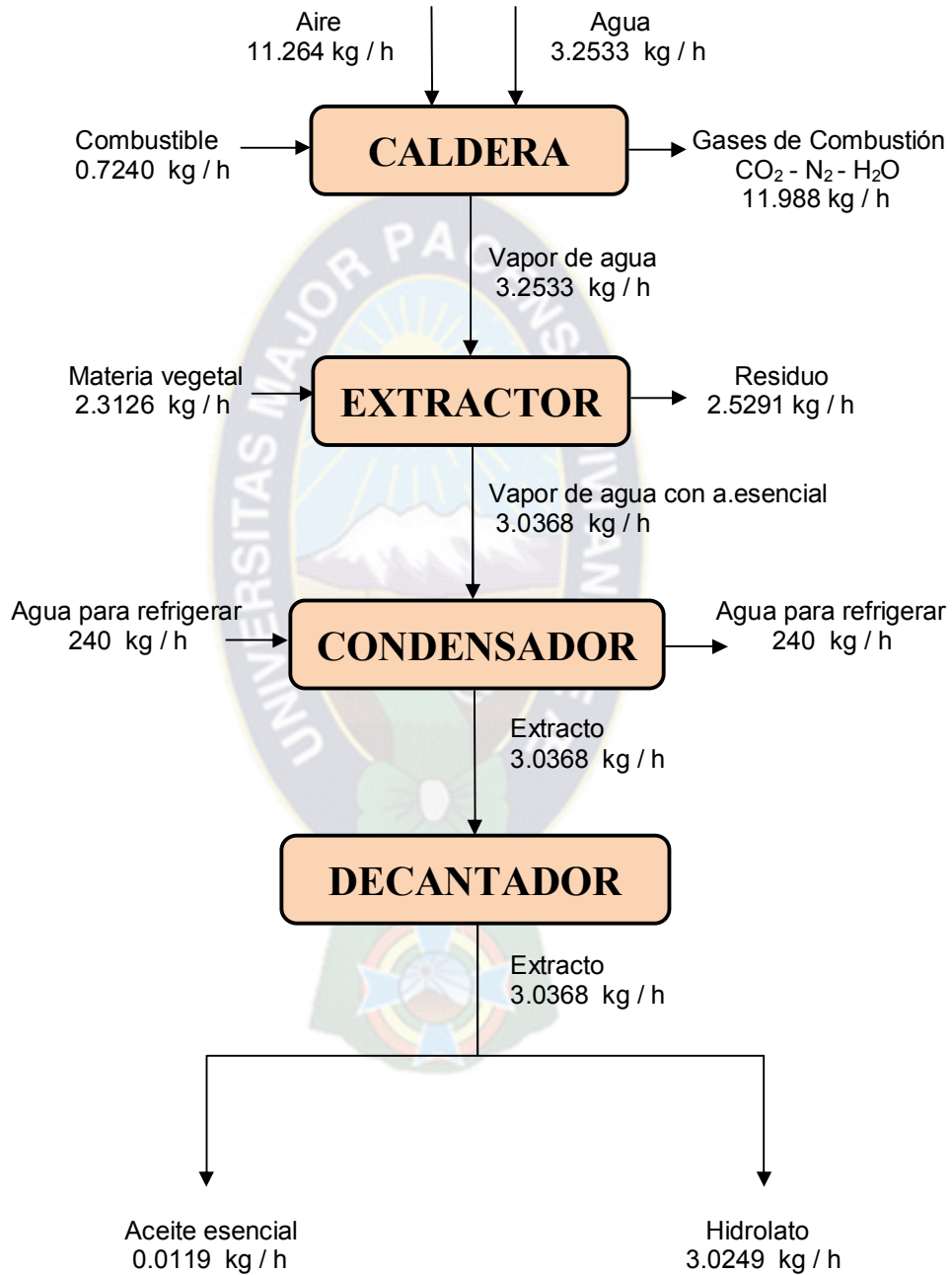
<b>Muestra</b>	<b>Aspecto</b>	<b>Color</b>	<b>Olor</b>
Aceite esencial	Líquido oleoso y brillante	Transparente	Penetrante y agradable
Hidrolato	Líquido un poco opaco	Amarillo pálido	Agradable, fresco, poco mentolado

**Fuente: Elaboración propia**



#### 4.2.8. Diagrama de flujo con Balance de Materia

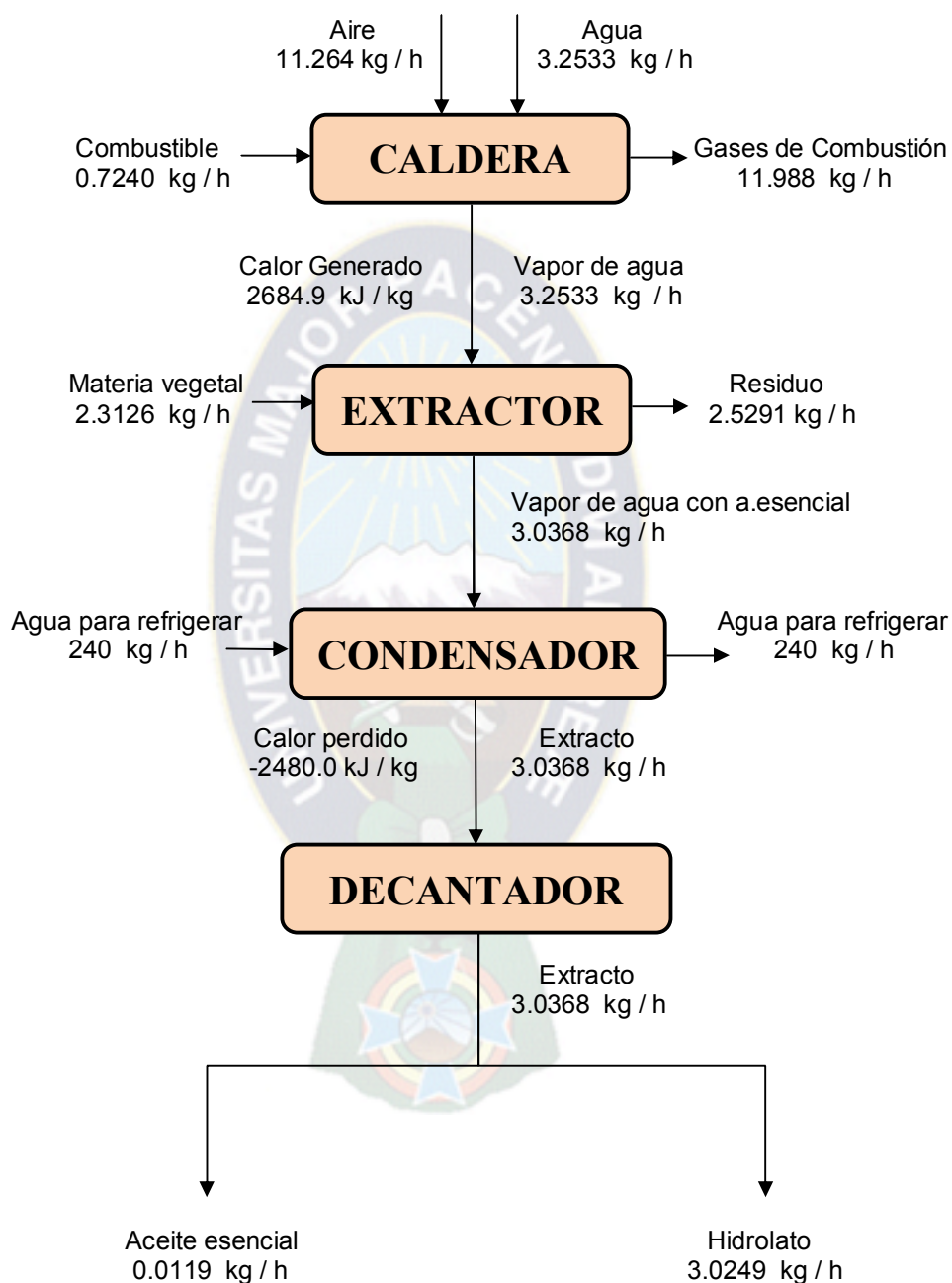
Figura 11. Balance de materia general



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.9. Diagrama de flujo con Balance de Materia y Energía

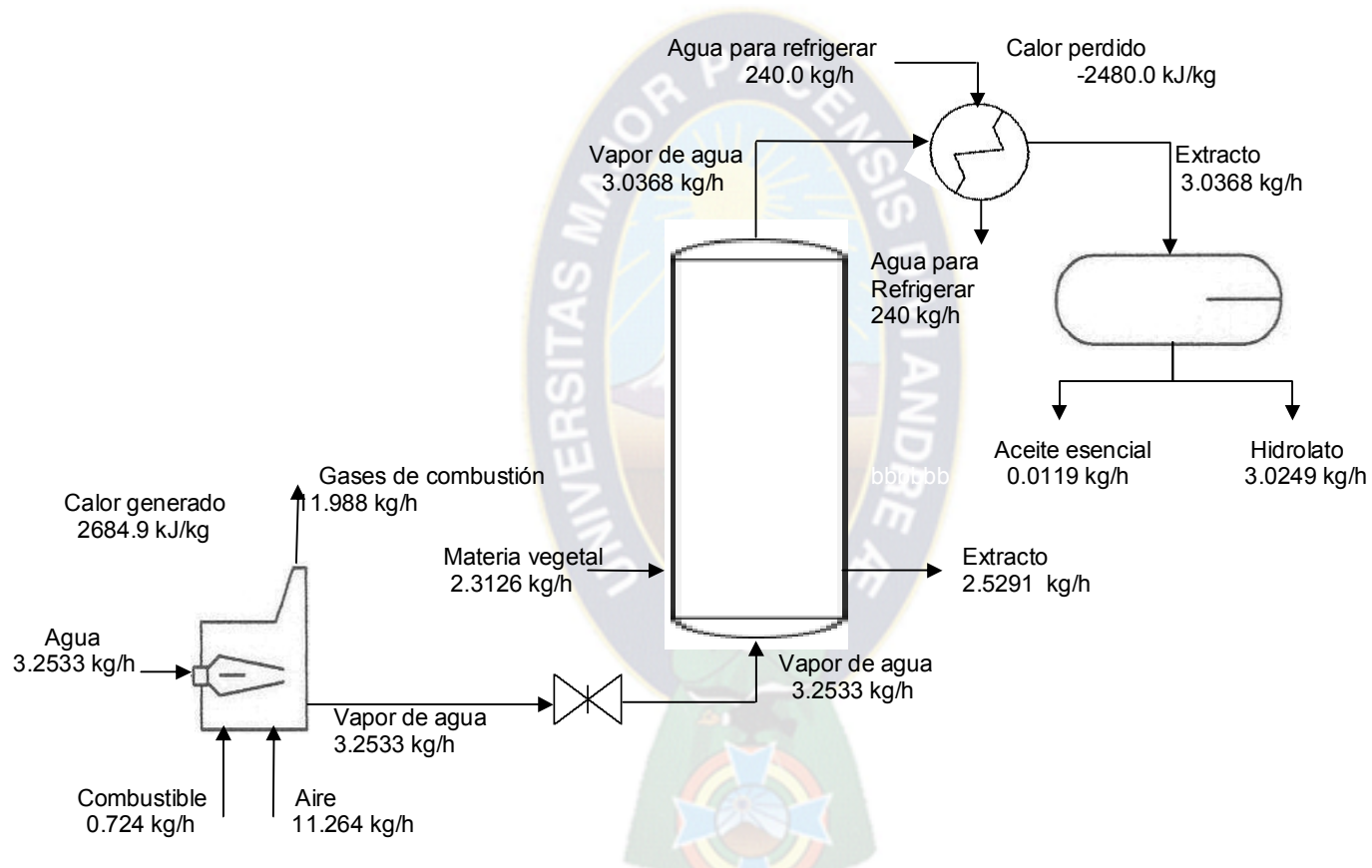
Figura 12. Balance de materia y energía general



Fuente: Elaboración propia

4.2.10. Diagrama de equipos con Balance de Materia y Energía

Figura 13. Diagrama del proceso general



Fuente: Elaboración propia



**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se obtuvo de manera exitosa el aceite esencial e hidrolato de hierbabuena (*mentha spicata*), a nivel laboratorio y escala piloto.

Al determinar la densidad de los mismos, se obtuvieron los siguientes valores:  $\rho_{HIDROLATO} = 1.0081 \text{ g/ml}$  y  $\rho_{A.ESENCIAL} = 0.9190 \text{ g/ml}$ . Además se evidenció que el aceite esencial obtenido fue transparente y con un olor penetrante pero agradable, en cambio el hidrolato tuvo un color ligeramente amarillo con olor fresco y poco mentolado.

La temperatura de obtención del aceite, en la técnica de destilación por arrastre de vapor a nivel de laboratorio fue de 89°C y esta misma se corroboró en la evaluación a escala piloto.

Se determinó el rendimiento de la obtención del aceite esencial de la hierbabuena dando un valor de 0.842 % a nivel laboratorio y 0.517 % a escala piloto.

La diferencia del rendimiento a nivel laboratorio y escala piloto se debió en gran medida a que en escala piloto se usó además de las flores, parte de los tallos en la extracción lo que redujo el rendimiento de la operación.

Se obtuvo una cantidad considerable de hidrolato, a nivel laboratorio y escala piloto, durante un tiempo de extracción corto. Vol Hidrolato (lab.) = 398.9 ml  
Vol. Hidrolato (e.piloto) = 5001 ml

Se realizó el balance de materia en todo el sistema. Entre los datos más revelantes, se determinó el flujo de entrada de combustible a la caldera siendo este 0.7240 kg/h, generando un flujo de vapor de 3.2533 kg/h. En el equipo extractor se obtuvieron los porcentajes de las fracciones másicas de la materia inerte, aceite y agua. También se determinó los flujos másicos obtenidos de aceite esencial e hidrolato.

Por análisis termodinámico, se realizó el balance de energía en la caldera y el condensador. Determinando así el calor generado por la caldera que fue de 2684.9 kJ/kg y el calor perdido en el condensador que fue de -2480.0 kJ /kg, durante la realización del proceso a escala piloto.

## **5.2. Recomendaciones**

En la extracción del aceite esencial, se recomienda que se utilice solo las hojas y no así los tallos, además se debe seleccionar los mismos de modo de eliminar las impurezas y elementos no deseados.

Debido al rendimiento bajo del aceite esencial, el cual fue menor al 1%, se recomienda realizar más pruebas para conocer el tiempo de extracción con el mayor rendimiento.

Se debe realizar un análisis cuantitativo instrumental del aceite esencial e hidrolato, para conocer los porcentajes exactos de los componentes del mismo.

Durante, la realización de la prueba a escala piloto, se evidenció que la caldera no generó una presión constante, ya que el rango del valor máximo y mínimo fue muy alto:  $\text{Rango} = P_{\text{max}} - P_{\text{min}} = 64 \text{ PSI} - 33 \text{ PSI} = 31 \text{ PSI}$ . Por lo que se recomienda que se coloque un aislante térmico, ya que el mismo no lo poseía, es recomendable también relizar un pre-calentamiento del agua antes de que entre a la caldera, para evitar que en el momento que llegue a la parte alta, no exista una turbulencia excesiva que provoque que una parte del liquido no se llegue a vaporizar.

Debido a la gran cantidad de hidrolato obtenido, esta puede ser comercializada para diferentes aplicaciones, por ejemplo: para su uso en ambientadores, debido al olor agradable y fresco que tiene.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR A. 2012. Práctica: Destilación por arrastre de vapor. [en línea] <<http://quimicaorganica1alejandraaguilar.blogspot.com/2012/02/practica-3-destilacion-por-arrastre-de.html>>

BURGHART D. 1984. Ingeniería Termodinámica. Segunda Edición. México. Industria Editorial

CERPA M. 2006. Planta Piloto para la obtención de aceites esenciales mediante destilación por arrastre de vapor. Universidad de Valladolid. España

DEL VALLE H. 2015. Extracción de aceites esenciales de plantas autóctonas menta (*mentha piperita* L.), palo santo (*bursera graveolens*), hierba luisa (*cymbopogon citratus*) de la provincia de Manabí, con potenciales de industrialización. Ecuador. Universidad Técnica de Manabí

GALIANO A. 2007. Plantas medicinales. [en línea] <<http://www.iqb.es/cbasicas/farma/farma06/plantas/ph07sm.htm>>

GARCÍA R. 2014. Obtención de aceite esencial de citronela (*Cymbopogon winterianus*) extraído por arrastre con vapor a escala piloto: estudio de la influencia de variables en el rendimiento y la calidad del aceite. Tesis de Maestría. Argentina. Universidad Tecnológica Nacional

GONZALES A. 2004. Obtención de aceites esenciales y extractos etanólicos de plantas del Amazonas. Universidad Nacional de Colombia. Manizales – Colombia

LÓPEZ A. 2016. Material de Diapositivas relacionado a la Carvona. [en línea] <<http://es.calameo.com/read/0048673496b3a80928b02>>

ORTUÑO M. 2006. Manual práctico de aceites esenciales, aromas y perfumes. Primera Edición. Aiyana Producciones. España

PECINO I. 2016. Qué es un hidrolato. <<http://thenaturalab.com/que-es-un-hidrolato/>>

PERDOMO D. 2015. Extracción y evaluación de rendimientos de los aceites esenciales del árbol Aniba Perutilis Hemsley (Comino) mediante el método de arrastre con vapor. Universidad Nacional Abierta y a Distancia CEAD Florencia. España

PEREDO H. 2009. Aceites esenciales: métodos de extracción. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Universidad de la Américas Puebla San Andrés Cholula. México

SAEZ A. 2005. Evaluación a escala de planta piloto del proceso industrial para la obtención de aceite esencial de cardamomo, bajo la filosofía “cero emisiones”. Universidad EAFIT. Colombia

SENA - SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. 2010. Introducción a la industria de los aceites esenciales de plantas medicinales y aromáticas. Colombia

SHARAFI S. 2002. Analizan los efectos beneficiosos del aceite esencial de menta y sus posibles usos. SIIC - Sociedad Iberoamericana de Información Científica. <<http://www.bago.com/BagoArg/Biblio/farmaweb340.htm>>

SIS P. 2015. Propiedades y Beneficios de la Hierbabuena. [en línea] <<http://te.aceitedearganweb.com/hierbabuena>>

STASHENKO E. 2009. Aceites Esenciales. Primera edición. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Colombia

TREYBAL E. R. 1970. Operaciones de transferencia de masa. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias Químicas

UPM - UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. 2010. Uso Industrial de Plantas Aromáticas y Medicinales. <<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/uso-industrial-de-plantas-aromaticas-y-medicinales/contenidos/material-de-clase/tema7.pdf>>



## ANEXOS

### a) Realización del proceso a nivel laboratorio

#### Anexo 1



Planta de hierbabuena usada en laboratorio

#### Anexo 2



Proceso de destilación por arrastre de vapor

### **Anexo 3**



**Obtención del extracto por condensación**

### **Anexo 4**



**Separación de fases de aceite esencial e hidrolato por decantación**

**b) Realización del proceso a escala piloto**

**Anexo 5**



**Vista interna del extractor de aceites esenciales**

**Anexo 6**



**Supervisión y control del proceso**

**Anexo 7**



**Hidrolato obtenido**

**Anexo 8**



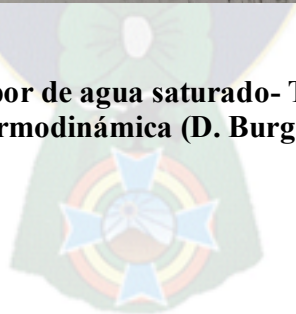
**Determinación de densidad del aceite esencial**

## Anexo 9

Tabla A.5 Vapor de Agua Saturado – Temperatura

Temp. °C T	Presión kPa P	Volumen específico		Energía interna			Entalpía			Entropía		
		Liq. sat. v <sub>f</sub>	Vap. sat. v <sub>g</sub>	Liq. sat. u <sub>f</sub>	Evap. u <sub>fg</sub>	Vap. sat. u <sub>g</sub>	Liq. sat. h <sub>f</sub>	Evap. h <sub>fg</sub>	Vap. sat. h <sub>g</sub>	Liq. sat. s <sub>f</sub>	Evap. s <sub>fg</sub>	Vap. sat. s <sub>g</sub>
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5201	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
MPa												
100	0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958

Tabla A-5: Vapor de agua saturado- Temperatura  
Ing. Termodinámica (D. Burghart)



## Anexo 10

*Tabla A.6 Vapor de Agua Saturado—Presión (continuación)*

Presión MPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volumen específico		Energía interna			Entalpía			Entropía		
		Liq. sat. $v_f$	Vap. sat. $v_g$	Liq. sat. $u_f$	Evap. $u_{fg}$	Vap. sat. $u_g$	Liq. sat. $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Vap. sat. $h_g$	Liq. sat. $s_f$	Vap. sat. $s_g$	
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.194 44	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.177 53	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.163 33	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.151 25	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.140 84	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693

**Tabla A-6: Vapor de agua saturado- Presión  
Ing. Termodinámica (D. Burghart)**