

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL  
PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON  
CAPACIDAD PARA 50 kg DE MATERIAL VEGETAL

WILSON SALCEDO OYOLA  
EDWIN FERNANDO GALINDO COLLAZOS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2.007

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL  
PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON  
CAPACIDAD PARA 50 kg DE MATERIAL VEGETAL

WILSON SALCEDO OYOLA  
EDWIN FERNANDO GALINDO COLLAZOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2.007

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL  
PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON  
CAPACIDAD PARA 50 kg DE MATERIAL VEGETAL

WILSON SALCEDO OYOLA  
EDWIN FERNANDO GALINDO COLLAZOS

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Director  
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2.007

## DEDICATORIA

*A Dios, por el don maravilloso de la vida, por ser mi guía en cada uno de los caminos y metas que he emprendido en el transcurso de mi vida.*

*A mis padres, Rosalba y Marcos, por su apoyo incondicional, comprensión y sobre todo por creer siempre en la superación de sus hijos*

*A mi hermana Yuli por su comprensión y apoyo*

*A mi sobrino Alejandro para que se anime a estudiar una Ingeniería*

*A mi primo Iván García Salcedo, por su apoyo incondicional y excelente amigo.*

*A toda mi familia por compartir su vida conmigo y creer siempre en mí.*

**WILSON SALCEDO OYOLA**

## DEDICATORIA

*A Dios quien es mi guía y mi sustento cada día de mi vida, mi fortaleza, mi roca.*

*A mi mamá que esta en el cielo, por brindarme su inmenso amor, enorme esfuerzo y dedicación a cada segundo. Por su anhelo de ver a su hijo profesional.*

*A Edgar Castillo por sus consejos y enorme apoyo incondicional.*

*A mis hermanos Luz Dary, Edgar, Nelson, Yolima y Nancy por confiar en mí, por su constante apoyo y sustento incondicionales. Por quererme como un hijo.*

*A mis amigos y familiares por brindarme su compañía, apoyo y colaboración a cada momento.*

*Que Dios les bendiga.*

*Edwin Fernando Galindo Collazos.*

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos al Ingeniero Omar Gélvez Arocha, Director del proyecto por su asesoría y colaboración.

A la Doctora Elena Stashenko y al Doctor Jairo Rene Martínez, Codirectores del proyecto, por permitirnos ingresar a su equipo de trabajo.

A la Asociación de campesinos Morelia por su patrocinio.

Al Ingeniero Orlando Acuña por su amable asesoría y paciencia.

A todo el equipo de trabajo del Centro de Excelencia CENIVAM por su constante apoyo y colaboración.

A nuestro amigo Iván Darío Soto por su oportuna y constante colaboración a cada momento.

A nuestros amigos por brindarnos su ayuda y compañía a lo largo de toda la carrera.

A nuestros familiares por acogernos en sus hogares y ocasionarles tantas molestias.

A todas las personas que de una u otra forma nos colaboraron con la culminación de este proyecto, muchas gracias.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	25
1.1 OBJETIVOS GENERALES	25
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2. GENERALIDADES DE LOS ACEITES ESENCIALES	27
2.1 DEFINICIÓN	27
2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES	28
2.3 APLICACIONES DE LOS ACEITES ESENCIALES	28
2.4 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES	29
3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES	31
3.1 MÉTODOS DIRECTOS	31
3.2 DESTILACIÓN	32
3.2.1 Destilación con agua (hidrodestilación)	33
3.2.2 Destilación por arrastre con vapor	35
3.2.3 Destilación con agua-vapor	36
3.3 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES	37
3.4 EXTRACCIÓN CON CO <sub>2</sub> SUPERCRTICO	38
3.5 EXTRACCIÓN POR MICROONDAS	39
4. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN EQUIPO DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES	41
4.1 ALAMBIQUE	42
4.2 CUELLO DE CISNE	43
4.3 CONDENSADOR	43
4.4 SEPARADORES DE ACEITE ESENCIAL	46

4.5 FUENTE GENERADORA DE CALOR	47
4.6 COMBUSTIBLES	48
5. DISEÑO CONCEPTUAL	50
5.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	50
5.2 JUSTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE HIDRODESTILACIÓN Y AGUA-VAPOR	51
5.3 DIAGRAMA GENERAL DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS PROCESOS: DE HIDRODESTILACIÓN Y AGUA-VAPOR	52
5.3.1 Descripción del proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua-vapor	53
5.4 EVOLUCIÓN DEL DISEÑO	55
5.4.1 Primera alternativa de diseño	55
5.4.2 Segunda alternativa de diseño	56
5.4.3 Tercera alternativa de diseño	57
5.4.4 Alternativa final de diseño	57
6. DISEÑO, SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MÓVIL	59
6.1 RECINTO DE COMBUSTIÓN	59
6.1.1 Selección del combustible	59
6.1.2 Estructura de soporte	60
6.2 QUEMADOR DE GAS	62
6.2.1 Cálculo de la rata de calor requerida	63
6.2.2 Sistema de control	64
6.2.3 Circuito de control por temperatura	68
6.3 CUELLO DE CISNE	70
6.3.1 Descripción	70
6.3.2 Construcción	70
6.4 CONDENSADOR	72
6.4.1 Diseño térmico	74

6.4.2 Diseño mecánico y construcción	101
6.5 RECIPIENTE SEPARADOR O VASO FLORENTINO	110
6.5.1 Parámetros de diseño en el separador	111
6.5.2 Pasos para el diseño del separador o vaso florentino	111
6.5.4 Construcción	114
6.6 ALAMBIQUE	115
6.6.1 Consideraciones para el diseño del alambique	116
6.6.2 Pasos para el diseño del casco	117
6.6.3 Pasos para el diseño del fondo del casco	120
6.6.4 Pasos para el diseño de la tapa del casco	121
6.6.5 Pasos para el diseño de la canasta	123
6.6.7 Datos de salida	125
6.6.8 Empaquetaduras	126
6.6.9 Aislamiento del casco	127
6.6.10 Anillo de soporte para los ejes de giro	127
6.6.11 Eje	128
6.6.12 Semidisco y disco de giro del casco	129
6.6.13 Soporte	130
6.6.14 Trinquete	130
6.6.15 Accesorios	131
6.6.16 Conjunto del alambique	131
6.7 REMOLQUE	132
6.7.1 Bastidor	133
6.7.2 Cuerpo del remolque	134
6.7.3 Sistema de suspensión	135
Figura 57. Sistema de suspensión	137
6.7.4 Tren de soporte	139
6.7.5 Ruedas	139

6.7.6 Accesorios	141
6.7.7 Seguridad y prevención	143
6.8 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO FINAL	144
7. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO	146
7.1 MANTENIMIENTO DEL CUERPO DEL REMOLQUE	146
7.2 MANTENIMIENTO DE LOS ELEMENTOS EN CONTACTO DIRECTO CON EL MATERIAL VEGETAL, AGUA Y ACEITE ESENCIAL	146
7.3 MANTENIMIENTO DEL CONDENSADOR	146
7.4 MANTENIMIENTO DE LAS BALLESTAS	147
8. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	148
CONCLUSIONES	151
RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	154
ANEXOS	158

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Principales métodos de obtención de los aceites esenciales	31
Cuadro 2. Consumo de combustible para generar 100 kg de vapor/h (640.000 Kcal/h)	49
Cuadro 3. Proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua-vapor	53
Cuadro 4. Propiedades del gas natural en Colombia	60
Cuadro 5. Condiciones promedio del municipio de Bolívar (Santander)	62
Cuadro 6. Datos de proceso	75
Cuadro 7. Características de la tubería	76
Cuadro 8. Características de las aletas	77
Cuadro 9. Número de Tubos por Fila	78
Cuadro 10. Datos de entrada para el cálculo de la caída de presión	96
Cuadro 11. Datos de salida para el cálculo de la caída de presión	96
Cuadro 12. Proceso de solución y datos de salida	96
Cuadro 13. Características de la tubería	103
Cuadro 14. Características de las aletas	104
Cuadro 15. Principales características de los motores eléctricos	108
Cuadro 16. Características principales de las hélices	108
Cuadro 17. Datos de salida de recipiente separador	113
Cuadro 18. Datos de entrada para el diseño del casco	117
Cuadro 19. Densidades de las plantas a destilar	118
Cuadro 20. Datos de salida para el casco	125
Cuadro 21. Datos de salida para el fondo del casco	125
Cuadro 22. Datos de salida para la tapa del casco	126

Cuadro 23. Datos de salida para la canasta	126
Cuadro 24. Características de la empaquetadura	126
Cuadro 25. Características de hoja maestra	137
Cuadro 26. Características de las ruedas seleccionadas	140
Cuadro 27. Características del acople de enganche	141
Cuadro 28. Costos de construcción	148

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. El cultivo y sus técnicas, procesado agroindustrial	30
Figura 2. Proceso de destilación	32
Figura 3. Destilación con agua (hidrodestilación)	34
Figura 4. Destilación por arrastre con vapor	36
Figura 5. Destilación Agua-vapor	37
Figura 6. Extracción por microondas	39
Figura 7. Componentes de un equipo tradicional para la extracción de aceites esenciales	41
Figura 8. Casco o alambique	42
Figura 9. Condensadores enfriados por agua	45
Figura 10. Condensador enfriado por aire	45
Figura 11. Separadores o vasos florentinos	46
Figura 12. Quemador de ACPM	47
Figura 13. Caldera que utiliza un quemador a gas natural	48
Figura 14. Diagrama general de entradas y salidas de los procesos: de hidrodestilación y agua-vapor	52
Figura 15. Esquema del proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua- vapor	54
Figura 16. Primera alternativa de diseño	55
Figura 17. Segunda alternativa de diseño	56
Figura 18. Tercera alternativa de diseño	57
Figura 19. Alternativa final de diseño	58
Figura 20. Estructura de soporte	61

Figura 21. Quemador de gas	63
Figura 22. Componentes principales de un control Unitrol 110 SR	66
Figura 23. Principales componentes del sistema de control	67
Figura 24. Circuito de control por temperatura a bajo voltaje	69
Figura 25. Sección rígida del cuello de cisne	71
Figura 26. Sección flexible del cuello de cisne	72
Figura 27. Configuración de flujo	74
Figura 28. Geometría del arreglo	77
Figura 29. Resistencia térmica	83
Figura 30. Arreglo geométrico con tubos circulares y aletas de superficie plana	85
Figura 31. Arreglo tubular hexagonal	90
Figura 32. Diagrama del factor de corrección F	91
Figura 33. Diagrama de temperaturas para el cálculo de la LMTD	92
Figura 34. Serpentín de condensación	95
Figura 35. Máquina cortadora de tubos	104
Figura 36. Maquina ensambladora	105
Figura 37. Máquina laminadora	105
Figura 38. Laboratorio para prueba de fugas	106
Figura 39. Cuerpo o panal construido	107
Figura 40. Construcción y montaje final del condensador de vapor	109
Figura 41. Diferentes formas de separadores de aceites esenciales	110
Figura 42. Forma propuesta para el recipiente separador	112
Figura 43. Recipiente separador construido	115
Figura 44. Casco	118
Figura 45. Fondo del casco	120
Figura 46. Tapa del casco	122
Figura 47. Canasta	123
Figura 48. Ganchos de cierre	124

Figura 49. Aislamiento del casco	127
Figura 50. Fuerzas ejercidas sobre el eje	128
Figura 51. Esfuerzos en el eje	128
Figura 52. Semidisco y disco de giro del casco	129
Figura 53. Soporte del casco	130
Figura 54. Trinquete	131
Figura 55. Elementos del alambique	132
Figura 56. Cuerpo del remolque	135
Figura 57. Sistema de suspensión	137
Figura 58. Remolque construido con sus principales componentes	142
Figura 59. Equipo final construido	145

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Diámetro y longitud para el casco	119

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Propiedades del acero austenítico AISI 304	159
Anexo B. Propiedades de las láminas hot rolled	160
Anexo C. Propiedades de las láminas alfajor o antideslizantes	161
Anexo D. Lana en fibra de vidrio para aislamiento térmico	162
Anexo E. Propiedades del agua saturada	164
Anexo F. Propiedades del aire a la presión de 1 atm	165
Anexo G. Norma americana unificada	166
Anexo E. Planos	166

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON CAPACIDAD PARA 50 kg DE MATERIAL VEGETAL.\*

### **AUTORES:**

EDWIN FERNANDO GALINDO COLLAZOS.

WILSON SALCEDO OYOLA.\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Diseño, construcción, hidrodestilación, aceites esenciales, plantas aromáticas.

### **DESCRIPCIÓN:**

Con la realización de este proyecto de grado se buscó diseñar y construir un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales por los métodos de hidrodestilación y agua vapor con capacidad para procesar 50 kg de material vegetal, que funcionará en la zona alta de los municipios del Peñón y Bolívar en el departamento de Santander, con el propósito de que la Asociación de Campesinos MORELIA obtenga los aceites esenciales para el inicio del desarrollo de esta agroindustria como alternativa económica para las comunidades de la región y su extensión a otras, en diversas regiones del país. Con la adecuada capacitación y asesoría técnica por parte del Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM) en labores técnicas de cultivo y extracción de aceites esenciales y con el posterior uso de este sistema móvil.

Inicialmente se estableció la capacidad del destilador, la cual se definió aproximadamente en 50 kg, luego se determinó la cantidad de calor a suministrar en el proceso; después, evaluando la disponibilidad de combustible en esta zona, se escogió el gas natural como combustible a emplear; teniendo esto se procedió a seleccionar el quemador de combustible y a diseñar el soporte del quemador.

Posteriormente se hizo el diseño del alambique con su respectivo cuello de cisne, teniendo en cuenta condiciones de capacidad, temperatura, materiales, presión, etc. Se realizaron los correspondientes cálculos térmicos para diseñar la unidad de condensación compacta con su sistema de refrigeración por aire. Se continuó con el diseño del recipiente separador o vaso florentino, para la separación de la solución agua-aceite. Una vez conocidas las dimensiones y características de los diferentes elementos, se diseñó la estructura móvil en donde se haría el montaje de los elementos para conformar el sistema móvil el cual además poseería características de remolque obteniéndose así finalmente un equipo funcional, seguro y relativamente económico.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez Arocha.

## SUMMARY

### TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MOVABLE SYSTEM FOR THE ESSENTIAL OILS EXTRACTION WITH CAPACITY FOR 50 kg OF VEGETAL MATERIAL.\*

### AUTHORS:

EDWIN FERNANDO GALINDO COLLAZOS.

WILSON SALCEDO OYOLA.\*\*

### KEY WORDS:

Design, construction, hydrodestilation, essential oils, aromatic plants.

### DESCRIPTION:

With the accomplishment of this project of degree we looked for to design and to construct to a movable system for the extraction of essential oils by the hydrodestilation methods and water steam with capacity to process 50 kg of vegetal material that it will work in the high zone of the municipalities of Peñon and Bolivar in the department of Santander, in order that the Association of Farmers MORELIA obtains essential oils for the beginning of the development of this agroindustry like economic alternative for the communities of the region and their extension to others, in diverse regions of the country. With the suitable qualification and technical consultant's office of the National Research Center for Agroindustrialization of Tropical Aromatic and Medicinal Species (CENIVAM) in technical workings of culture and essential oil extraction and with the later use of this movable system.

Initially the capacity of the distiller, which defined itself approximately in 50 kg, soon the amount of heat was determined to provide in the process; later, evaluating the fuel availability in this zone, the natural gas like fuel was chosen to use; having this it was come to select the fuel burner and to design the support of the burner.

Later the alembic design was made with its respective neck of swan, considering conditions of capacity, temperature, materials, pressure, etc. The corresponding thermal calculations were made to design the unit of compact condensation with their system of air cooling. It was continued with the design of the separating container or florentino glass, for the separation of the solution water-oil. Once known the dimensions and characteristics the different elements, the movable structure was designed in where the assembly would be made of the elements to conform the movable system which in addition would have two characteristics thus obtaining itself finally a functional equipment, safe, and relatively economic.

---

\*Degree project.

\*\*Physical-mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Gélvez A.

## INTRODUCCIÓN

El incremento acelerado de la población y la globalización de la economía a nivel mundial, hace que muchos países tiendan a buscar nuevas alternativas de desarrollo económico.

Una alternativa es la búsqueda de nuevas materias primas, siendo la agroindustria de los aceites esenciales una excelente opción debido a la gran demanda por parte de las industrias alimenticia, licorera, farmacéutica, agroquímica, tabacalera, perfumera-cosmética, etc., para cubrir las crecientes necesidades creadas por una sociedad que busca una mejor calidad de vida.

En Colombia, generalmente las industrias que utilizan los aceites esenciales como materia prima para la manufactura de sus productos (fármacos, alimentos, licores, aromatizantes, saborizantes, insecticidas, fungicidas, cosméticos, perfumes, etc.), recurren es a la importación de estos aceites en su gran mayoría producidos artificialmente ya que el país carece de un desarrollo industrial o tecnológico adecuado en esta área para satisfacer la demanda.

Frente a esta situación, la industria de los aceites esenciales se convierte en una excelente alternativa económica en Colombia al contar con suficientes y adecuadas tierras para el cultivo de plantas aromáticas y medicinales, y con la experiencia agrícola necesaria para su cuidado. Las zonas agrícolas colombianas presentan diferencias altitudinales, lo cual se puede aprovechar para originar nuevas calidades de aceites esenciales, dependientes del origen geográfico, lo que los

transforma en productos con escasa competencia. Colombia es un país con una ubicación geográfica estratégica que le proporciona ventajas comerciales que se pueden aprovechar porque hay un interés mundial por el uso de productos aromáticos naturales, con gran demanda por países industrializados como Estados Unidos, la Unión Europea y Japón, con un alto potencial de comercialización en el mercado mundial.

Para lograr esto es necesario realizar investigación dentro de un marco de desarrollo social, económico y ambiental, identificando necesidades tecnológicas con el fin de consolidar una alternativa económica para las personas interesadas en hacer parte de la naciente industria de los aceites esenciales, para obtener productos competitivos en el mercado nacional e internacional.

El presente trabajo hace parte de la línea de investigación en el área de transferencia de tecnología que adelanta el Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM), el cual tiene como objetivo la generación de conocimiento en diferentes áreas de la cadena productiva de aceites esenciales y derivados de extractos de plantas aromáticas y medicinales<sup>1</sup>. Como parte de esta área de investigación se ha contemplado la construcción de plantas piloto para la extracción de aceites esenciales, así como brindar asesoría técnica y científica a los pequeños y grandes cultivadores, a microempresarios, como también a las asociaciones campesinas que estén interesadas en la cadena productiva de los aceites esenciales.

El propósito de este trabajo de grado es el diseño y construcción de un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales mediante los métodos de hidrodestilación y agua vapor, con capacidad para procesar 50 kg de material vegetal de las especies seleccionadas, que hace parte del proyecto «proceso de

---

<sup>1</sup><http://cenivam.uis.edu.co/infraestructura/líneas.html>.

producción de plantas aromáticas medicinales, como alternativa de diversificación de la producción en la zona alta de los municipios de Bolívar y el Peñón» que lideran la Asociación de campesinos MORELIA y el CENIVAM como asesor técnico y científico para la producción de plantas aromáticas y obtención de los aceites esenciales.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado serán de gran significado como apoyo para la creciente industria de aceites esenciales en nuestro país, ya que se logran suplir algunas necesidades tecnológicas y científicas, importantes para la obtención de los aceites esenciales a pequeña y mediana escala. Además se ofrece una alternativa para satisfacer las necesidades socioeconómicas fundamentales de pequeños y medianos empresarios, asociaciones y cooperativas campesinas.

## 1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.1 OBJETIVOS GENERALES

- Continuar con la misión de la Universidad Industrial de Santander de participar activamente en un proceso de cambio para el progreso y mejor calidad de vida de las comunidades, mediante el apoyo al desarrollo de la agroindustria de los aceites esenciales como alternativa para satisfacer las necesidades socioeconómicas fundamentales de pequeños empresarios, asociaciones y cooperativas campesinas.
- Generar y adecuar conocimientos para fortalecer el desarrollo de la agroindustria de los aceites esenciales en Colombia mediante el trabajo que involucra varias áreas del conocimiento.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales por el método de hidrodestilación con capacidad para 50 kg de material vegetal de las siguientes plantas aromáticas y medicinales : albahaca (*Ocimum basilicum*), hierbabuena (*Mentha piperita*), poleo (*Satureja brownei*), toronjil (*Melissa officinalis*), manzanilla común (*Chamomilla recutita*), prontoalivio (*Lippia alba*), cidrón (*Lippia citriodora*), estragón francés (*Tagetes lucida*); que funcionará en la zona alta de los municipios del Peñón y Bolívar en el departamento de Santander, el cual comprende el diseño térmico, mecánico, construcción y/o selección de los siguientes equipos:

- Diseñar y construir un alambique con capacidad para procesar 50 kg de material vegetal de cualquiera de las siguientes plantas aromáticas y medicinales: albahaca (*Ocimum basilicum*), hierbabuena (*Mentha piperita*), poleo (*Satureja brownei*), toronjil (*Melissa officinalis*), manzanilla común (*Chamomilla recutita*), prontoalivio (*Lippia alba*), cidrón (*Lippia citriodora*), estragón francés (*Tagetes lucida*).
- Diseñar y construir el equipo de condensación con sistema de enfriamiento por aire para recuperar una solución agua-aceite líquida.
- Diseñar y construir el recipiente separador o vaso florentino que permita extraer el aceite de la solución agua-aceite.
- Diseñar y construir la estructura móvil para el montaje y transporte de los elementos necesarios para el proceso de extracción del aceite.
- Seleccionar los materiales a utilizar para la construcción de los diferentes equipos.
- Seleccionar los accesorios requeridos para el funcionamiento del sistema móvil (quemador de combustible, válvulas, tubería, termocuplas, manómetros, acoples, etc.).
- Elaborar los planos de cada uno de los elementos diseñados utilizando una herramienta CAD (Solid edge y/o Autocad).
- Suministrar el presupuesto que incluye el diseño, la construcción y el montaje de los elementos del sistema móvil.

## 2. GENERALIDADES DE LOS ACEITES ESENCIALES

### 2.1 DEFINICIÓN

Los aceites esenciales son una mezcla de componentes volátiles, producto del metabolismo secundario de las plantas<sup>2</sup>. Las esencias o aceites esenciales son una mezcla compleja de sustancias aromáticas responsable de las fragancias de las flores y otros órganos vegetales. Poseen numerosas acciones farmacológicas, son ampliamente utilizados en perfumería y cosmética, en la industria farmacéutica y en la industria de la alimentación, licorería y confitería<sup>3</sup>.

Se les llama aceites por su apariencia física y consistencia que es bastante parecida a los aceites grasos, pero se distinguen de ellos, porque al dejar caer unas gotas de esencia sobre el papel, éstas se volatilizan fácilmente sin dejar ninguna huella ni mancha grasosa.

Los aceites esenciales se encuentran muy difundidos en el reino vegetal y se pueden encontrar localizados en diferentes partes de la planta, por ejemplo: en las hojas (albahaca, mejorana, menta, romero, salvia, etc.), en las raíces (cálamo, valeriana, vetiver, etc.), en la corteza (canela, cedro, sándalo, etc.), en las flores (jazmín, rosa, ylang-ylang, etc.), en la cáscara del fruto (limón, mandarina, naranja, etc.), en los frutos (anís, cardamomo, eneldo, hinojo, etc.).

---

<sup>2</sup>GIL, Edinson y SAEZ, Alex. Evaluación a escala de planta piloto del proceso industrial para la obtención de aceite esencial de cardamomo, bajo la filosofía «cero emisiones». Medellín. Universidad EAFIT. Grupo de Investigación Procesos Ambientales y Biotecnológicos. Mayo de 2005. Documento 30-052005. p 3.

<sup>3</sup><http://www.doymafarma.com/doyma.html>.

En ocasiones las diferentes partes de la misma planta suministran esencias distintas en su composición como, por ejemplo, los aceites extraídos de la raíz, el tallo y las hojas del hinojo. La canela de Ceilán encierra en la corteza una esencia rica en el aldehído cinámico, mientras que en sus hojas y en las raíces predominan el eugenol y el alcanfor, respectivamente. La cantidad y composición del aceite varía de una especie a otra, y dentro de los mismos géneros de la planta<sup>4</sup>.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES**

Los aceites esenciales, en general, constituyen del 0,1 al 1% del peso seco de la planta. Son líquidos con escasa solubilidad en agua, solubles en alcoholes y en disolventes orgánicos. La mayoría de los aceites son menos densos que el agua (salvo excepciones como los aceites esenciales de canela, sazafrán y clavo) y con un alto índice de refracción<sup>5</sup>.

Por lo general no son oleosos al tacto. Pueden agruparse en cinco clases, dependiendo de su estructura química: alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas y lactonas y óxidos.

## **2.3 APLICACIONES DE LOS ACEITES ESENCIALES**

Actualmente se han analizado más de tres mil aceites esenciales de un gran número de especies botánicas. Más de doscientos aceites tienen un alto valor comercial y se utilizan ampliamente en diferentes ramas de la industria (alimentos, jabones, ambientadores, perfumes, cosméticos, licores, insecticidas, fármacos, etc.). Las esencias naturales son empleadas como aromatizantes (anís, cardamomo, clavo, menta, tomillo, naranja, etc.) y/o saborizantes (anís, eneldo, hinojo, limón,

---

<sup>4</sup>GIL, Op. Cit., p. 3.

<sup>5</sup><http://www.doymafarma.com/doyma.html>.

naranja, etc.), como ingredientes de algunos preparados farmacéuticos (caléndula, eucalipto, manzanilla, menta, salvia, etc.) o son base de perfumes y productos cosméticos finos (albahaca, geranio, jazmín, salvia, rosa, ylang-ylang, etc.), desodorantes, lociones, jabones líquidos (orégano, salvia, hierbabuena, etc.), pastas dentífricas (anís, eucalipto, menta, orégano, tomillo, etc.). Algunos de los aceites esenciales poseen propiedades insecticidas y fungicidas (ajenjo, citronela, ciprés, enebro, eucalipto, pino, etc.)<sup>6</sup>.

En relación directa con los aceites esenciales ha surgido la denominada aromaterapia, que es una disciplina dentro de la medicina natural que emplea básicamente aceites esenciales en sus tratamientos<sup>7</sup>.

El valor comercial y el uso del aceite esencial dependen básicamente de su composición química, la cual a su vez está condicionada por diversos factores de tipo botánico, ambiental y agrícola. La composición final del aceite depende fuertemente del método de extracción<sup>8</sup>.

## **2.4 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES**

Una vez determinada la zona de cultivo y su superficie, se procede a determinar las especies y áreas correspondientes a implantar de acuerdo con criterios técnicos y socio económicos, para mejor aprovechamiento de la mano de obra, maquinaria, secadero, destilería, disminuyendo así los costos de producción.

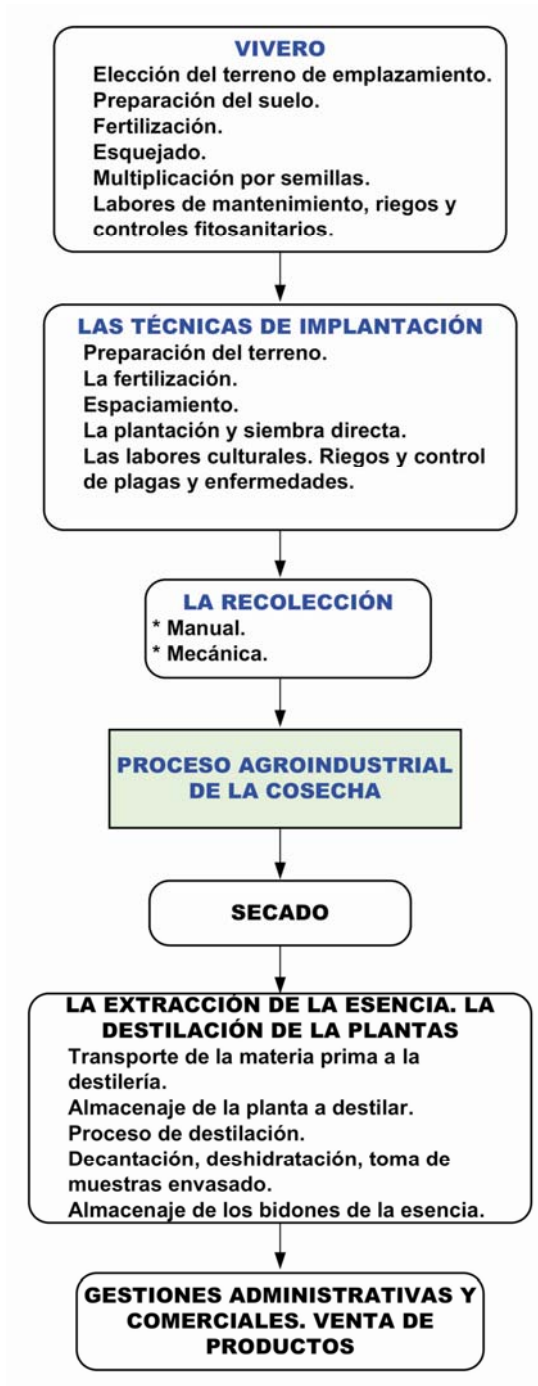
---

<sup>6</sup>GIL, Op. Cit., p. 6-7.

<sup>7</sup><http://www.doymafarma.com/doyma.html>.

<sup>8</sup>GIL, Op. Cit., p. 7.

Figura 1. El cultivo y sus técnicas, procesado agroindustrial.



Fuente: autores del proyecto.

### 3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

Para la obtención de los aceites esenciales a partir de plantas aromáticas se emplean diferentes técnicas de extracción, como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Principales métodos de obtención de los aceites esenciales.**

MÉTODOS DE OBTENCIÓN	TIPOS
DIRECTOS	1. Compresión de cáscara.
	2. Raspado de cáscara.
	3. Lesiones mecánicas de la corteza.
DESTILACIÓN	1. Destilación con agua (hidrodestilación).
	2. Destilación por arrastre con vapor.
	3. Destilación con agua-vapor.
EXTRACCIÓN	1. Extracción con solventes.
	2. Extracción con CO <sub>2</sub> supercrítico.
	3. Extracción por microondas.

Fuente: autores del proyecto.

#### 3.1 MÉTODOS DIRECTOS

Los métodos directos se aplican principalmente a los cítricos. Las siguientes etapas ocurren durante la extracción del aceite esencial por este método: 1) laceración de la epidermis y de las celdas que contiene la esencia, 2) creación en la cáscara de áreas con presión mayor que sus circundantes por las que circula el aceite al exterior y 3) abrasión de la cáscara<sup>9</sup>.

---

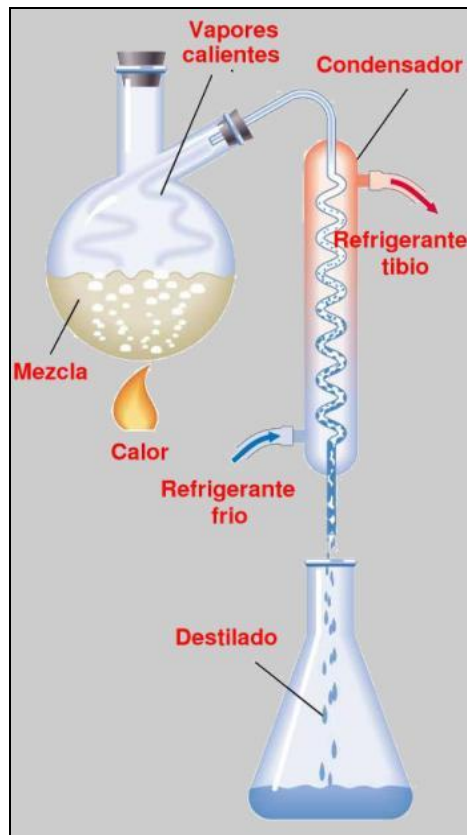
<sup>9</sup>GARCES, Ana y LOZADA Ingrid. Diseño básico de un proceso para la obtención de aceites esenciales de plantas aromáticas cultivadas en el pacífico colombiano. Medellín. 2003. Trabajo de grado (Ingeniero de procesos). Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de procesos. p. 30.

### 3.2 DESTILACIÓN

La destilación de las plantas aromáticas consiste en separar o arrastrar, por medio de vapor de agua, los aceites esenciales que contienen las partes de la planta sometidas a este proceso, enfriando luego este vapor para reducirlos nuevamente a líquidos. Es el procedimiento más antiguo y difundido para la obtención de aceites esenciales, debido a su bajo costo y simplicidad de equipo (figura 2).

Industrialmente la destilación se realiza principalmente de tres formas: destilación con agua (hidrodestilación), destilación por arrastre con vapor y destilación agua vapor.

**Figura 2. Proceso de destilación.**



Fuente: <http://www.sabelotodo.org>.

**3.2.1 Destilación con agua (hidrodestilación).** El principio de la destilación en agua es llevar a estado de ebullición una suspensión acuosa de un material vegetal aromático, de tal manera que los vapores generados puedan ser condensados y colectados. El aceite, que es inmiscible en agua, es posteriormente separado. Este sistema de extracción es particularmente empleado en zonas rurales que no cuentan con instalaciones auxiliares para la generación de vapor<sup>10</sup>.

En la destilación con agua el material vegetal siempre debe encontrarse en contacto con el agua, la cual se lleva a ebullición por medio de una fuente de calor, que puede consistir en la combustión de carbón, leña, ACPM, o gas. Usar electricidad resulta muy costoso para producir vapor<sup>11</sup>. Un factor de especial importancia a considerar es el de que, si el calentamiento del alambique es con fuego directo, el agua presente en el alambique deberá ser suficiente y permanente para llevar a cabo toda la destilación a fin de evitar el sobrecalentamiento y carbonización del material vegetal, dado que este hecho provoca la formación de olores desagradables en el producto final.

Este método es útil cuando el material vegetal tiende a aglomerarse mientras el vapor pasa a través de él.

Una ventaja adicional es que el costo involucrado para la fabricación del equipo es de los más bajos comparativamente entre los métodos enunciados<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup>BANDONI, Arnaldo. Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. 2000. p. 156-157.

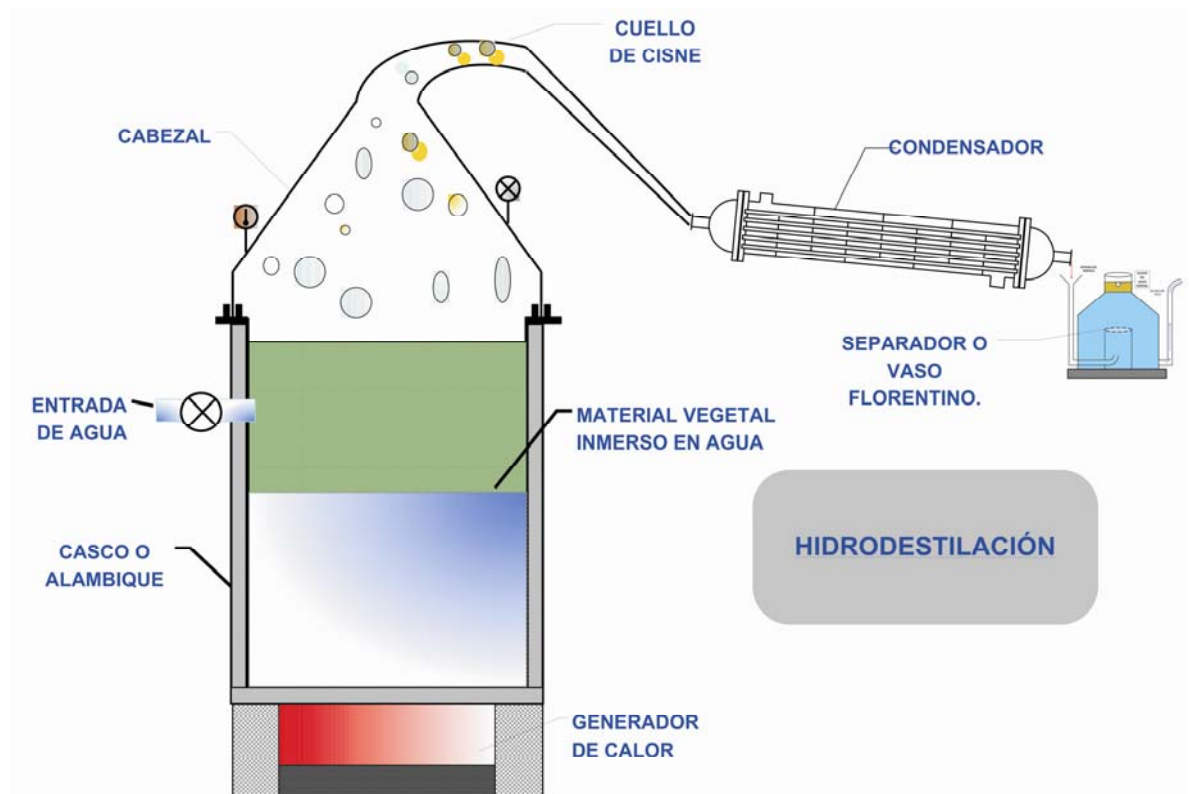
<sup>11</sup>Documentos emitidos por el CENIVAM.

<sup>12</sup>BANDONI, Op. Cit., p. 156-157.

La hidrodestilación es el procedimiento de extracción requerido para las flores de rosa, o de ylang-ylang y para ciertos materiales vegetales leñosos, como la canela y el sándalo<sup>13</sup>.

En la figura 3 se muestra un equipo tradicional de un proceso de destilación por hidrodestilación.

**Figura 3. Destilación con agua (hidrodestilación).**



Fuente: autores del proyecto.

<sup>13</sup>Documentos emitidos por el CENIVAM.

**3.2.2 Destilación por arrastre con vapor.** La destilación por arrastre con vapor que se emplea para extraer los aceites esenciales es una destilación de mezcla de dos líquidos inmiscibles y consiste, en resumen, en una vaporización a temperaturas inferiores a las de ebullición de cada uno de los componentes volátiles por efecto de una corriente directa de vapor de agua, el cual ejerce la doble función de calentar la mezcla hasta su punto de ebullición y disminuir la temperatura de ebullición por adición de la tensión de vapor del vapor que se inyecta, a la de los componentes volátiles de los aceites esenciales. El vapor húmedo o seco se produce por separado en una caldera y se inyecta por la parte inferior del recipiente que contiene el material vegetal. Los vapores que salen del cuello de cisne se enfrían en un condensador donde regresan a la fase líquida, los dos productos inmiscibles, agua y aceite esencial y finalmente se separan en el vaso florentino o separador<sup>14</sup>.

La ventaja de este tipo de destilación es que es relativamente rápida, consume menos energía y causa menos transformaciones químicas a los componentes lábiles o reactivos de los aceites esenciales<sup>15</sup>.

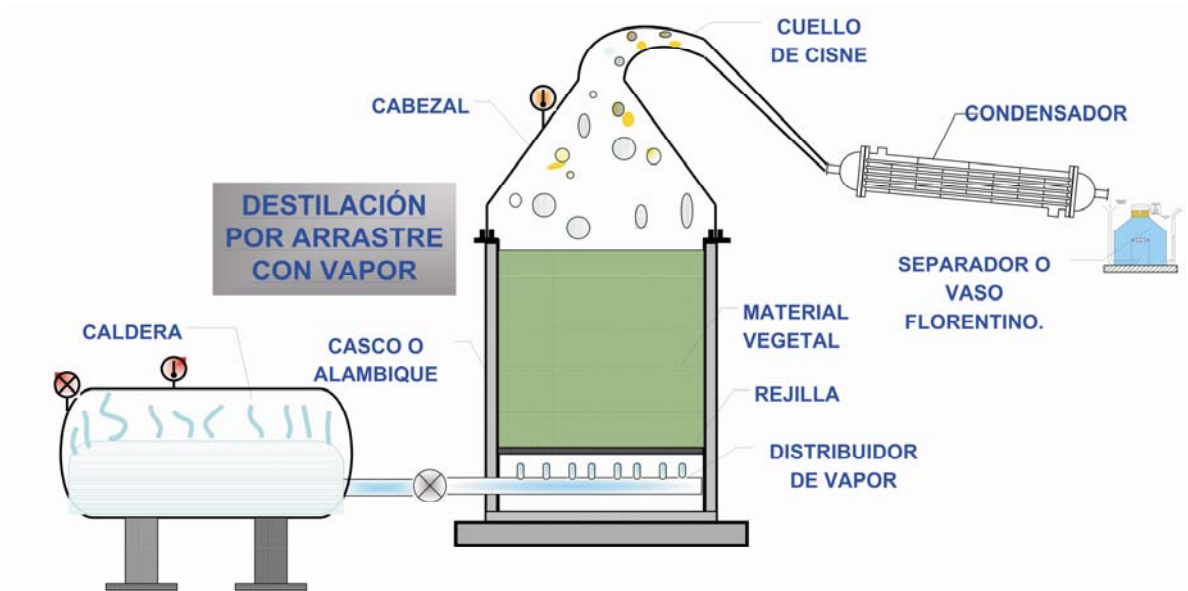
En la figura 4 se muestra un equipo tradicional de un proceso de destilación por arrastre con vapor.

---

<sup>14</sup>BANDONI, Op. Cit., p.158-162.

<sup>15</sup>Documentos emitidos por el CENIVAM.

**Figura 4. Destilación por arrastre con vapor.**



Fuente: autores del proyecto.

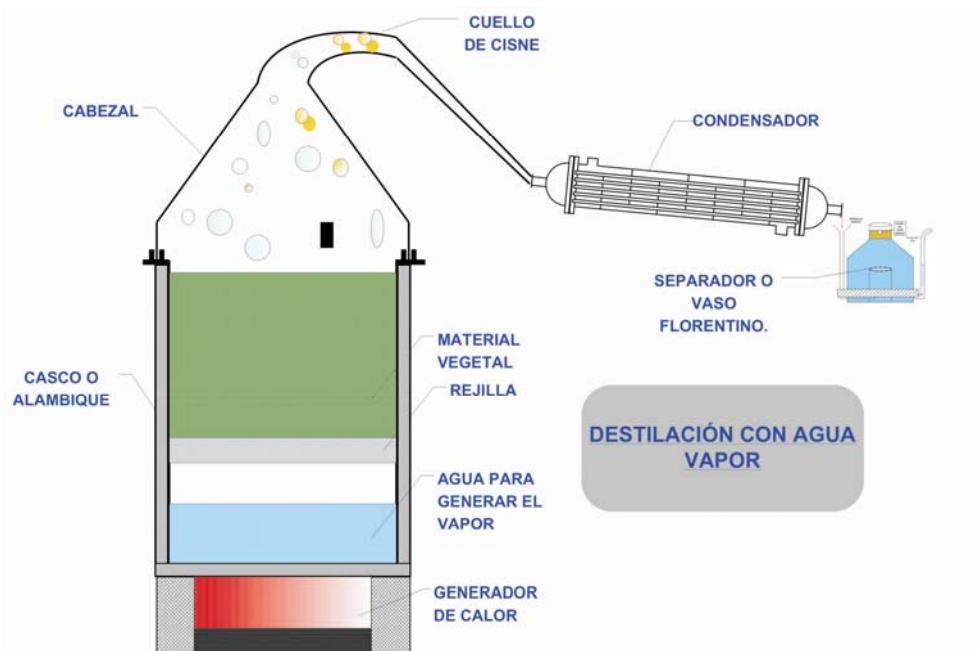
**3.2.3 Destilación con agua-vapor.** En este caso el vapor puede ser generado mediante una fuente externa o dentro del propio cuerpo del alambique, aunque separado del material vegetal. La diferencia radical existente entre estos sistemas y el anteriormente mencionado es que el material vegetal se encuentra suspendido sobre un tramado, rejilla o grilla (falso fondo) que impide el contacto del material vegetal con el medio líquido en ebullición. Este sistema reduce la capacidad neta de carga de materia prima dentro del destilador pero mejora la calidad del aceite obtenido.

Si la cantidad de agua contenida en el alambique no es suficiente para sostener el proceso de destilación, es conveniente utilizar un sistema de cohobación a través

del cual, el agua ya condensada es retornada al cuerpo del alambique para volver a ser calentada<sup>16</sup>.

En la figura 5 muestra un equipo tradicional de un proceso de destilación vapor-agua.

**Figura 5. Destilación Agua-vapor.**



Fuente: autores del proyecto.

### 3.3 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES

Consiste en sumergir la planta en solvente y por medio de agitación disolver los aceites volátiles de la planta. El solvente se elimina luego a baja presión obteniéndose un producto de consistencia cerosa llamado concreto.

<sup>16</sup>BANDONI, Op. Cit., p.162-163.

La técnica de extracción con solventes (éter de petróleo, pentano, éter etílico, etc.) permite obviar estos inconvenientes, al trabajar a temperaturas bajas sin alterar la composición “original” del aceite. Sin embargo, esta técnica es costosa, contaminante, presenta dificultades en aislamiento completo del solvente y además algunas sustancias como ácidos grasos, ceras, pigmentos y otros pueden ser coextraídos con el aceite. Frecuentemente la maceración con solventes orgánicos se usa particularmente para la obtención de los componentes individuales, y más a menudo, como etapa previa a la de arrastre con vapor.

### **3.4 EXTRACCIÓN CON CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO**

Es un método experimental muy costoso que consiste en aprovechar la solubilidad del CO<sub>2</sub> en los compuestos aromáticos haciendo pasar una corriente del gas por el material vegetal sometido a altas presiones y bajas temperaturas.

El método de extracción con fluidos supercríticos presenta múltiples ventajas (alto rendimiento, ecológicamente limpio, fácil retiro y reciclaje del solvente, bajas temperaturas de extracción, sin alteración química del aceite).

El método se basa en que los aceites esenciales son completamente miscibles con el CO<sub>2</sub> líquido y su solubilidad es variable dentro de la región supercrítica.

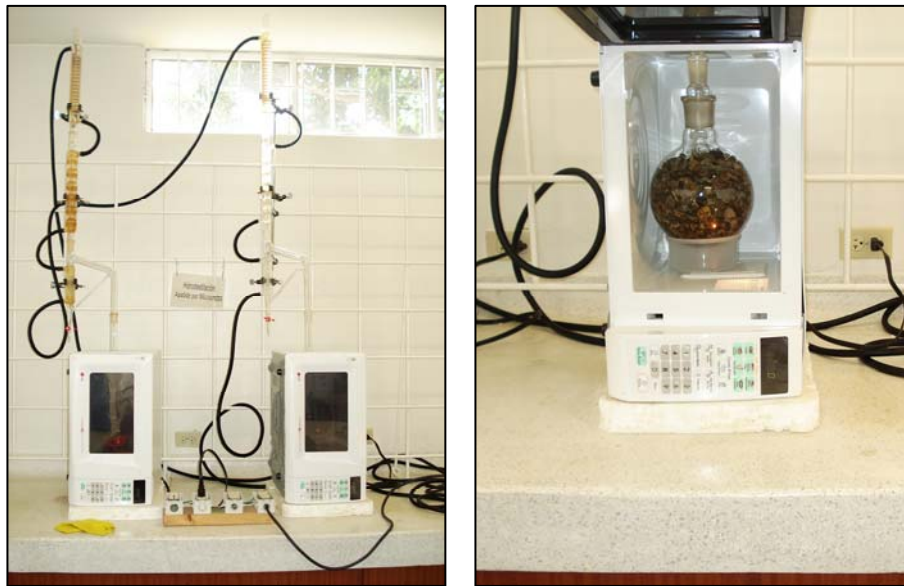
La extracción con fluidos supercríticos presenta muchas opciones para lograr y controlar la selectividad deseada, la cual es bastante sensible a variaciones en la presión, la temperatura y el tipo de solvente (CO<sub>2</sub>, Propano). Entre otras ventajas sobre las técnicas de extracción convencionales se encuentran el bajo riesgo de incendio y la baja contaminación ambiental. Dentro de las desventajas figuran el

alto costo de la inversión inicial y la extracción preferencial de sustancias oxigenadas<sup>17</sup>.

### 3.5 EXTRACCIÓN POR MICROONDAS

A escala de laboratorio es el método de obtención de aceites esenciales más utilizado. (Figura 6).

**Figura 6. Extracción por microondas.**



Fuente: autores del proyecto.

Esta técnica consiste en aprovechar el mismo proceso de los hornos a microondas caseros, es decir de calentar el agua contenida en el material vegetal, que a su vez esta inmerso en un disolvente «transparente» a las microondas, como pueden ser el  $\text{Cl}_4\text{C}$ , el hexano o el tolueno. Al aumentar la temperatura del medio, se rompen las estructuras celulares que contienen a la esencia por efecto de su presión de vapor. La esencia es así liberada y disuelta en el disolvente presente en el medio. La

---

<sup>17</sup>GIL, Op. Cit., p. 9-10.

principal ventaja de esta técnica es su velocidad, pues pueden lograrse extracciones en minutos, cuando comparativamente una técnica tradicional como la hidrodifusión necesita varias horas<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup>BANDONI, Op. cit., p.168.

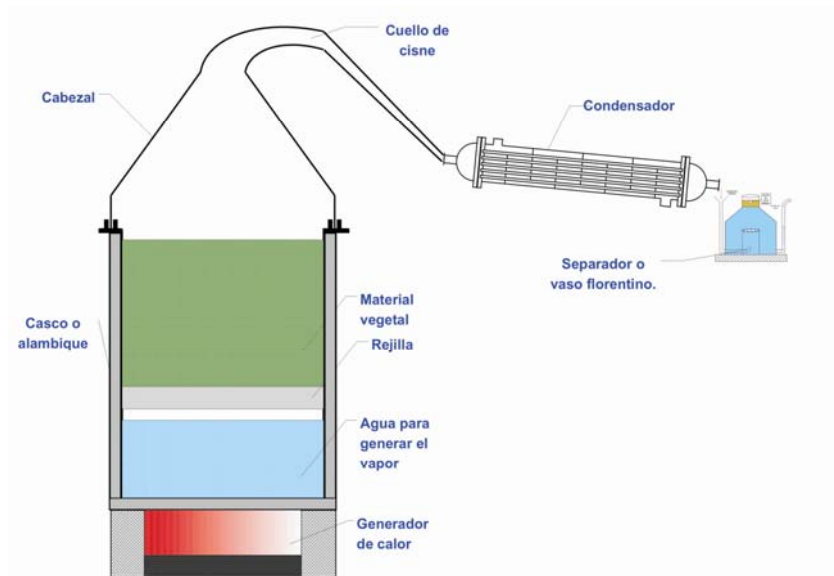
#### 4. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN EQUIPO DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

Un equipo de destilación consta de los siguientes elementos básicos:

- Alambique.
- Cuello de cisne.
- Condensador.
- Separador o vaso florentino.
- Fuente generadora de calor.

Un equipo tradicional de extracción de aceites esenciales se muestra en la Figura 7.

**Figura 7. Componentes de un equipo tradicional para la extracción de aceites esenciales.**



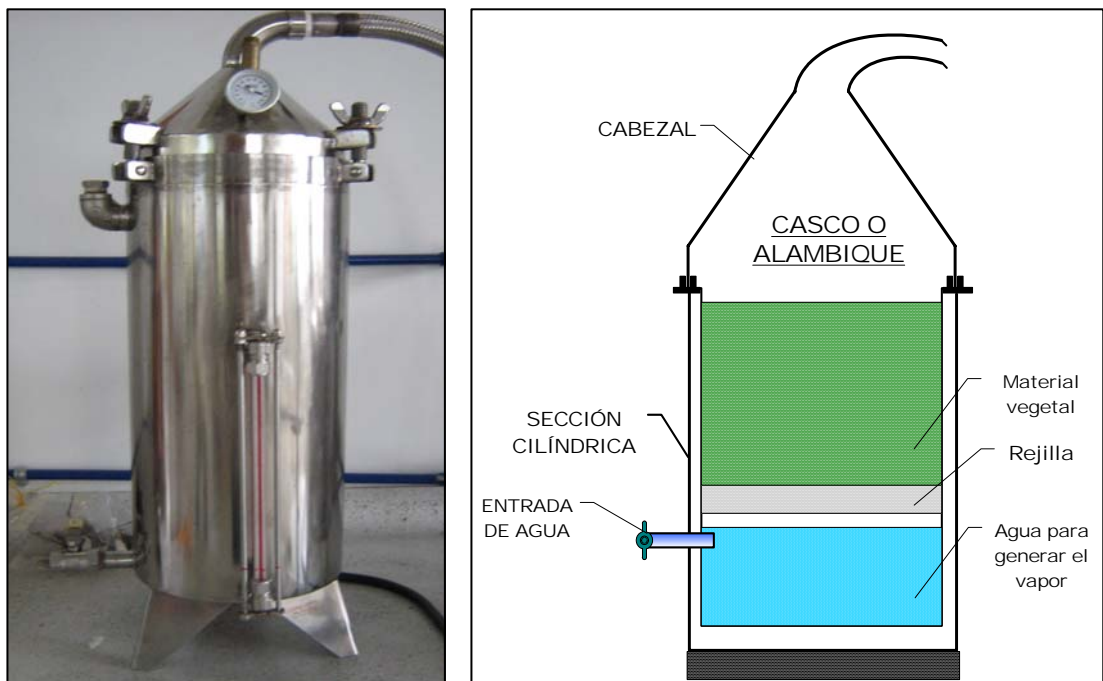
Fuente: autores del proyecto.

## 4.1 ALAMBIQUE

El alambique es el componente principal de un equipo de extracción mediante arrastre con vapor, hidrodestilación y agua-vapor. Es aquí donde se realiza la extracción del aceite. Ver figura 8.

Las condiciones a las que se opere el alambique (presión, temperatura, flujo de vapor, altura del lecho de material vegetal, etc.) son muy importantes para realizar una extracción adecuada.

**Figura 8. Casco o alambique.**



Fuente: autores del proyecto.

## **4.2 CUELLO DE CISNE**

El cuello de cisne es el conducto que comunica la tapa del alambique con el condensador. Por dentro del cuello de cisne circula la mezcla de vapor de agua y aceite esencial.

Pueden fabricarse con diseño «cónico» y en ocasiones con diseño «recto». El cuello de cisne debe ser fácilmente desmontable, por lo que de preferencia se utilizan sistemas de juntas «rápidas » (p ej. Juntas clamp o charnelas) y sobre todo teniendo en cuenta que cada vez que se cargue o descargue del alambique con material vegetal debe desconectarse el cuello de cisne del condensador y en ocasiones de la misma tapa del alambique. Es preferible utilizar en las juntas del cuello de cisne empaques de teflón que permiten un buen sellado, además de ser inertes ante los vapores de agua y de aceite esencial.

## **4.3 CONDENSADOR**

En la condensación de vapores se puede utilizar varios tipos de condensadores, para los cuales es necesario considerar los espacios disponibles en el lugar de instalación del equipo de extracción, así como la posición de los separadores de aceite.

Uno de los condensadores utilizados es el que consta de serpentín y cámara de expansión. En este tipo de condensador se alimenta la mezcla de vapores a una cámara de expansión donde se obtiene la mayor parte de los condensados. Estos van descendiendo a la parte baja del condensador.

El serpentín y la cámara de expansión se colocan dentro de un tanque de contención de agua de enfriamiento, la cual deberá estar circulando para aumentar el coeficiente de transferencia de calor. El agua fría que se utiliza para la condensación se alimenta en la parte inferior del tanque de contención y se descarga por la parte superior del mismo (figura 9). Se debe tener cuidado ya que tanto el serpentín como la cámara de expansión deben permanecer constantemente sumergidos en el agua de enfriamiento.

Con el fin de no hacer un gasto excesivo de agua, se recomienda utilizar una torre de enfriamiento para recircular la misma.

Otro condensador utilizado es el de carcasa y tubos que, si bien es más eficiente térmicamente que el diseño anterior, su fabricación es más costosa. Otra ventaja que presenta es que es más seguro, en el sentido de que si por algún motivo se taponan (por sobresalto del material vegetal en el alambique o por condensación de productos sólidos presentes en gran proporción en algunas esencias: mentol, alcanfor o borneol por ejemplo) el vapor tiene otras salidas alternativas que hacen que no se genere una sobrepresión excesiva en el alambique.

En este modelo suele alimentarse la mezcla de vapores por dentro de los tubos y el agua de enfriamiento circulante por el exterior de los mismos, realizando de este modo la transferencia de calor.

Por lo general estos condensadores se ubican inclinados o en formación vertical, con el fin de facilitar la descarga de los condensados. Se pueden trabajar los flujos de agua y vapores en contracorriente o en paralelo (líquido refrigerante y condensados con el mismo sentido de circulación), lo cual nos permite obtener

condensados a diferentes temperaturas y de este modo evaluar cuál es el que nos ofrece mejores resultados.

**Figura 9. Condensadores enfriados por agua.**



Fuente: autores del proyecto.

**Figura 10. Condensador enfriado por aire.**



Fuente: [http:// www.bohn.com.mx](http://www.bohn.com.mx).

Los condensadores enfriados por aire (figura 10), son utilizados ya que estos no necesitan torre de enfriamiento, este equipo es especial cuando no se cuenta con agua abundante o para un equipo móvil.

#### 4.4 SEPARADORES DE ACEITE ESENCIAL

Los separadores de aceite esencial, llamados también frascos florentinos, son aquellos dispositivos destinados a realizar la separación entre un aceite esencial y el vapor de agua condensado que se utilizó para su extracción del material vegetal (figura 11).

Debido a las características propias de los aceites esenciales, es posible dividirlos para su clasificación en dos grandes grupos: «aceites esenciales pesados» y «aceites esenciales ligeros». Esta división se basa en que los aceites esenciales tienen una densidad muy cercana a la del agua, denominándose «aceites esenciales pesados» a aquellos aceites esenciales cuya densidad es mayor a la densidad del agua y por consiguiente se depositan en la parte inferior del separador.

**Figura 11. Separadores o vasos florentinos.**



Fuente: autores del proyecto.

Por el contrario, los «aceites esenciales ligeros» son aquellos aceites esenciales que tienen una densidad menor a la del agua y que por lo tanto se acumulan en la superficie de la misma<sup>19</sup>.

#### 4.5 FUENTE GENERADORA DE CALOR<sup>20</sup>.

En la hidrodestilación, el material vegetal esta inmerso en agua, la cual se lleva a ebullición por medio de una fuente de calor, que puede consistir en la combustión de carbón, leña, ACPM\* (figura 12), o gas. Usar electricidad resulta muy costoso para producir vapor.

En la destilación agua vapor la fuente de calor puede ser una llama o una chaqueta de vapor.

En la destilación por arrastre con vapor, el vapor húmedo o seco se produce en un generador de vapor (caldera), que se puede definir como un dispositivo que produce vapor, aprovechando el poder calorífico de un combustible que puede ser gas (figura 13), ACPM, biomasa, carbón, leña, fuel oil, etc.

**Figura 12. Quemador de ACPM.**



Fuente: <http://www.colmaquinas.com.co>.

---

<sup>19</sup>BANDONI, Op. Cit., p.180-185.

<sup>20</sup> Documentos emitidos por el CENIVAM.

\*Aceite Combustible Para Motor.

**Figura 13. Caldera que utiliza un quemador a gas natural**



Fuente: autores del proyecto.

#### **4.6 COMBUSTIBLES**

Generalmente la leña es el combustible de elección por varios motivos. El principal es su bajo costo, pero también es de destacar la posibilidad de utilizar el material agotado después de la destilación para alimentar la caldera u hogar de combustión cualesquiera.

Como parámetro comparativo, el siguiente cuadro detalla el consumo de combustible necesario par generar 1000 kg de vapor / hora.

**Cuadro 2. Consumo de combustible para generar 100 kg de vapor/h (640.000 Kcal/h).**

<b>Combustible</b>	<b>Potencia calorífica (Kcal/kg)</b>	<b>Consumo</b>
Madera blanda.	1900	350 kg
Madera dura.	4000	160 kg
Fuel oil.	10200	75 l
Gas oil.	10500	86 l
Gas natural.	8300	83 m <sup>3</sup>

Fuente: BANDONI, Arnaldo. Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. 2000. p. 195.

Una vez conocidos los costos de cada uno de estos combustibles es posible determinar la mejor opción para cada caso.

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL

### 5.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

El CENIVAM\* ha contemplado la construcción de un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales con el fin de dar cumplimiento a uno de sus objetivos en el área de transferencia de tecnología, generando conocimiento en la cadena productiva de aceites esenciales y derivados de plantas aromáticas y medicinales, dirigido principalmente a cooperativas de agricultores. En este caso junto con la Asociación de campesinos MORELIA determinaron los siguientes requerimientos de diseño:

- Un equipo para la extracción de aceites esenciales por los métodos de hidrodestilación y agua vapor según corresponda, para procesar las siguientes plantas aromáticas y medicinales: albahaca (*Ocimum basilicum*), hierbabuena (*Mentha piperita*), poleo (*Satureja brownei*), toronjil (*Melissa officinalis*), manzanilla común (*Chamomilla recutita*), prontoalivio (*Lippia alba*), cidrón (*Lippia citriodora*) y estragón francés (*Tagetes lucida*).
- Localización: el equipo funcionará en la zona alta de los municipios del Peñón y Bolívar en el departamento de Santander.
- El equipo debe ser móvil y de fácil transporte.
- De fácil manejo y operación, debido a que va dirigido a la población campesina.

---

\*Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales.

- Con una capacidad de procesamiento a pequeña escala para 50 kg de material vegetal aproximadamente.
- El combustible fuente de calor sea gas natural.
- Tiempo de extracción: aproximadamente entre 1 <sup>1/2</sup> y 2h.
- Que ofrezca seguridad durante el proceso.

## 5.2 JUSTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE HIDRODESTILACIÓN Y AGUA-VAPOR

Teniendo en cuenta los anteriores requerimientos y los diferentes métodos de destilación para la extracción de aceites esenciales, se determinó que los procesos de hidrodestilación y agua-vapor son los métodos de obtención de aceites esenciales que más se ajustan a los requerimientos solicitados, por las siguientes razones:

La fuente de calor puede consistir en la combustión de carbón, leña, ACPM o gas, sin necesidad de calderas o electricidad para la producción de vapor que aumentarían los costos de construcción y operación.

Con estos métodos se obtienen destiladores más sencillos y de fácil operación que permiten que cualquier persona apta para trabajar lo opere después de una corta capacitación.

La diferencia entre la hidrodestilación y la destilación con agua-vapor radica en que en la hidrodestilación el material vegetal está inmerso en agua; mientras que en la destilación agua vapor descansa sobre una rejilla que se mantiene por encima del nivel de agua. De esta manera es posible la conversión del proceso de hidrodestilación al de agua-vapor sólo con la adición de una rejilla separadora,

haciendo el sistema más versátil y flexible, en caso de necesitar emplear este método de destilación agua-vapor para procesar otras especies aromáticas.

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

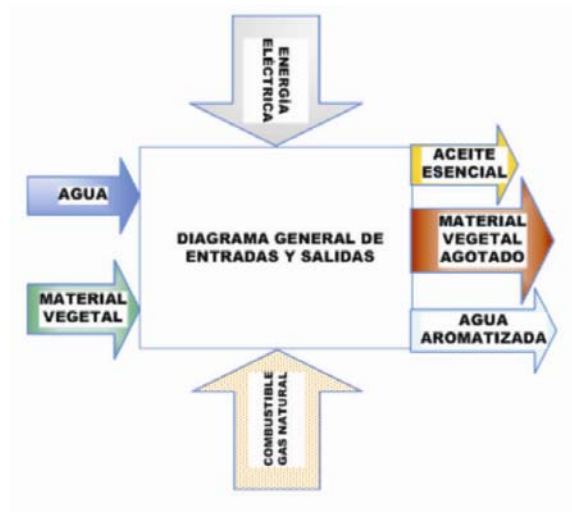
### 5.3 DIAGRAMA GENERAL DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LOS PROCESOS: DE HIDRODESTILACIÓN Y AGUA-VAPOR

**Entradas:** material vegetal y agua.

**Salidas:** aceite esencial, agua aromatizada y material agotado.

**Servicios:** energía eléctrica y combustible (gas natural). (Figura 14).

Figura 14. Diagrama general de entradas y salidas de los procesos: de hidrodestilación y agua-vapor.



Fuente: autores del proyecto.

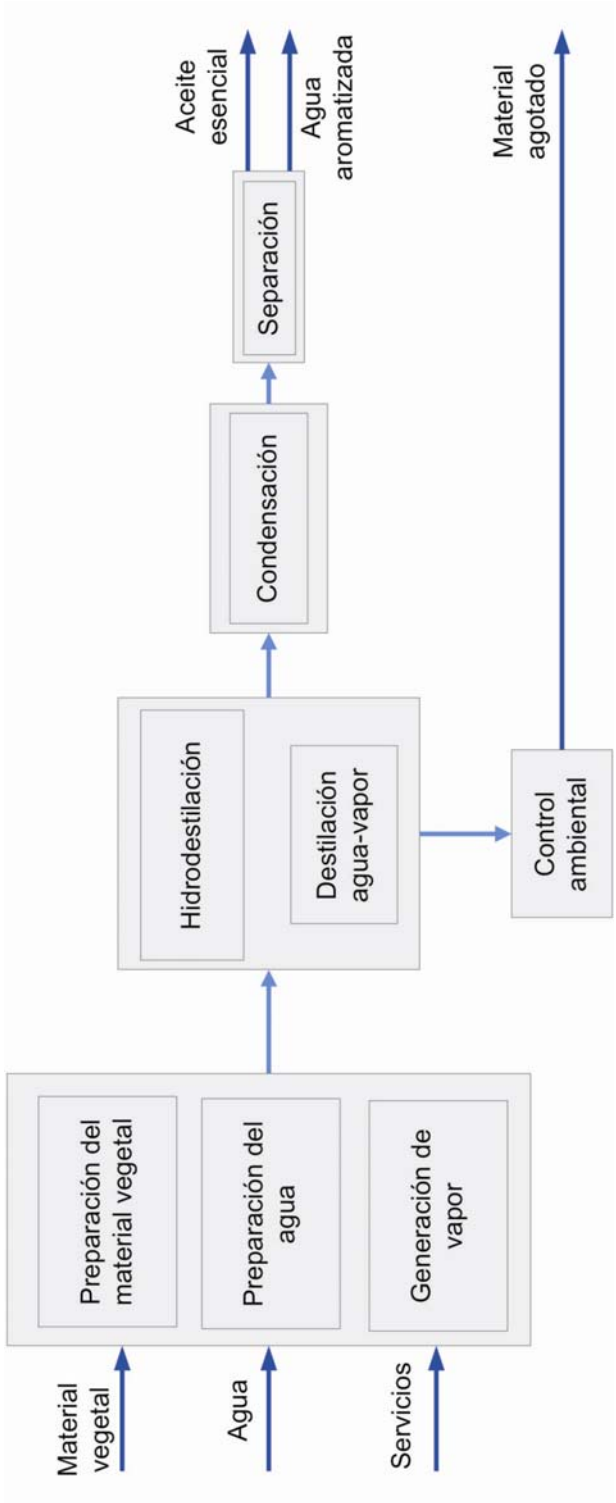
### 5.3.1 Descripción del proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua-vapor.

**Cuadro 3. Proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua-vapor.**

	ETAPAS	DESCRIPCIÓN
PREPARACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN	Preparación del material vegetal.	Seleccionar el material, secarlo, reducir el tamaño si lo requiere y finalmente cargar el tanque extractor.
	Preparación del agua.	El agua requerida para la generación de vapor del proceso, debe ser previamente tratada para disminuir su dureza.
	Generación del vapor.	En hidrodestilación, el material vegetal está inmerso.  Para agua- vapor, el vapor se genera en el falso fondo.
EXTRACCIÓN	Destilación con agua (hidrodestilación).	El agua y el material vegetal están en contacto, produciendo allí el vapor y arrastrando las gotas de aceite esencial.
	Destilación por agua-vapor.	El vapor se genera en un falso fondo y luego este se hace pasar por el material que está en un cilindro en malla (canasta).
PREPARACIÓN PARA LA SEPARACIÓN	Transporte del tanque extractor al condensador.	La tubería de salida del extractor debe evitar la condensación de la mezcla, por eso se utiliza una reducción gradual denominada «cuello de cisne».
	Condensación de la mezcla vaporizada.	Con el aire de enfriamiento la mezcla vaporizada vuelve a su estado líquido.
SEPARACIÓN	Separación de las dos fases.	A temperatura ambiente los dos productos agua-aceite son inmiscibles y son separados fácilmente por decantación.
MANEJO AMBIENTAL	Disposición final del material vegetal.	El material vegetal agotado puede ser dispuesto como material para compostaje de los cultivos ó utilizarlo como combustible.
	El agua aromatizada.	Esta agua puede ser regresada al extractor si el equipo cuenta con una función llamada cohobación ó se utiliza en aromaterapia.

Fuente: autores del proyecto.

Figura 15. Esquema del proceso de aceites esenciales por hidrodestilación y agua-vapor.



Fuente: autores del proyecto.

## 5.4 EVOLUCIÓN DEL DISEÑO

Durante el proceso de diseño surgieron diferentes ideas acerca del equipo o sistema móvil, de los cuales se fueron extrayendo algunas características y filtrando otras, para llegar al diseño final.

### 5.4.1 Primera alternativa de diseño.

Figura 16. Primera alternativa de diseño.



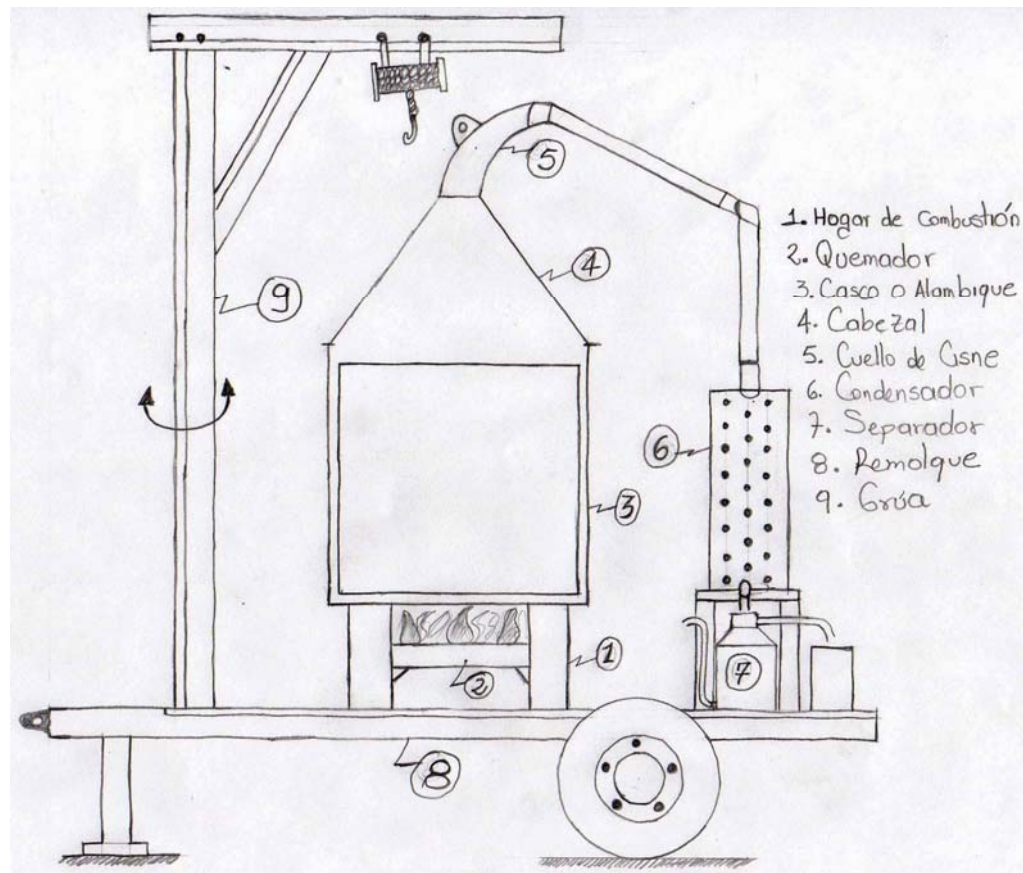
Fuente: autores del proyecto

Este primer diseño (figura 16) incluía los elementos básicos de un equipo de destilación, alambique, cuello de cisne, condensador y recipiente separador de aceites esenciales. Además contemplaba un tanque de almacenamiento para combustible, el cual inicialmente se pensó en ACPM. Todos estos elementos ubicados sobre una estructura móvil o remolque, para ser transportados. Esta alternativa propuesta presentaba problemas para la carga y descarga del material

vegetal, y el quemador de ACPM, el cual requería de la construcción de un hogar de combustión que implicaba aumentar peso y costos al equipo.

#### 5.4.2 Segunda alternativa de diseño.

Figura 17. Segunda alternativa de diseño.

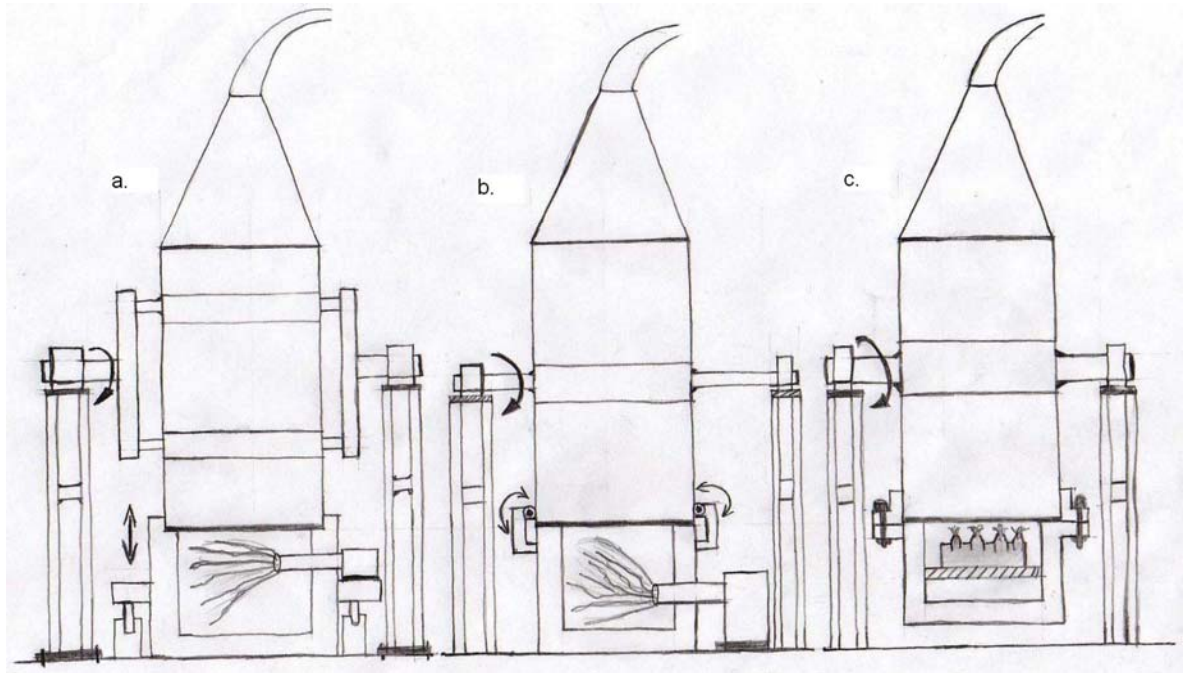


Fuente: autores del proyecto.

Esta propuesta (figura 17) fue evaluada y se encontró la siguiente desventaja: como necesitaba de una grúa, ésta debería tener una altura mínima de 2.80m con respecto a la plataforma del remolque, lo cual hacía inestable el remolque porque quedaba a una altura de 3,30m aproximadamente con respecto al piso.

### 5.4.3 Tercera alternativa de diseño.

Figura 18. Tercera alternativa de diseño.

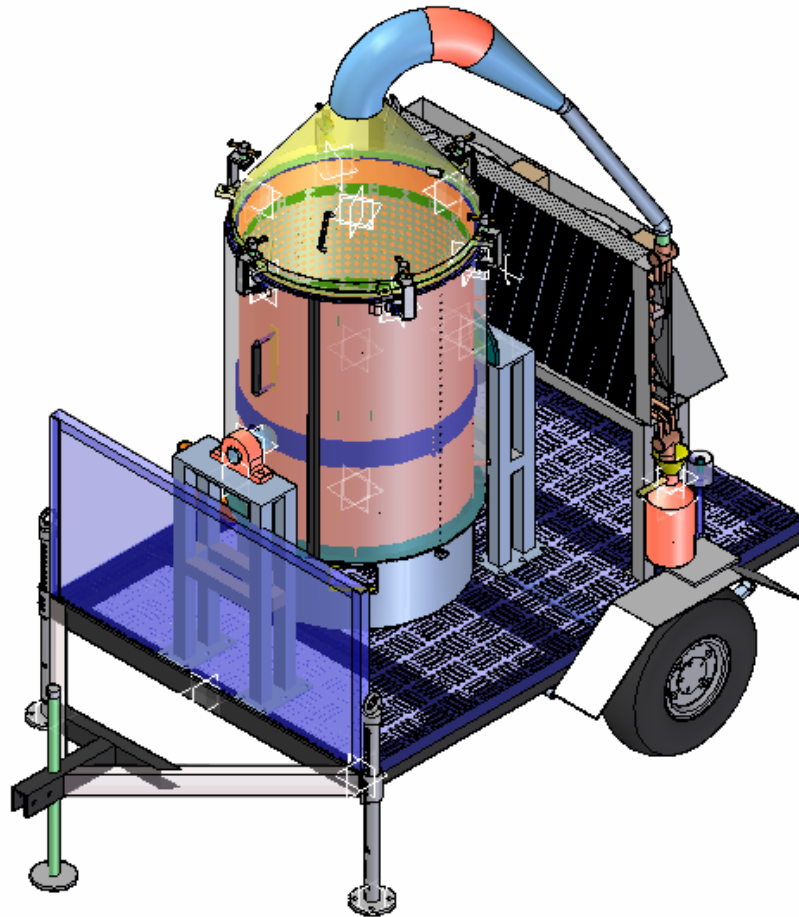


Fuente: autores del proyecto.

Este tercer diseño (figura 18) presenta varias formas en el montaje del casco destilador sobre pivotes para facilitar la carga y descarga del material vegetal, además de la forma y montaje del quemador de combustible, del cual se seleccionó el esquema ([c] de la figura 18) porque presenta ventajas con respecto a los otros dos por reducir costos en el quemador, hogar de combustión, además el montaje se hace más sencillo.

**5.4.4 Alternativa final de diseño.** Es resultado de la evolución del diseño, después de haber evaluado las anteriores alternativas.

**Figura 19. Alternativa final de diseño.**



Fuente: autores del proyecto.

Este diseño (figura 19) presenta las siguientes características: un montaje del casco destilador sobre pivotes para facilitar la carga y descarga del material vegetal, una canasta al interior del casco para albergar el material vegetal, un cuello de cisne formado por 2 secciones -una rígida y otra flexible- para facilitar el montaje y desmontaje de la tapa del casco destilador y un recinto para la combustión adherido al casco destilador; cuenta con un condensador enfriado por aire y un recipiente separador, todos estos componentes instalados en una estructura móvil (remolque) el cual facilita su transporte a los diferentes puntos donde estarán ubicadas las destilerías.

## 6. DISEÑO, SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MÓVIL

### 6.1 RECINTO DE COMBUSTIÓN

Es el espacio donde se lleva a cabo la combustión del gas natural (combustible utilizado como fuente de calor para llevar a cabo el proceso de hidrodestilación) haciendo ebullición el agua en la que se encuentra inmerso el material vegetal.

Este recinto está constituido por una estructura de soporte, un quemador de gas principal y algunos de los componentes que conforman el sistema de control (quemador piloto, tubería piloto, termocupla), para obtener una combustión segura, eficiente y autónoma.

**6.1.1 Selección del combustible.** El combustible seleccionado para llevar a cabo el proceso de hidrodestilación es el gas natural, debido principalmente a su disponibilidad en la zona de operación del equipo (municipio de Bolívar [Santander] y alrededores), además de ser económico y de fácil manejo para su combustión.

Los elementos sugeridos para la combustión del gas natural en el proceso, permiten a su vez ser utilizados con gas propano, adicionando una alternativa más para emplearlo como fuente de calor si así se requiere.

Otro factor tomado en cuenta para la selección del combustible es el gran auge que ha tenido el Gas Natural Vehicular (GNV) en Colombia, como combustible

vehicular, razón por la cual permitirá que a mediano plazo se tenga acceso a éste en estaciones de servicio aledañas a la zona de operación del equipo, facilitando aún más la movilidad del mismo, con sólo instalar un tanque de almacenamiento.

En el cuadro 4 se observan las propiedades del gas natural domiciliario.

**Cuadro 4. Propiedades del gas natural en Colombia.**

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO	PRECIO PROMEDIO*
Gas natural	35315 Btu/m <sup>3</sup>	\$ 650/m <sup>3</sup>

Fuente: Confedegas informa: Colombia-Venezuela. Integración a todo gas/ Confederación de la Industria y del Comercio del Gas. No.86 (jul-sep 2006). Bogotá: CONFEDEGAS, 2006. 76 p.

**6.1.2 Estructura de soporte.** Esta estructura metálica está ubicada y sujeta a la parte inferior del alambique o casco destilador, por medio de 4 tornillos de ½" de diámetro en acero al carbono, lo cual facilita el montaje y desmontaje. La forma es cilíndrica y permite servir de cámara de combustión y de soporte para alojar el quemador de gas y algunos componentes que hacen parte del sistema de control (quemador piloto, tubería piloto, termocupla). Ver figura 20.

- **Construcción.** Está construida de lámina Hot Rolled (ver propiedades en el anexo B) de 2 mm de espesor y posee un área de sección transversal circular; en su interior reposa una cruceta armada en perfil angular de 1<sup>1/2</sup>" X 1/8" para sostener

---

\*Precio promedio puesto en el domicilio, en Colombia a septiembre de 2006.

el quemador de gas y algunos componentes del sistema de control, como los quemadores piloto, tubería para gas y otros accesorios.

Las uniones de esta estructura se realizaron mediante soldadura con arco metálico protegido (SMAW), electrodo West arco E 7018-1/8".

En su parte frontal posee una ventana pivotante, para la inspección y encendido manual del quemador. En la posterior está ubicada una chimenea de gases construida con una reducción sanitaria de relación 3": 2" diametral, más un codo a 90° y un tramo de tubería también sanitaria de 2" de diámetro en acero inoxidable. Las uniones de estos componentes de la chimenea se realizaron mediante proceso de soldadura con arco de Tungsteno y gas inerte (GTAW), utilizando como material de aporte soldadura 308l-16.

El exterior de la estructura está cubierto con aislamiento de lana de fibra de vidrio de 1 1/2" de espesor, marca fiberglass tipo AW (ver anexo D) y recubierto con una lámina de acero inoxidable brillante, calibre 26 para proteger la lana de aislamiento y mejorar la presentación de la estructura (figura 20).

**Figura 20. Estructura de soporte.**



Fuente: autores del proyecto.

## 6.2 QUEMADOR DE GAS

El quemador de gas es el dispositivo para suministrar el gas al área de combustión. Es usado esencialmente para la combustión de gas natural, pero también permite el uso de gas propano como combustible con sólo hacer unos pequeños ajustes al sistema.

Es del tipo de inyección atmosférica y consiste de un tubo circular o flauta que posee un conjunto de boquillas en forma de tobera, debidamente espaciadas hacia donde se dirige el flujo de gas gracias a la presión disponible en la línea para ser quemado junto con el aire secundario presente alrededor de la llama o flama.

El quemador está construido de tubería galvanizada de 1" de diámetro, de 1/16" de espesor, formando una circunferencia de 45 cm de diámetro aproximadamente. El flujo de gas, que viaja desde la línea principal al interior del quemador, es dirigido hasta la parte superior de las boquillas en donde se realiza la combustión. Contiene 11 boquillas de 1/4" de diámetro en su orificio superior, igualmente espaciadas la una de la otra en el perímetro del quemador, permitiendo que cada una genere aproximadamente 11.000 Btu/h de rata de calor, para producir un total de 121.000 Btu/h, suministrando la potencia requerida para llevar a cabo el proceso de hidrodestilación en las condiciones promedio del municipio de Bolívar (cuadro 5), en donde el equipo será operado la mayor parte del tiempo.

Los principales componentes del quemador son mostrados en la figura 21.

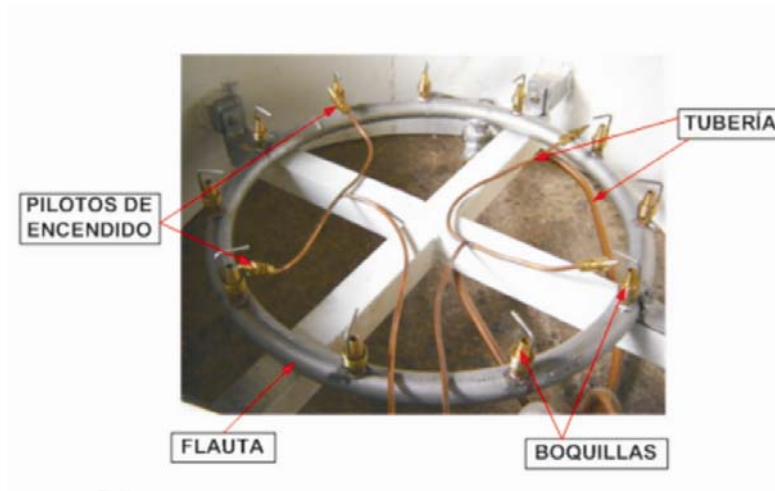
**Cuadro 5. Condiciones promedio del municipio de Bolívar (Santander).**

PROPIEDAD	VALOR
Temperatura ambiente promedio.	18°C

Altura sobre el nivel del mar.	2000m
Densidad del aire a 2000 m.	0,9427 kg/m <sup>3</sup>
Presión atmosférica.	79,5 KPa
Temperatura de ebullición del agua.	93,5°C

Fuente: autores del proyecto.

**Figura 21. Quemador de gas.**



Fuente: autores del proyecto.

### 6.2.1 Cálculo de la rata de calor requerida.

- **Requerimientos de operación.**

El proceso de hidrodestilación requiere -según pruebas de laboratorio- que en aproximadamente 45 minutos se alcance la temperatura de ebullición del agua y seguidamente se lleven a cabo 2 horas de evaporación de la mezcla (agua + aceite esencial). Estos requerimientos se deben tener en cuenta para llevar a cabo el proceso de hidrodestilación para cualquier cantidad de agua inferior o igual a la máxima capacidad del alambique.

- **Datos del proceso:**

Volumen de agua: 0,265 m<sup>3</sup>.

Masa de agua: 265 kg.

- **Calor sensible.**

$$Q_s = mc_p \Delta T = 265 \text{kg} * (93,5 - 18)^\circ \text{C} * 4,183 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ \text{C}} = 83691,4 \text{KJ} = 79328,3 \text{Btu}$$

- **Calor latente.**

$$Q_1 = mh_{fg} = 70 \text{kg} * 2274 \text{KJ} / \text{kg} = 159180 \text{KJ} = 150881,5 \text{Btu}$$

- **Calor total.**

$$Q_T = 83691,4 + 159180 = 242871,4 \text{KJ} = 230209,8 \text{Btu}$$

Rata de calor para alcanzar el punto de ebullición en 45 minutos:

$$\dot{Q}_{45 \text{min}} = \frac{79328,3 \text{Btu}}{45 \text{min}} = 105771 \text{Btu}/h$$

Rata de calor para evaporar durante 2 horas la mezcla agua + aceite esencial:

$$\dot{Q}_{2h} = \frac{150881,5 \text{Btu}}{2h} = 75440,75 \text{Btu}/h$$

Tenemos entonces que la rata de calor a suministrar por el quemador de gas, para llevar a cabo el proceso de hidrodestilación es de 105771 Btu/h; como cada boquilla aporta aproximadamente 11000 Btu/h, se instalaron 11 boquillas en el quemador, para obtener una rata total de calor de 121000 Btu/h.

**6.2.2 Sistema de control.** El quemador de gas utiliza un sistema de control para gobernar el flujo de gas.

Las 2 funciones principales del sistema de control son encender o apagar el quemador de gas, abriendo o cerrando, respectivamente, una válvula de control en la línea principal de suministro de gas, en respuesta a una señal enviada por el termostato e impedir el paso de combustible (gas natural o gas propano) si alguna condición de falla, mal funcionamiento o inseguridad se llega a presentar en el sistema, tal como el apagado del quemador o un sobrecalentamiento.

Los componentes básicos que conforman el sistema de control son los siguientes:

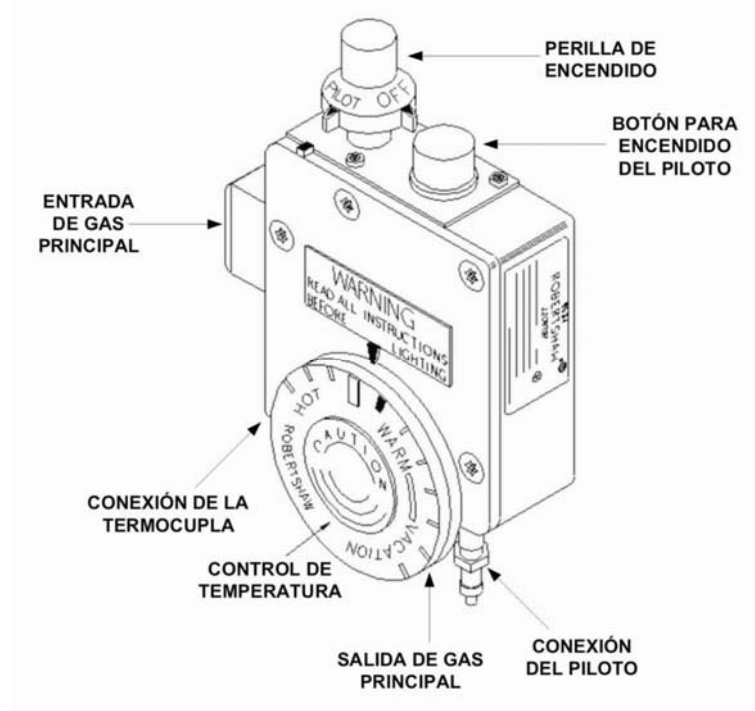
- Termostato de bulbo remoto.
- Regulador de presión de gas.
- Válvula termostática (línea principal de suministro de gas).
- Válvula piloto (línea piloto).
- Montaje de gas piloto.
- Línea de gas principal.
- Línea de gas piloto.

En muchas aplicaciones el termostato de bulbo remoto es combinado con otros elementos en un solo paquete para ofrecer diferentes funciones de control. Por esta razón se propuso trabajar con un control de combinación termostática tipo Robertshaw Unitrol 110 SR.

El control cuenta con una válvula termostática, un bulbo sensor, la válvula del quemador piloto y un regulador de presión, además de los accesorios para su fácil operación, como son un dial de temperatura, otro de gas y un encendedor para piloto.

La figura 22 ilustra los componentes principales de un control Unitrol 110 SR.

Figura 22. Componentes principales de un control Unitrol 110 SR.



Fuente: <http://www.vulcan.com.au>.

El *bulbo sensor* es localizado en el fondo del alambique o casco destilador, sensando la temperatura del agua y enviando una señal a la *válvula de control* sobre la línea de suministro de gas principal para que sea abierta o cerrada, como respuesta a esta señal, para encender o apagar el quemador de gas según sea la condición de operación.

La presión de gas en el quemador principal es controlada por un *regulador de presión* incorporado en el unitrol 110 SR.

El sistema de control está dotado de un mecanismo automático de seguridad que corta el suministro de gas al quemador principal y al piloto, cerrando la *válvula de piloto* automático si la llama en el quemador piloto se apaga por cualquier razón.

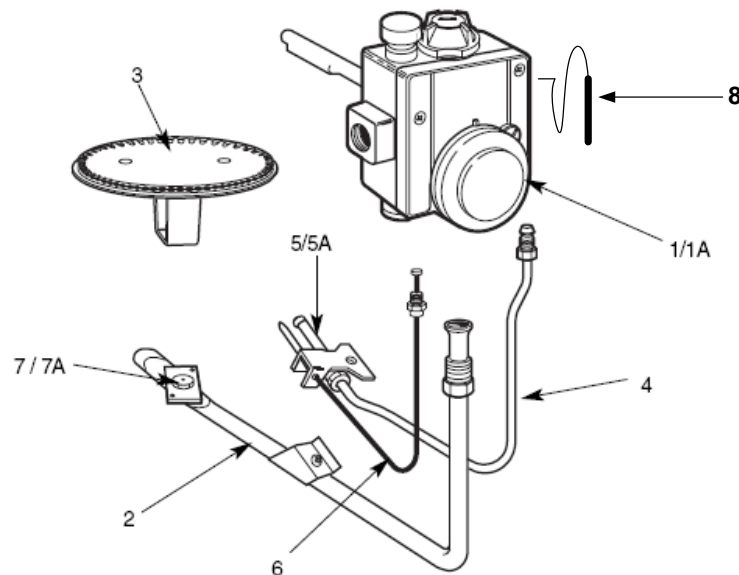
Al cerrarse la válvula del quemador piloto, se genera una señal enviada por la termocupla del mismo para cerrar también la válvula principal que maneja el suministro de gas al quemador principal.

El conjunto de gas piloto incluye el quemador piloto y la termocupla, que hace parte del mecanismo de seguridad del sistema, pero que no se encuentra integrado como paquete en el control unitrol 110 SR.

La *línea de gas principal* conduce el flujo de gas al quemador principal, mientras que la *línea de gas piloto* conduce el pequeño flujo de gas, al respectivo quemador piloto.

La figura 23 ilustra los componentes principales del sistema de control.

**Figura 23. Principales componentes del sistema de control.**

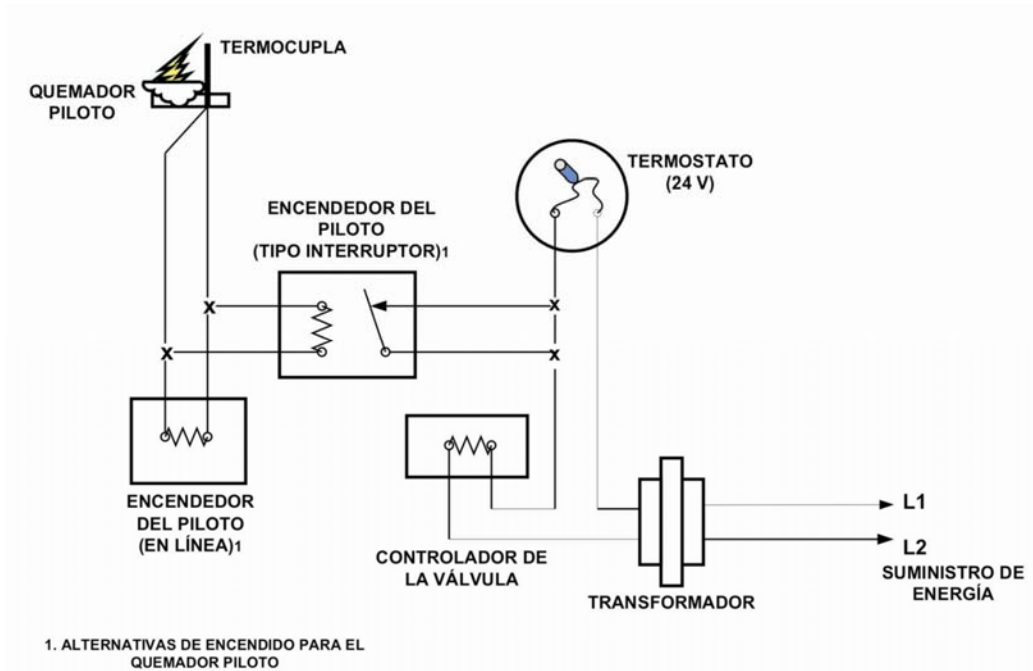


REFERENCIA	DESCRIPCIÓN DE LA PARTE
1	Termostato, gas natural.
1A	Termostato, gas propano.
2	Tubo de suministro.
3	Quemador.
4	Tubo de piloto.
5	Piloto, gas natural.
5A	Piloto, gas propano.
6	Termocupla.
7	Esprea (orificio), gas natural.
7A	Esprea (orificio), gas propano.
8	Termostato de bulbo remoto.

Fuente: <http://waterheating.rheem.com>.

**6.2.3 Circuito de control por temperatura.** El circuito de control (figura 24), usado para operar el quemador de gas es un circuito de control por temperatura a bajo voltaje.

Figura 24. Circuito de control por temperatura a bajo voltaje.



Fuente: BRUMBAUGH, James E. Heating, ventilating and air conditioning library. Oil, gas and coal burners. Controls. Ducts. Piping. Valves. 5 ed. Indianápolis: audel. 1979. v.2. p. 141.

El circuito incluye un transformador para reducir la alta línea de voltaje a un rango entre 24 y 30 voltios aproximadamente.

El termostato es el controlador básico en el circuito de control eléctrico, usado para operar en el sistema de generación de calor.

## 6.3 CUELLO DE CISNE

**6.3.1 Descripción.** El cuello de cisne es uno de los componentes más importantes del equipo de extracción de aceites esenciales, porque este componente debe reducir al mínimo las posibilidades de condensación de vapor (vapor de agua + aceite esencial) dentro del destilador o alambique, permitiendo conducir los vapores hacia el condensador.

El cuello de cisne debe ser fácilmente desmontable, debido a que cada vez que se cargue o descargue el alambique es necesario desconectarlo del condensador.

Los factores de diseño más importantes a considerar para su construcción son su forma y sus dimensiones.

El cuello de cisne está conformado por la unión de varios accesorios de fácil obtención en el mercado local (Bucaramanga), lo cual facilita su construcción y disminuye su precio. Construir un cuello de cisne de una sola pieza resulta complicado y eleva los costos, debido a que en el mercado local ninguna empresa de las consultadas se comprometió a su fabricación.

**6.3.2 Construcción.** El cuello de cisne está construido en 2 secciones principales: una rígida y fija y otra flexible y desmontable.

La sección rígida (figura 25) está construida mediante la unión de un codo de 6" de diámetro, con un semicodo de 6", seguido de 3 reducciones; una reducción de 6" a 4", otra de 4" a 2" y la última de 2 a 1<sup>1/2</sup>" de diámetro, respectivamente. Por último, cuenta con un niple de unión de 1<sup>1/2</sup>" para roscar una pieza D de acople rápido para el ensamble con la sección flexible. Todos estos elementos (excepto la pieza D de acople rápido que es de Aluminio) son de acero inoxidable AISI 304; las uniones

fueron hechas mediante proceso de soldadura con arco de tungsteno y gas inerte (GTAW), utilizando como material de aporte soldadura 308L-16.

**Figura 25. Sección rígida del cuello de cisne.**



Fuente: autores del proyecto.

Las reducciones cónicas permiten que los vapores aumenten su velocidad de flujo, facilita la conducción de vapor hacia el condensador, disminuyendo las posibilidades de condensación, dentro del mismo alambique.

La sección flexible (figura 26) está construida por un tramo de manguera tipo S-96 de aproximadamente 1m de larga y 1<sup>1/2</sup>" de diámetro en acero inoxidable, con extremos para su unión tipo hembra universal para roscar piezas F de acople rápido de 1<sup>1/2</sup>" de diámetro, para ensamblar en un extremo con la sección rígida y por el otro con el colector superior del serpentín del condensador que mediante una múltiple derivación dirige la mezcla de vapor de agua más aceite esencial hacia el interior del condensador. Esta sección flexible se construyó con el fin de facilitar el montaje y desmontaje del cuello de cisne cada vez que haya que

remover la tapa-cabezal del alambique, para hacer la carga o descarga de material vegetal.

**Figura 26. Sección flexible del cuello de cisne.**



Fuente: autores del proyecto.

## **6.4 CONDENSADOR**

El condensador es un intercambiador de calor, dispositivo por el cual se facilita el intercambio de calor directa o indirectamente entre dos caudales de fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes.

La transferencia de calor puede darse con un intercambio de calor latente y calor sensible.

Debido a los requerimientos y condiciones de operación del sistema móvil para la extracción de aceites esenciales se propuso diseñar y construir un condensador de tipo compacto, cuyo flujo de enfriamiento es por aire (convección forzada) ya que en la zona de operación del equipo el suministro de agua es limitado y complicaría la autonomía del sistema con la introducción de subsistemas para el enfriamiento del agua (torre de enfriamiento, aspersores, etc.) como fluido de enfriamiento.

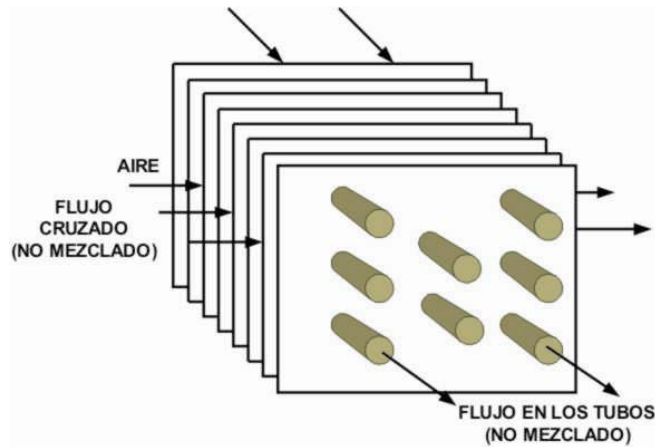
Este equipo compacto de intercambiadores de calor permite lograr gran área superficial de transferencia de calor y como consecuencia velocidades elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño.

En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre si, a esa configuración de fluidos se le conoce como flujo cruzado. En los intercambiadores de flujo cruzado, a los cuales se les denomina serpentines de haz de tubos, se utilizan tubos con aletas exteriores.

Se dice que el flujo cruzado es no mezclado (figura 27) ya que las aletas fuerzan al fluido a moverse por un espaciado particular entre ellas, e impiden su movimiento en la dirección transversal.

Las aletas sirven como superficies disipadoras de calor, que aumentan el área superficial del condensador, mejorando la eficiencia.

**Figura 27. Configuración de flujo.**



Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p. 669.

En el condensador de vapor propuesto, enfriado por aire el vapor entra a los tubos, y un ventilador induce una corriente de aire que circula a través de los tubos aleteados del dispositivo, ganando calor y logrando que el vapor sea condensado y posteriormente subenfriado.

El proceso de diseño abarca 3 etapas principales: diseño térmico, diseño mecánico y construcción.

**6.4.1 Diseño térmico.** El condensador debe además de condensar, subenfriar la mezcla de vapor (agua + aceite esencial) para garantizar una posterior separación, cuando la mezcla ingrese al separador o vaso florentino.

Cada etapa o zona del condensador, condensación y subenfriamiento se trataron como un intercambiador de calor por separado y finalmente se sumaron sus áreas de transferencia, para determinar el área total de transferencia de calor, del condensador.

El método utilizado para dimensionar y analizar el intercambiador de calor fue el de la Diferencia Media Logarítmica de Temperatura LMTD.

- **Etapa de condensación.** En esta zona ocurre el cambio de fase de la mezcla, de vapor a líquido.
- **Datos de entrada.** Es necesario determinar los datos conocidos y las condiciones previas para el diseño del condensador, estos datos los podemos clasificar en 3 tipos:
  - Datos de proceso.
  - Datos geométricos.
  - Datos de criterio.
- **Datos de proceso:** corresponden a los datos de los fluidos que intercambian calor (cuadro 6) como lo son temperaturas, flujos, propiedades termodinámicas y físicas que pueden ser obtenidos a través de tablas.

**Cuadro 6. Datos de proceso.**

SÍMBOLOS	DESCRIPCIÓN	VALOR
$T_1$	Temperatura de entrada del vapor al condensador.	93,5°C*
$T_2$	Temperatura de salida de condensado sin subenfriar.	93,5°C
$t_1$	Temperatura de entrada del aire de enfriamiento.	18°C**
$T_{11}$	Temperatura de entrada del vapor condensado.	93,5°C
$T_{21}$	Temperatura de salida del líquido subenfriado.	25°C
$\dot{m}_v$	Flujo másico de vapor.	35 kg/h
$\dot{m}_a$	Flujo másico de aire.	1,3 kg/s
$\rho_w$	Densidad del agua líquida a 93,5°C.	963,3

\*Temperatura de saturación del agua en el municipio de Bolívar (Santander) a condiciones normales.

\*\*Temperatura promedio del aire en el municipio de Bolívar (Santander) a condiciones normales.

		kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	Densidad del aire a temperatura promedio del aire.	1 kg/m <sup>3</sup>
$C_{pv}$	Calor específico del agua a $T_l$ promedio.	4185 J/kg°C
$C_{pa}$	Calor específico del aire a $\bar{t}$ .	1007 J/kg°C
$\mu_a$	Viscosidad del aire a temperatura fílmica $t_f$ .	1,941x10 <sup>-5</sup> kg/m.s
$K_w$	Conductividad térmica del agua $T_{l1}$ .	0,676 W/m°C
$h_{fg}$	Entalpía de vaporización = calor de vaporización a $T_1$ .	2274 kJ/kg°C***

Fuente: autores del proyecto.

- **Datos geométricos:** corresponden a las dimensiones y arreglo con el cual se distribuyeron los elementos que constituyen el condensador y con los cuales se puede contar en el mercado nacional para una fácil manufactura y un diseño óptimo.
- **Tubería.** Se seleccionó tubería de cobre tipo M de 3/8" de diámetro (cuadro 7) por su importante uso, fácil manejo y bajo costo en el mercado.

**Cuadro 7. Características de la tubería.**

TIPO DE TUBERÍA	DIÁMETRO EXTERNO	DIÁMETRO INTERNO	MATERIAL
	$d_o$ [mm]	$d_i$ [mm]	
TIPO M	9,52	8,70	Cobre

Fuente: autores del proyecto.

- **Aletas.** Están constituidas de aluminio, con forma rectangular, espaciadas a lo largo del condensador, conservando un paso de 12 aletas/pulgada y un espesor de 0,13 mm (cuadro 8).

\*\*\* Ver tabla del agua saturada en el anexo E.

**Cuadro 8. Características de las aletas.**

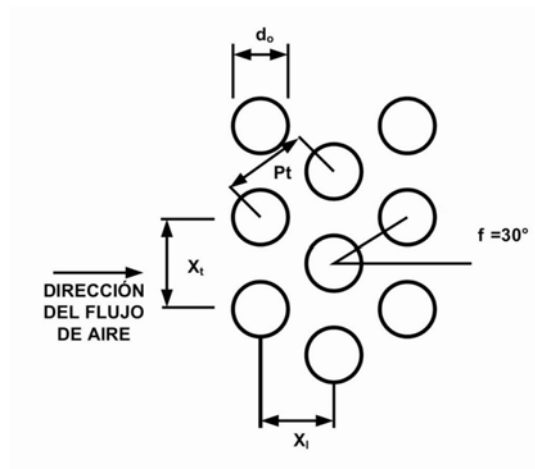
SÍMBOLO	PARÁMETRO	VALOR
$N_f$	Paso de aleta	12 aletas/pulgada
$\delta$	Espesor de aleta	0,13 mm
Al	Material	Aluminio

Fuente: autores del proyecto.

- **Geometría del arreglo.** Los arreglos estándar son caracterizados por el ángulo que forma la dirección del flujo con un lado del arreglo y son básicamente: 30°, 60°, 45° y 90°.

El arreglo seleccionado para los tubos fue triangular a 30° (figura 28), esto debido a su gran uso y fácil manufactura, además del mejoramiento en la eficiencia de la transferencia de calor por obtenerse una mayor densidad de tubos dentro del arreglo.

**Figura 28. Geometría del arreglo.**



SÍMBOLOS	PARÁMETROS	VALOR
$d_o$	Diámetro externo de los tubos.	9,52mm
$P_t$	Paso del arreglo.	25,4 mm
$\phi$	Ángulo del arreglo.	30°
$X_t$	Paso transversal de los tubos.	25,4mm
$X_l$	Paso longitudinal de los tubos.	22 mm

Fuente: SHAH, Ramesh K y DUSAN, P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Haboken: John Wiley. 2003. p. 568.

- **Número de Tubos por Fila (NTF)**

Debido al tamaño de los tubos seleccionados y al área frontal disponible dada por el diámetro de los ventiladores seleccionados (aspas de 20" de diámetro), se tiene una configuración de 20 tubos por fila (cuadro 9).

**Cuadro 9. Número de Tubos por Fila.**

SÍMBOLO	PARÁMETRO	VALOR
NTF	Número de Tubos por Fila	20

Fuente: autores del proyecto.

- **Datos de criterio:** corresponden a los valores de algunas variables geométricas o de proceso que se asumen de acuerdo con la experiencia o porque determinan la mejor opción desde el punto de vista del desempeño, tanto técnico como operativo, del intercambiador.
- Para el montaje del condensador en la estructura móvil se tuvo en cuenta el espacio disponible y este no debió exceder de 1,30 m de longitud total.

- El Número de Tubos por Fila en el condensador debe ser un número par, para garantizar que los orificios de entrada y de salida del condensador estén sobre el mismo plano o frente de trabajo y facilitar la operación de extracción de los aceites esenciales.
- La mezcla agua-aceite esencial, se manejó como una sustancia pura debido a que la cantidad presente de aceite esencial en el agua era muy pequeña y se puede despreciar, con el fin de hacer más práctico su cálculo.
- Asunción de las propiedades termodinámicas y físicas de los fluidos a operar, como constantes.
- Asunción de las temperaturas en las secciones transversales como constantes.
- En forma general se consideran las propiedades constantes y en estado estacional.
- El rendimiento de los intercambiadores de calor suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencias de calor. La capa de depósito representa una resistencia adicional para esta transferencia y hace que disminuya la velocidad de la misma en el intercambiador. El efecto neto de estas acumulaciones sobre la transferencia de calor, se representa por un factor de incrustación o ensuciamiento  $R_f$  el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación<sup>21</sup>y fue asumido con un valor de  $0,0015 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ .
- Velocidad óptima del flujo externo. La velocidad del flujo lado aire es un factor preponderante en el diseño de un intercambiador compacto, pues cuando se emplean altas velocidades de flujo aparecen vibraciones y ruido que se disipan en el intercambiador en forma de calor. En general se recomienda trabajar con velocidades de flujo bajas, inferiores a 5 m/s, velocidad que se conoce como

---

<sup>21</sup>CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p. 674.

umbral de ruido. Sin embargo, la velocidad óptima de los intercambiadores es diferente para cada caso pues es función de la geometría.<sup>22</sup>

Una vez obtenidos los datos de entrada se puede continuar con el proceso de diseño, siguiendo los siguientes pasos para la etapa de condensación.

-Flujo de calor cedido por el vapor, para que ocurra el cambio de fase vapor/líquido.

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v h_{fgv} @ 93,5^\circ C \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}_v$  = Flujo de calor cedido por el vapor.

$\dot{m}_v$  = Flujo másico del vapor.

$h_{fg}$  = Entalpía de vaporización del vapor a 93,5 °C\*.

-Flujo de calor ganado por el aire.

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a Cpa_{\bar{t}} (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Donde:

$\dot{Q}_a$  = Flujo de calor ganado por el aire.

$\dot{m}_a$  = Flujo de aire.

$Cpa$  = Calor específico del aire a la temperatura  $\bar{t}$ .

$$\bar{t} = \text{Temperatura promedio del aire} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (2.1)$$

$t_1$  = Temperatura de entrada del aire.

---

<sup>22</sup>Apuntes del Ing. Omar Gélvez Arocha.

\*Ver tabla de saturación del agua en el anexo E.

$t_2$  = Temperatura de salida del aire.

-Transferencia de calor global.

$$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD \quad (3)$$

Donde:

$Q_T$  = Flujo de calor global de transferencia.

$U_{/Ai}$  = Coeficiente global de transferencia de calor con respecto al área interna de los tubos.

- Cálculo del área interna  $A_i$  de los tubos.

$$A_i = \pi * d_i * L * N_t \quad (4)$$

Donde:

$d_i$  = Diámetro interno de los tubos.

$L$  = Longitud total de cada tubo.

$N_t$  = Número total de tubos.

Siendo:

$$N_t = NTF * NF \quad (5)$$

$NTF$  = Número de Tubos por Fila.

$NF$  = Número de Filas.

- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor  $U$ .

Para este caso en el que el intercambiador de calor tiene aletas, el recíproco del coeficiente global de transferencia de calor  $U_{/Ai}$ , está dado por:

$$\frac{1}{U_{/Ai}} = \frac{1}{h_i A_i / A_i} + \frac{Rp}{A_i} + Rf + \frac{1}{h_e \eta_s A_0 / A_i} \quad (6)$$

**a                    b                    c                    d**

Donde:

$h_i$  = Coeficiente de transferencia de calor interno.

$R_p$  = Resistencia de pared.

$R_f$  = Resistencia de ensuciamiento o factor de incrustación.

$h_e$  = Coeficiente de transferencia de calor externo.

$\eta_s$  = Eficiencia superficial de la aleta

$A_0$  = Área externa del condensador.

Siendo:

a = Un componente convectivo para el lado vapor.

b = Un componente conductivo por la pared de los tubos.

c = Un componente conductivo por el ensuciamiento.

d = Un componente convectivo para el lado aire.

Para continuar con el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor es necesario el cálculo de cada uno de los siguientes términos:

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno  $h_i$ .

$$\frac{h_i d_i}{K_l} = 0.1(P_{rl})^{1/3} \left( \frac{h_{fg}}{C_{p_l} \Delta t} \right)^{1/6} \left[ \frac{d_i G_v}{\mu_l} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \quad (7)$$

Si

$$1000 < \left[ \frac{d_i G_v}{\mu_l} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} \right] < 100000 \quad (8)^{23}$$

Donde:

$$G_v = \frac{4\dot{m}}{\pi d_i^2} \quad (9)$$

Despejando  $h_i$  de la ecuación número 7 tenemos:

---

<sup>23</sup>Mc QUISTON Faye C, PARKER Jerald D, SPITLER Jeffrey D. Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y diseño. México: Limusa -Wiley. 2003. p. 497.

$$h_i = \frac{K_l}{d_i} * 0.1(P_{rl})^{1/3} \left( \frac{h_{fg}}{C_{pl}\Delta t} \right)^{1/6} \left[ \frac{d_i G_v}{\mu_l} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \quad (10)$$

en donde los subíndices  $l$  y  $v$  se refieren al líquido y al vapor respectivamente y  $\Delta t$  es la diferencia entre la temperatura de saturación del fluido y la temperatura superficial de la pared.

$$\Delta t = T_{sat} - T_p \quad (11)$$

Donde:

$T_{sat}$  = Temperatura de saturación del fluido.

$T_p$  = Temperatura superficial de la pared del tubo.

$K_l$  = Conductividad térmica del fluido en estado líquido.

$P_{rl}$  = Número de Prandtl del fluido en estado líquido.

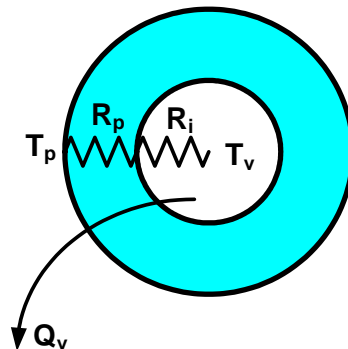
$\mu_l$  = Viscosidad dinámica del fluido en estado líquido.

$\rho_l$  = Densidad del fluido en estado líquido.

$\rho_v$  = Densidad del fluido en estado de vapor.

Para hallar la temperatura de superficie de la pared, es necesario plantear la resistencia térmica desde el fluido interno, hasta la pared extrema del tubo (figura 29).

**Figura 29. Resistencia térmica.**



Fuente: autores del proyecto.

$$\dot{Q}_v = \frac{T_v - T_p}{\left( \frac{1}{h_i A_i} + R_p + \frac{R_f}{A_i} \right)} \quad (12)$$

Despejando  $T_p$  tenemos:

$$T_p = T_v - \dot{Q}_v \left( \frac{1}{h_i A_i} + R_p + \frac{R_f}{A_i} \right) \quad (13)$$

En donde  $R_p$  es la resistencia de pared y está dada por:

$$R_p = \frac{\text{Ln}(d_0/d_i)}{2 * \pi * L_1 * K} \quad (14)$$

Siendo:

$K$  = Conductividad térmica del material de los tubos a la temperatura  $T_p$ .

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor externo  $h_e$ .

El coeficiente convectivo externo o coeficiente de transferencia de calor externo se calcula partir de la siguiente correlación:

$$J = S_t P_r^{2/3} \quad (15)$$

$$\text{En donde } S_t = \left[ \frac{h_e}{G_c * C_p} \right] \quad (16)$$

Despejando  $h_e$  tenemos que:

$$h_e = \frac{J * G_c * C_p}{P_r^{2/3}} \quad (17)$$

Donde:

$J$  = Factor  $J$  de Colburn.

$$G_c = \text{Masa velocidad} = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} \quad (17.1)$$

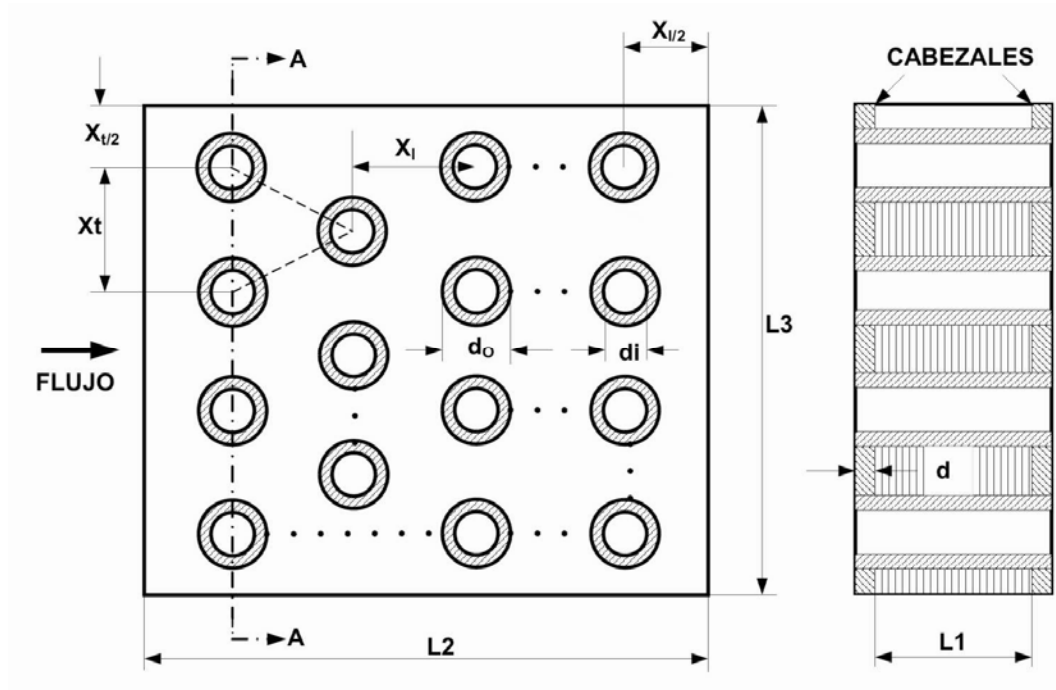
$C_p$  = Calor específico del aire.

$P_{ra}$  = Número de Prandtl del aire.

Para la determinación del factor  $J$  de Colburn, es necesario conocer algunas relaciones geométricas del intercambiador de calor. Estas relaciones geométricas o parámetros de relación, que nos relacionan área y volumen dentro del intercambiador, se mantienen constantes a través de él.

Las características geométricas al exterior de los tubos están basadas de acuerdo con el arreglo geométrico del intercambiador (figura 30) que consiste en tubos circulares y aletas de superficie plana.

**Figura 30. Arreglo geométrico con tubos circulares y aletas de superficie plana.**



Fuente: SHAH, Ramesh K y DUSAN, P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Haboken: John Wiley. 2003. p. 572.

Área primaria.

$$A_p = \pi d_o (L_1 - \delta N_f L_1) N_t + 2(L_2 L_3 - \frac{\pi d_o^2}{4} N_t) \quad (18)$$

Donde:

$\delta$  = Espesor de aleta.

$N_f$  = Número de aletas por unidad de longitud.

Área secundaria o área de aleta.

$$A_f = 2 \left[ L_2 L_3 - \left( \frac{\pi d_o^2}{4} \right) N_t \right] N_f L_1 + 2 L_3 \delta N_f L_1 \quad (19)$$

$$\text{Área total de transferencia } A = A_p + A_f \quad (20)$$

$A_o$  = Área mínima de flujo.

$$A_0 = \left[ \left( \frac{L_3}{X_t} - 1 \right) C'' + (X_t - d_0) - (X_t - d_0) \delta N_f \right] L_1 \quad (21)$$

$$C'' = \begin{cases} 2a'' & \text{si } 2a'' < 2b'' \\ 2b'' & \text{si } 2b'' < 2a'' \end{cases} \quad (22)$$

$$2a'' = (X_t - d_0) - (X_t - d_0) \delta N_f \quad (23)$$

$$b'' = (p_t - d_0) - (X_t - d_0) \delta N_f \quad (24)$$

$P_t$  es determinado según la figura 5, siendo el arreglo a  $30^\circ$ .

$A_{fr}$  = Área frontal

$$A_{fr} = L_2 * L_3 \quad (25)$$

$\sigma$  = Relación de área de flujo mínima al área frontal.

$$\sigma = \frac{A_0}{A_{fr}} \quad (26)$$

$\forall$  = Volumen total.

$$\forall = L_1 * L_2 * L_3 \quad (27)$$

$\alpha$  = Relación de densidad de área.

$$\alpha = \frac{A}{\forall} = \frac{A_p + A_f}{L_1 * L_2 * L_3} \quad (28)$$

$Dh$  = Diámetro hidráulico.

$$Dh = \frac{4\sigma}{\alpha} \quad (29)$$

Para el cálculo del factor  $J$  de colburn utilizamos la siguiente correlación provista por Wang y Chi (2000)<sup>24</sup> para un arreglo de tubos con aletas de superficie plana.

$$j = 0.086 \text{Re}_{do}^{c_3} \cdot N_r^{c_4} \left(\frac{P_f}{d_0}\right)^{c_5} \left(\frac{P_f}{D_h}\right)^{c_6} \left(\frac{P_f}{X_t}\right)^{-0.93} \quad \text{para } N_r \geq 2 \quad (30)$$

Donde:

$$\text{Re}_{do} = \text{Número de Reynolds externo} = \frac{\dot{m}_a * d_0}{A_0 * \mu_a} \quad (31)$$

$\mu_a$  = Viscosidad dinámica del aire a la temperatura fílmica o de película  $t_f$ .

$$\text{Siendo } t_f = \frac{\bar{t}_a + T_p}{2} \quad (32)$$

Y

$$\bar{t}_a = \text{Temperatura promedio del aire} \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (33)$$

$$C_3 = -0.361 - \frac{0.042 N_r}{\text{Ln Re}_{do}} + 0.158 \text{Ln} \left[ N_r \left(\frac{P_f}{d_0}\right)^{0.41} \right] \quad (34)$$

$$C_4 = \frac{-1.224 - 0.076 \left(\frac{X_t}{D_h}\right)^{1.42}}{\text{Ln Re}_{do}} \quad (35)$$

$$C_5 = -0.083 + \frac{0.058 N_r}{\text{Ln Re}_{do}} \quad (36)$$

$$C_6 = -5.735 + 1.21 \text{Ln} \frac{\text{Re}_{do}}{N_r} \quad (37)$$

En donde  $P_f$  es el paso de aleta y  $N_r = N_f =$  número de filas. Las ecuaciones 30 a 37 son válidas para los siguientes rangos de parámetros:

$$300 \leq \text{Re}_{do} \leq 20000; \quad 6.9 \leq d_0 \leq 13.6\text{mm}; \quad 1.30 \leq D_h \leq 9.37\text{mm}$$

$$20.4 \leq X_t \leq 31.8\text{mm}; \quad 12.7 \leq X_\ell \leq 32\text{mm}; \quad 1.0 \leq P_f \leq 8.7\text{mm y}$$

<sup>24</sup>SHAH, Ramesh K y DUSAN, P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Haboken: John Wiley. 2003. p. 520.

$$1 \leq N_r \leq 6$$

- Cálculo de la eficiencia superficial de aleta.

La eficiencia para cualquier aleta está definida como el cociente del calor real transferido sobre el calor transferido si la aleta estuviera a la temperatura de la base.

Para determinar la eficiencia de una aleta de placa continua utilizamos la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\tanh(mr\phi)}{mr\phi} \quad (38)$$

En donde:

$$m = \left( \frac{2h_e}{K_{al}\delta} \right)^{1/2} \quad (39)$$

$\delta$  = Espesor de aleta.

$K_{al}$  = Conductividad térmica del material de la aleta (Aluminio).

$$\phi = \left( \frac{R_0}{r} - 1 \right) \left[ 1 + 0.35 \text{Ln} \left( \frac{R_0}{r} \right) \right] \quad (40)$$

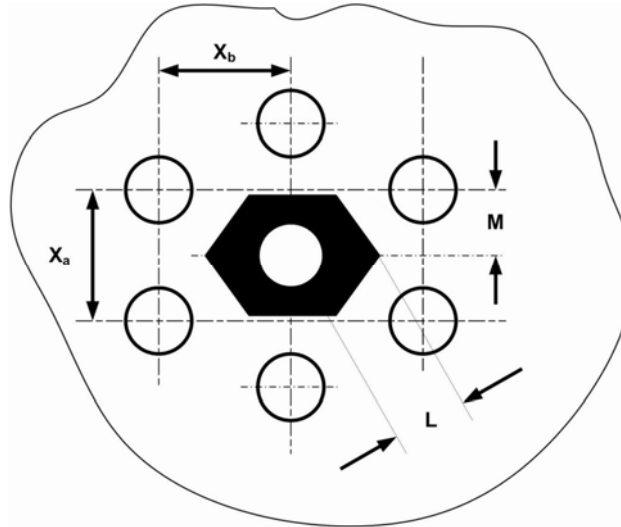
$$\frac{R_0}{r} = 1.27 \Psi (\beta - 0.3)^{1/2} \quad (41)$$

En donde según la figura 31:

$$\Psi = \frac{M}{r_0} \quad (42)$$

$$\beta = \frac{L}{M} \quad (43)$$

Figura 31. Arreglo tubular hexagonal.



Fuente: Mc QUISTON Faye C, PARKER Jerald D, SPITLER Jeffrey D. Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y diseño. México: Limusa -Wiley. 2003. p 493.

La eficiencia superficial de aleta se define como:

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta) \quad (44)$$

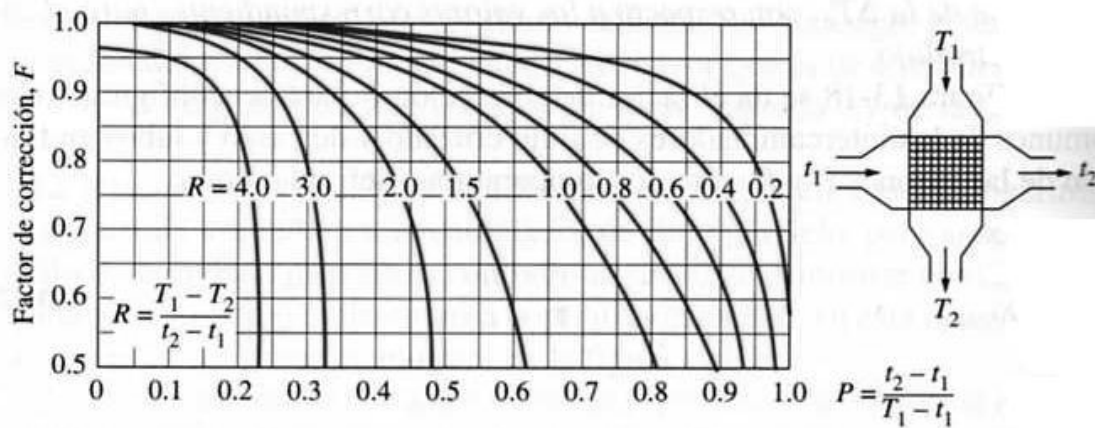
- Cálculo del factor de corrección.

En la figura 32 se da el factor de corrección  $F$  para la configuración de intercambiadores de flujo cruzado, no mezclado en función de las razones  $P$  y  $R$  entre 2 temperaturas, definidas como:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (45)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (46)$$

Figura 32. Diagrama del factor de corrección F.



c) Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no mezclado

Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p 684.

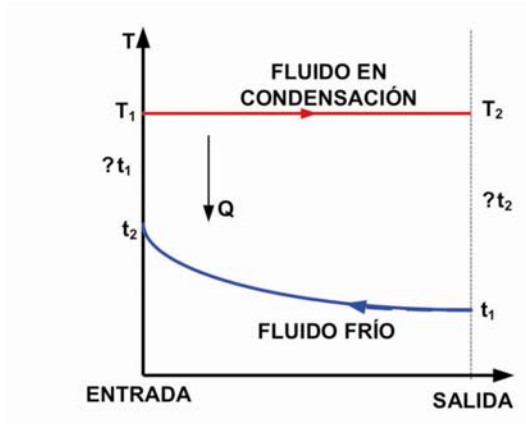
Para la zona de condensación  $F = 1$ .

- Cálculo de la LMTD.

Debido a que la temperatura de los fluidos varía a lo largo del intercambiador de calor (figura 33), es apropiado usar una diferencia de temperatura promedio, siendo la LMTD el método de análisis utilizado.

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 - \Delta t_2)} \quad (47)$$

Figura 33. Diagrama de temperaturas para el cálculo de la LMTD.



Fuente: autores del proyecto.

Donde:

$\Delta t_1$  = Diferencia de temperaturas de entrada del vapor  $T_1$  y salida del aire  $t_2$ .

$$\Delta t_1 = T_1 - t_2 \quad (48)$$

$\Delta t_2$  = Diferencia de temperaturas de salida del vapor  $T_2$  y de entrada del aire  $t_1$ .

$$\Delta t_2 = T_2 - t_1 \quad (49)$$

- **Etapa de subenfriamiento.** En la etapa de subenfriamiento, ya con la mezcla en fase líquida, ocurre un cambio de temperatura necesario para luego proceder con la etapa de separación a llevarse a cabo en el vaso florentino o recipiente separador de aceites esenciales.

El proceso de diseño es similar a la etapa de condensación, sólo con unas pequeñas variantes, por estar la mezcla en fase líquida.

- Calor cedido por el vapor condensado.

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_l C_{pl} (T_{2l} - T_{1l}) \quad (50)$$

Donde:

$\dot{Q}_l$  = Calor cedido por el vapor condensado (estado líquido).

$\dot{m}_l$  = Flujo másico en estado líquido.

$T_{2l}$  = Temperatura de salida del líquido subenfriado.

$T_{1l}$  = Temperatura de entrada del vapor condensado.

- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor interno  $h_i$  para el subenfriamiento de líquido en tubería lisa para este caso,

$$h_i = \frac{K_a}{d_i} * 4.36 \quad \text{Si } Re_{di} < 2300 \quad (51)$$

ó

$$h_i = \frac{K_a}{d_i} * 0.023 Re_{di}^{0.8} Pr^{0.3} \quad \text{Si } Re_{di} > 10000 \quad (52)$$

Siendo

$$Re_{di} = \frac{\dot{m}_l d_i}{A_i \mu_l} \quad (53)$$

- Cálculo de la resistencia de pared  $R_p$ .

La resistencia de pared  $R_p$  es un componente conductivo del coeficiente global de transferencia de calor y está dada por:

$$R_p = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L_1 K_{cobre @ T_p}} \quad (54)$$

$K_{cobre @ T_p}$  = Conductividad térmica del cobre a la temperatura de la pared del tubo  $T_p$ .

- **Determinación del área requerida.** Dividiendo las ecuaciones de transferencia global de calor tenemos:

$$\frac{A_c}{A_s} = \frac{Q_c \mu_s LMTD_s}{Q_s \mu_c LMTD_c} \quad (55)$$

Los valores de  $Q_c$ ,  $\mu_s$ ,  $Q_s$ , son conocidos, por lo tanto tenemos que hallar los nuevos valores de  $LMTD_s$  y  $LMTD_c$ , asumiendo un porcentaje de área para cada proceso de condensación  $A_c$  y subenfriamiento  $A_s$  respectivamente, hasta igualar el término de la izquierda con el término de la derecha en la ecuación 55.

Para hallar los valores de las nuevas  $LMTD$  seguimos el siguiente procedimiento:

- Asumir porcentajes de área usados para condensación y subenfriamiento, respectivamente.
- Hallar  $t_2$  para el aire, teniendo en cuenta el porcentaje asumido para condensación y subenfriamiento de  $\dot{Q}_{c,s} = \% \text{asumido} * \dot{m}_a * \overline{C_{pa}} (t_2 - t_1)$

$$\text{Tenemos que } t_{2c,s} = \frac{\dot{Q}_{c,s}}{\% \text{asumido} * \dot{m}_a * C_{pa}} + t_1 \quad (56)$$

- Hallar el nuevo valor de la  $LMTD$  para condensación y subenfriamiento, respectivamente.

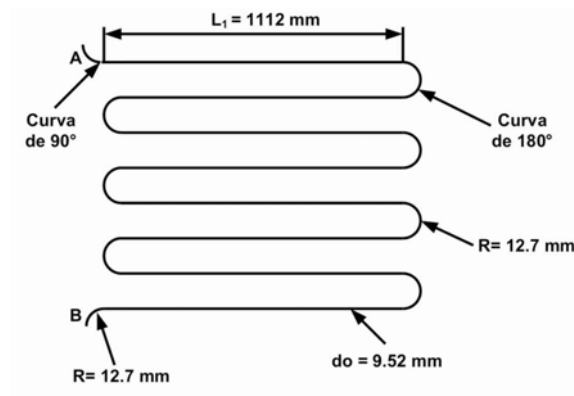
$$LMTD_{c,s} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln[(T_1 - t_2)/(T_2 - t_1)]} \quad (57)$$

- Reemplazar los valores en la ecuación 55 y verificar que el término de la izquierda sea igual al de la derecha.

Si esto no se consigue, se procede a efectuar otra asunción de los porcentajes de área para cada zona de condensación y subenfriamiento respectivamente y se repite el procedimiento.

- **Cálculo de la caída de presión.** Como se obtiene mayor caída de presión analizando el fluido en estado líquido que en vapor, se asume que el fluido se encuentra en estado líquido durante todo el recorrido dentro del serpentín; para analizar este valor como posible dato crítico para la selección de la tubería tenemos que para cada fila (figura 34) de tubos del serpentín:

**Figura 34. Serpentín de condensación.**



Fuente: autores del proyecto.

$$\Delta P = \frac{0.00225 K_T \rho Q^2}{d^4} \quad (58)$$

$$R_e = \frac{21.22 Q \rho}{d \mu} \quad (59)$$

$$K_t = f \frac{L}{D} \quad \text{Para tubería recta.} \quad (60)$$

$$K_{90} = 14 f t \quad \text{Para curvas de } 90^\circ. \quad (61)$$

$$K_B = (n - 1) \left( 0.25 \pi f_T \frac{r}{d} + 0.5 K_{90} \right) + K_{90} \quad \text{Para curvas de } 180^\circ. \quad (62)$$

$$K_T = Kt + K_{90} + K_{180}^{25}. \quad (63)$$

Para cada fila del serpentín tenemos:

**Cuadro 10. Datos de entrada para el cálculo de la caída de presión.**

L[m]	Curvas de 90°	Curvas de 180°	Q[lpm]	f
22,24	2	19	0,1458	5,66x10 <sup>-2</sup>

Fuente: autores del proyecto.

Sustituyendo tenemos:

**Cuadro 11. Datos de salida para el cálculo de la caída de presión.**

Re	K tubería [m]	K curvas 90° [m]	K curvas 180° [m]	K total [m]	ΔP en 1 fila [Pas]	ΔP total, 4 filas [Pas]
1129	144,68	1,3584	21,82	167,86	137,89	551,5

Fuente: autores del proyecto.

- **Proceso de solución y datos de salida.** En el siguiente cuadro se muestra la secuencia establecida para el proceso de diseño térmico del intercambiador de calor propuesto.

**Cuadro 12. Proceso de solución y datos de salida.**

PASO	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN	N°	VALOR
	ZONA DE CONDENSACIÓN			

<sup>25</sup>CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: Mc. Graw -Hill. 1992. p. 4-9.

1	Calor cedido por el vapor.	$\dot{Q}_v = \dot{m}_v h_{fgv @ 93,5^\circ C}$	1	22108 W
2	Calor ganado por el aire, para hallar $t_2$ .	$\dot{Q}_a = \dot{m}_a C_{pa @ t_i} (t_2 - t_1)$	2	22108 W $t_2 = 35^\circ C$
	Temperatura promedio del aire.	$\frac{t_1 + t_2}{2}$	2.1	26,5 °C
3	Calor global de transferencia $Q_T$ .	$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD$	3	32157 W
4	Área interna de los tubos $A_i$ .	$A_i = \pi * d_i * L * N_t$	4	1,11 m <sup>2</sup>
	Asunción del número de filas NF.	$N_t = NTF * NF$	5	NF=4 N <sub>t</sub> = 80
5	Coficiente global de transferencia de calor $U_{/Ai}$ .	$\frac{1}{U_{/Ai}} = \frac{1}{h_i A_i / A_i} + \frac{R_p}{A_i} + R_f + \frac{1}{h_e \eta_s A_0 / A_i}$	6	435 W/m <sup>2</sup> °C
	Masa velocidad $G_v$ .	$G_v = \frac{4\dot{m}}{\pi d_i^2}$	9	40,78
5.1	Coficiente de transferencia de calor interno $h_i$ .	$h_i = \frac{K_L}{d_i} * 0.1(P_{ri})^{1/3} \left( \frac{h_{fg}}{C_{pi} \Delta t} \right)^{1/6} \left[ \frac{d_i G_v}{\mu_i} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} \right]^{2/3}$	10	21694 W/m <sup>2</sup> °C
	Diferencia de temperaturas.	$\Delta t = T_{sat} - T_p$	11	32,5°C
	Temperatura de pared $T_p$ .	$T_p = T_v - \dot{Q}_v \left( \frac{1}{h_i A_i} + R_p + \frac{R_f}{A_i} \right)$	13	61°C
	Resistencia de pared $R_p$ .	$R_p = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2 * \pi * L_1 * K}$	14	6,92x10 <sup>-5</sup> [°C/W]
5.2	Coficiente de transferencia de calor externo $h_e$ .	$h_e = \frac{J * G_c * C_p}{P_r^{2/3}}$	17	89,55 W/m <sup>2</sup> °C
	Masa velocidad $G_c$ .	$G_c = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}}$	17.1	,55

	PARÁMETROS MODULARES			
	Área Primaria $A_p$ .	$A_p = \pi d_0 (L_1 - \delta N_f L_1) N_t + 2(L_2 L_3 - \frac{\pi d_0^2}{4} N_t)$	18	1,15m <sup>2</sup>
	Área de aleta $A_f$ .	$A_f = 2 \left[ L_2 L_3 - \left( \frac{\pi d_0^2}{4} \right) N_t \right] N_f L_1 + 2 L_3 \delta N_f L_1$	19	18,97m <sup>2</sup>
	Área total A.	$A = A_p + A_f$	20	20,04m <sup>2</sup>
	Área mínima de flujo $A_0$ .	$A_0 = \left[ \left( \frac{L_3}{X_t} - 1 \right) C'' + (X_t - d_0) - (X_t - d_0) \delta N_f \right] L_1$	21	0,152m <sup>2</sup>
	Factor $2a''$ para hallar $C''$ .	$2a'' = (X_t - d_0) - (X_t - d_0) \delta N_f$	23	14,90
	Área frontal $A_{fr}$ .	$A_{fr} = L_2 * L_3$	25	0,260m <sup>2</sup>
	Relación de áreas $\sigma$ .	$\sigma = \frac{A_0}{A_{fr}}$	26	0,584
	Volumen total del condensador.	$\nabla = L_1 * L_2 * L_3$	27	0,0228 m <sup>3</sup>
	Relación de área/volumen $\alpha$ .	$\alpha = \frac{A}{\nabla} = \frac{A_p + A_f}{L_1 * L_2 * L_3}$	28	875 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
	Diámetro hidráulico $D_h$ .	$Dh = \frac{4\sigma}{\alpha}$	29	2,66 mm
	Factor J de Colburn.	$j = 0.086 Re_{do}^{-0.3} N_r^{C_1} \left( \frac{P_f}{d_0} \right)^{C_2} \left( \frac{P_f}{D_h} \right)^{C_3} \left( \frac{P_f}{X_t} \right)^{-0.93}$	30	8,04x10 <sup>-3</sup>
	Número de Reynolds externo $Re_{do}$ .	$Re_{do} = \frac{\dot{m}_a * d_0}{A_0 * \mu_a}$	31	4194,8
	Temperatura fílmica o de película $t_f$ .	$t_f = \frac{\bar{t}_a + T_p}{2}$	32	44°C
	Coficiente $C_3$ .	$C_3 = -0.361 - \frac{0.042 N_r}{Ln Re_{do}} + 0.158 Ln \left[ N_r \left( \frac{P_f}{d_0} \right)^{0.41} \right]$	34	-0,259
	Coficiente $C_4$ .	$C_4 = \frac{-1.224 - 0.076 \left( \frac{X_t}{D_h} \right)^{1.42}}{Ln Re_{do}}$	35	-1,40
	Coficiente $C_5$ .	$C_5 = -0.083 + \frac{0.058 N_r}{Ln Re_{do}}$	36	-5,51x10 <sup>-2</sup>

	Coeficiente $C_6$ .	$C_6 = -5.735 + 1.21 \text{Ln} \frac{\text{Re}_{do}}{N_r}$	37	2,68
	Eficiencia de aleta $\eta$ .	$\eta = \frac{\tanh(mr\phi)}{mr\phi}$	38	0,80
	Coeficiente $m$ .	$m = \left( \frac{2h_e}{K_{al}\delta} \right)^{1/2}$	39	76,08
	Coeficiente $\phi$ .	$\phi = \left( \frac{R_0}{r} - 1 \right) \left[ 1 + 0.35 \text{Ln} \left( \frac{R_0}{r} \right) \right]$	40	2,48
	Relación $R_0/r$ .	$\frac{R_0}{r} = 1.27 \Psi (\beta - 0.3)^{1/2}$	41	2,82
	Parámetro geométrico $\Psi$ .	$\Psi = \frac{M}{r_0}$	42	2,66
	Parámetro geométrico $\beta$ .	$\beta = \frac{L}{M}$	43	1
5.3	Eficiencia superficial de aleta $\eta_s$ .	$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta)$	44	0,81
5.4	Factor de corrección $F$ .	Figura 32.	F. 32*	1
5.5	Diferencia Media Logarítmica de Temperatura LMTD.	$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\text{Ln}(\Delta t_1 - \Delta t_2)}$	47	66,6°C
	Diferencia de temperaturas $\Delta t_1$ .	$\Delta t_1 = T_1 - t_2$	48	58,5°C
	Diferencia de temperaturas $\Delta t_2$ .	$\Delta t_2 = T_2 - t_1$	49	75,5°C
	<b>ZONA DE SUBENFRIAMIENTO</b>			
6	Calor cedido por el vapor condensado.	$\dot{Q}_l = \dot{m}_l C_{pl} (T_{2l} - T_{1l})$	50	2787 W
7	Calor ganado por el aire, para hallar $t_2$ .	$\dot{Q}_a = \dot{m}_a C_{pa} (t_2 - t_1)$	2	2787 W $t_2 = 20^\circ\text{C}$
8	Coeficiente de transferencia de calor interno $h_i$ .	$h_i = \frac{K_a}{d_i} * 4 * 36$	51	327,75 W/m <sup>2</sup> °C
	Número de Reynolds interno $Re_{di}$ .	$Re_{di} = \frac{\dot{m}_l d_i}{A_i \mu_l}$	53	761,5

\*Figura 32. Para procesos de condensación  $F=1$ .

	Resistencia de pared.	$R_p = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi L_1 K_{\text{cobre @ } T_p}}$	54	$6,92 \times 10^{-5}$ [°C/W]
9	Calor global de Transferencia $Q_T$ .	$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD$	3	5921,5 W
10	Verificar que $Q_c$ y $Q_s$ sean mayores que los requeridos.	$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD$	3	OK
11	<b>DETERMINACIÓN DE ÁREAS REQUERIDAS <math>A_c, A_s</math></b>			
	Asunción de porcentajes de área para cada proceso.	Asumir % para $A_c$ y $A_s$ .		$A_c = 72\%$ $A_s = 28\%$
	Relación de áreas.	$\frac{A_c}{A_s} = \frac{Q_c \mu_s LMTD_s}{Q_s \mu_c LMTD_c}$	55	2,57
	Temperatura de salida del aire para el proceso de condensación.	$t_{2c,s} = \frac{\dot{Q}_{c,s}}{\%_{\text{asumido}} * \dot{m}_a * C_{p_a}} + t_1$	56	52,11°C
	Temperatura de salida del aire para el proceso de subenfriamiento.	$t_{2c,s} = \frac{\dot{Q}_{c,s}}{\%_{\text{asumido}} * \dot{m}_a * C_{p_a}} + t_1$	56	25,57°C
	Diferencia Media Logarítmica de Temperatura LMTDc.	$LMTD_{c,s} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln[(T_1 - t_2)/(T_2 - t_1)]}$	57	56,74°C
	Diferencia Media Logarítmica de Temperatura LMTDs.	$LMTD_{c,s} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln[(T_1 - t_2)/(T_2 - t_1)]}$	57	26,81°C
	Determinar $A_c$ .	$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD$	3	1,301 m <sup>2</sup>
	Determinar $A_s$ .	$Q_T = U_{/Ai} * A_i * F * LMTD$	3	0,551 m <sup>2</sup>
12	<b>CAÍDA DE PRESIÓN</b>	$\Delta P = \frac{0.00225 K_T \rho Q^2}{d^4}$	58	0,08 psi = 551,5 Pa.
13	<b>FIN</b>			

Fuente: autores del proyecto.

**6.4.2 Diseño mecánico y construcción.** El condensador de vapor esta constituido básicamente por los siguientes elementos:

- Un cuerpo o panel conformado por un conjunto de tubos y aletas geoméricamente distribuidos y un par de cabezales y colectores.
- Dos motores eléctricos y sus accesorios eléctricos de funcionamiento (arrancador, capacitares, estructura soporte).
- Dos hélices (para la convección forzada).
- Dos rejillas o arañas de protección.
- Estructura de soporte.

- **Cuerpo o panel.** Esta conformado por 4 serpentines en circuitos individuales, cada uno con 20 tubos de cobre de 3/8" de diámetro externo; aletas de aluminio de 0,13mm de espesor debidamente espaciadas a través de la longitud de los tubos. Posee dos colectores de cobre de 1 1/2" de diámetro nominal; uno para la entrada y posterior distribución del flujo de vapor hacia el interior de los tubos y otro a la salida de los serpentines para la recolección del condensado. Cuenta con dos soportes o cabezales en lámina galvanizada para su montaje y cuenta con un babero en lámina galvanizada para el alojamiento de las hélices de los motoventiladores.

- **Diseño de los tubos.**

Para determinar el espesor de los tubos se usan las formulas de diseño del código ASME sección VIII, suponiendo\* como máxima presión de operación en el sistema una presión de 15 psi, presión a la que esta diseñada el casco destilador o alambique.

$$Pd = 1,1 * Mpo.$$

---

\*El sistema opera a presión atmosférica pero se supone una presión superior por seguridad en el diseño.

$$Pd = 1,1*(15\text{psi}) = 16,5 \text{ psi.}$$

$$Pd = 16,5 \text{ psi.}$$

En donde:

Pd = presión de diseño.

Mpo = máxima presión de operación.

Por lo tanto la Presión de diseño Pd es igual a 16,5 psi (113 KPa) para el interior de los tubos.

Usando la ecuación la siguiente ecuación de la norma ASME sección VIII:

$$t = \frac{Pd * R}{S * E - 0.6Pd} \quad (64)$$

En donde:

t = espesor mínimo requerido para los tubos.

Pd = presión de diseño (113 KPa).

R = radio interior de los tubos (0,00435m).

S = máximo valor de esfuerzo admisible (202600 kPa).

E = eficiencia de la junta (0,6).

Reemplazando en la ecuación 64 para obtener el espesor mínimo de los tubos tenemos que:

$$t = 113*0,00435 / (202600*0,6 - 0,6*113).$$

$$t = 4,04 \times 10^{-6}\text{m} = 4,04 \times 10^{-6}\text{mm.}$$

Se seleccionó tubería de cobre por su alta conductividad térmica, tipo M de 3/8" de diámetro (cuadro 13) por su importante uso, fácil manejo y bajo costo en el mercado.

**Cuadro 13. Características de la tubería.**

TIPO DE TUBERÍA	DIÁMETRO EXTERNO $d_o$ [mm]	DIÁMETRO INTERNO $d_i$ [mm]	MATERIAL
TIPO M	9,52	8,70	Cobre

Fuente: autores del proyecto.

La tubería es expandida mecánicamente asegurando un contacto perfecto y uniforme entre las aletas y el tubo.

- **Aletas.** Corrugadas fijadas por expansión mecánica a la tubería lo que hace que el equipo ofrezca alto rendimiento. Fabricadas en aluminio perfectamente espaciadas entre sí conservando un paso de 12 aletas/pulgada y un espesor de 0,13 mm (cuadro 14).

**Cuadro 14. Características de las aletas.**

SÍMBOLO	PARÁMETRO	VALOR
$N_f$	Paso de aleta	12 aletas/pulgada
$\delta$	Espesor de aleta	0,13 mm
Al	Material	Aluminio

Fuente: autores del proyecto.

- **Cabezales y babero.** Posee dos cabezales o soportes fabricados en lámina galvanizada calibre 18 para el montaje del condensador y un babero en el mismo material para el alojamiento de las hélices de los motoventiladores.
- **Proceso de construcción del cuerpo o panel<sup>26</sup>.**

El proceso de fabricación del panel se inicia en la maquina cortadora (figura 35) de tubos la cual permite cortar la tubería de cobre según las dimensiones propuestas en los planos de diseño.

**Figura 35. Máquina cortadora de tubos.**



Fuente: [www.thermocoil.com.co](http://www.thermocoil.com.co).

---

<sup>26</sup>Fuente: <http://www.thermocoil.com.co>.

El resultado es un corte de alta calidad, libre de virutas. Una vez obtenido el numero determinado de tubos, se almacenan para su posterior uso en la maquina ensambladora de condensadores (figura 36).

**Figura 36. Maquina ensambladora.**



Fuente: [www.thermocoil.com.co](http://www.thermocoil.com.co)

En esta última los tubos previamente almacenados en el dispensador van cayendo alternadamente junto con cada aleta proveniente de la máquina laminadora (figura 37), dando por resultado el número de filas de tubos y aletas listas para su ensamble.

**Figura 37. Máquina laminadora.**



Fuente: [www.thermocoil.com.co](http://www.thermocoil.com.co).

El operador ubicado en la mesa de ensamble, teniendo él número determinado de aletas y tubos, coloca los elementos faltantes que son los cabezales y sus respectivos accesorios para que la máquina automáticamente realice compresión parcial de las partes, obteniendo así un panel en perfectas condiciones listo para entrar en la siguiente etapa de proceso.

El panel ya ensamblado es colocado en una banda transportadora la cual lo lleva a través de la máquina dispensadora de fundente, donde el producto es aplicado mediante boquillas que humedecen toda el área del condensador. Cuando el condensador está totalmente bañado en fundente, es colocado en el área de carga del horno.

Finalmente, panel es llevado a los laboratorios (figura 38) donde se realizan los ciclos de prueba de fugas con el fin de asegurar que alcance los estándares de rendimiento especificados.

**Figura 38. Laboratorio para prueba de fugas.**



Fuente: [www.thermocoil.com.co](http://www.thermocoil.com.co).

El producto resultante de este proceso es un cuerpo o panel completamente soldado, liviano, reciclable y de alto rendimiento térmico en un volumen pequeño (figura 39).

**Figura 39. Cuerpo o panel construido.**



Fuente: autores del proyecto.

- **Motores eléctricos y accesorios.** El condensador de vapor cuenta con dos motores eléctricos que junto con las hélices generan la corriente de aire que atraviesa el conjunto de tubos y aletas para conseguir la condensación y subenfriamiento del fluido de trabajo. Las principales características de estos motores y sus accesorios se muestran en el cuadro 15.

Para el montaje de los motores se construyeron dos soportes hechos de lamina HR de 1/16" de espesor y con algunos dobleces para darles rigidez y posteriormente pintados para protegerlos de la corrosión.

**Cuadro 15. Principales características de los motores eléctricos.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>
Tipo de motor.	Siemens-Capacitor permanente.
Ambiente.	Totalmente cerrado.
Protector del motor.	Térmico automático.
Nº de velocidades.	1.
Potencia.	1/3 HP.
Velocidad.	1075 rpm.
Voltaje.	208 V.
Plena carga.	2,1 A.
Capacitores.	2 x 370V a 7,5 mfd.
Arrancador.	Siemens 2,5 a 4 A.

Fuente: autores del proyecto.

- **Hélices.** Para la generación de la corriente de aire en el condensador se cuenta con dos hélices que son soportadas en los ejes de los motores eléctricos y sus características principales la podemos observar en el cuadro 16.

**Cuadro 16. Características principales de las hélices.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>
Tipo.	Hélice.
Circulación de aire @ 0.0 IN. WG (cfm).	2x 3200.
Diámetro nominal.	20".
Material.	Aluminio.
Diámetro del cubo.	1/2".

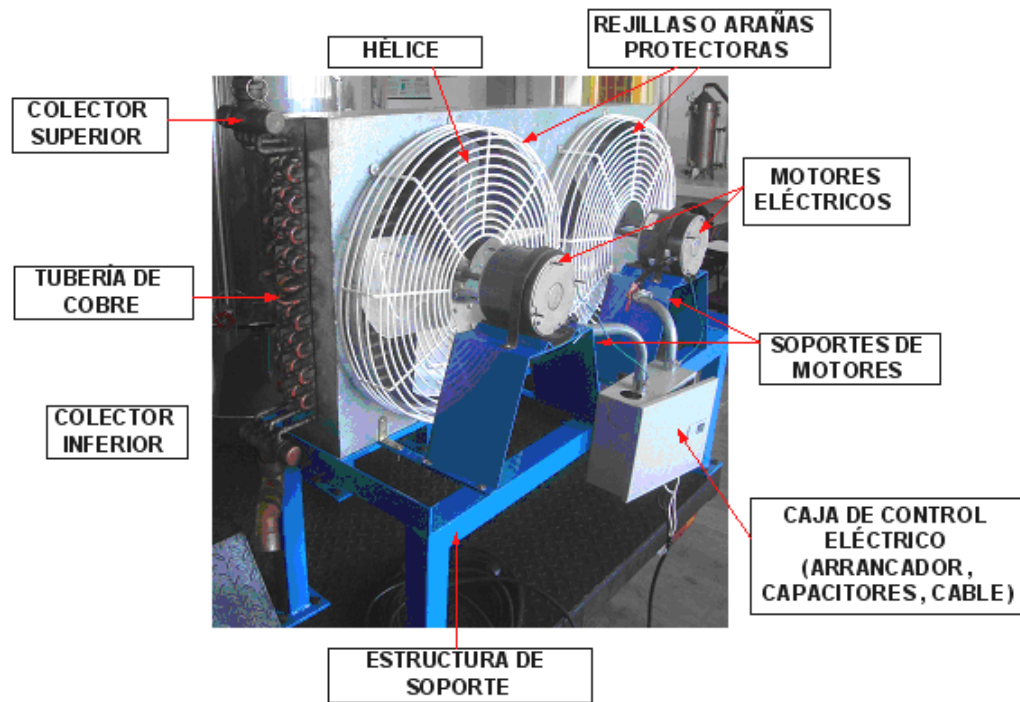
Fuente: autores del proyecto.

- **Rejillas o arañas protectoras.** El condensador de vapor cuenta con dos rejillas o arañas protectoras para brindar seguridad a los operarios del equipo y al equipo mismo evitando el contacto directo de partes del cuerpo humano o elementos extraños con las hélices girando a las revoluciones del motor.

- **Estructura soporte.** Para el montaje final del condensador sobre la estructura móvil se construyó una estructura rectangular con ángulo de acero estructural de 1<sup>1/2</sup>" y 4 columnas base en perfil estructural colmena cuadrado de 2", posteriormente pintadas para protegerla de la corrosión. Las uniones de esta estructura se realizaron mediante soldadura con arco metálico protegido (SMAW), electrodo West arco E7018-1/8".

Después de haber descrito los componentes principales del condensador de vapor podemos observar su construcción y montaje final en la figura 40.

**Figura 40. Construcción y montaje final del condensador de vapor.**

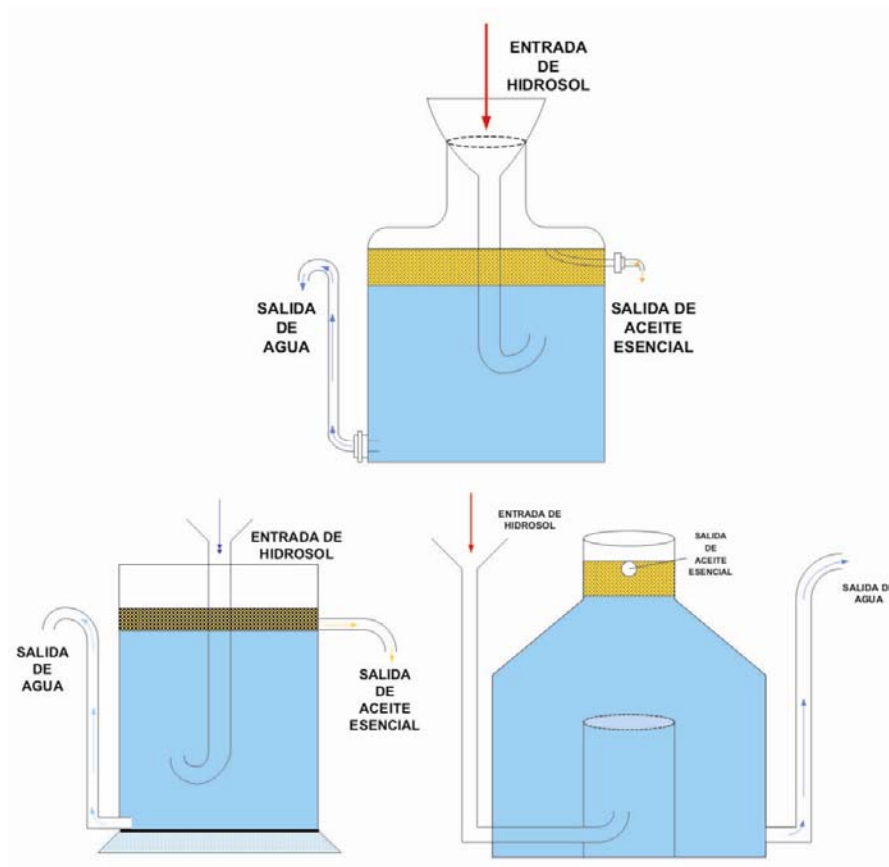


Fuente: autores del proyecto.

## 6.5 RECIPIENTE SEPARADOR O VASO FLORENTINO

El volumen del separador se puede obtener en varias geometrías, por lo que depende en cada caso del diseño mismo. A continuación se presenta algunos ejemplos de formas comunes de estos separadores de aceites esenciales (figura 41).

**Figura 41. Diferentes formas de separadores de aceites esenciales.**



Fuente: autores del proyecto.

### **6.5.1 Parámetros de diseño en el separador.**

- Para el diseño de los separadores de aceite, es necesario determinar los tiempos de residencia en los que el aceite esencial puede alcanzar el fondo o flotar en el agua.
- De acuerdo con el tiempo de residencia que se determinó y el flujo del condensado que se maneja, puede calcularse el volumen del separador de aceites.
- Los aceites que se trabajarán en el municipio de Bolívar están incluidos en el grupo de aceites esenciales más ligeros que el agua, por lo cual la capa de aceite se formará en la parte superior.
- Este separador se encuentra sometido a presión atmosférica.

### **6.5.2 Pasos para el diseño del separador o vaso florentino.**

- Clasificación del aceite a extraer según su densidad con respecto a la densidad del agua.

En este caso el separador que se necesita es uno para aceites esenciales ligeros.

- Tiempo de residencia  $T_r$  promedio aproximado de los aceites esenciales.

Se obtuvo experimentalmente haciendo pruebas de medición de este tiempo en diferentes tipos aceites, obteniéndose un tiempo aproximado promedio de 8 minutos.

- Conocer cuál es flujo másico de la mezcla de las dos sustancias que salen del condensador.

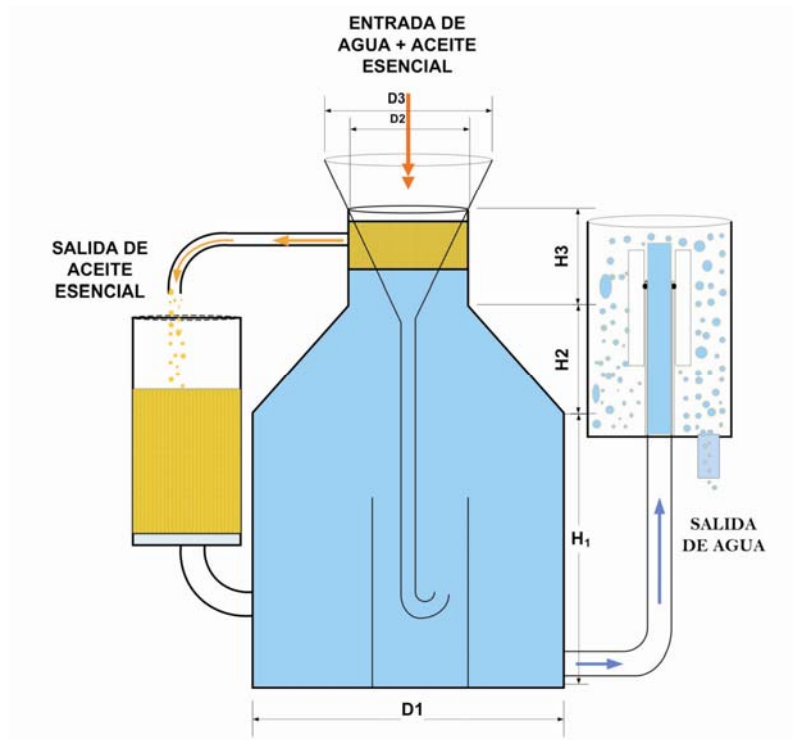
De acuerdo con las pruebas realizadas en el laboratorio se determinó que el flujo másico aproximado es  $\dot{m}_{con} = 35 \text{ kg/h}$ , luego el caudal es  $\dot{V}_{con} = 583.3 \text{ ml/min}$ .

- Calcular el volumen que requiere el recipiente separador.

$$V_s = \dot{V}_{con} * T_r.$$

- Definir la forma del Separador (figura 42).

**Figura 42. Forma propuesta para el recipiente separador.**



Fuente: autores del proyecto.

- Dimensionar el recipiente separador para definir su volumen.
- Volumen de la parte cilíndrica  $V_c = A_b * H_1$ .

- Volumen de la sección tronco cónica  $V_{tr} = 3,1416(r^2 + r'^2 + r * r') \frac{H_2}{3}$ .
- Volumen de la parte superior cilíndrica  $V_{psc} = A_b * \frac{H_3}{2}$ .
- Dimensionamiento del embudo.
  - a. Diámetro mayor ( $D_M$ ).
  - b. Diámetro menor ( $d_m$ ).
- Definir la rosca y sellado en la sección de salida de agua del recipiente.

**Cuadro 17. Datos de salida de recipiente separador.**

<b>DATOS DE SALIDA DEL RECIPIENTE SEPARADOR</b>		
Tiempo de residencia.	$T_r$	8 min.
Caudal del condensado.	$\dot{V}_{con}$	583,3 $\frac{ml}{min}$
Volumen del separador.	$V_s$	4,66 l
Volumen parte cilíndrica inferior.	$V_c$	4,1 l
Volumen del tronco-cono.	$V_{tc}$	0,55 l
Volumen parte cilíndrica superior.	$V_{pcs}$	0,01 l
Volumen total.	$V_T$	4,66 l
Diámetro mayor del embudo.	$D_M$	10,5 cm
Diámetro menor del embudo.	$d_m$	12,7 mm
Altura del embudo.	$H_4$	4 cm

Fuente: autores del proyecto.

**6.5.3 Funcionamiento.** Una vez sale del condensador -a baja velocidad- la mezcla aceite esencial más agua, se dirigen al recipiente separador entrando por el embudo; el separador debe favorecer la formación de una fase aceitosa superior y de una fase acuosa en la parte inferior. Cuando la fase aceitosa alcanza la altura del tubo de salida del aceite esencial, ésta empieza a salir hacia un recipiente pequeño de recolección de aceite puro, a la vez el agua o hidrosol empieza a salir. A la salida del agua el tubo tiene una rosca y una tuerca que permite desplazar o cambiar la altura del nivel, esto es necesario porque la densidad de los aceites esenciales puede variar entre 0.8 y 0.98 g/cm<sup>3</sup>.

El hidrosol se puede regresar al tanque si estamos en cualquiera de los procesos de hidrodestilación o agua-vapor.

**6.5.4 Construcción.** El vaso separador esta construido con un tubo sanitario en acero inoxidable de 6" de diámetro nominal en su parte inferior cilíndrica, su sección tronco cónica en lámina inoxidable del mismo espesor del tubo y la superior es cilíndrica construida con tubo sanitario de 2" de diámetro nominal. Cuenta con un embudo en lámina de acero inoxidable 1/16" de espesor, por donde entra el agua más el aceite esencial; además tiene dos salidas, una para el aceite esencial en tubo inoxidable de 3/8" de diámetro nominal y otra para la salida del agua, la cual cuenta con una rosca en el tubo y una tuerca que permite variar el nivel para la salida del aceite esencial, según su densidad. Para la recolección del mismo se dispone de un pequeño recipiente cilíndrico en acero inoxidable.

**Figura 43. Recipiente separador construido.**



Fuente: autores del proyecto.

- **Soldadura.** Las uniones fueron hechas mediante proceso de soldadura con arco de tungsteno y gas inerte (GTAW), utilizando como material de aporte soldadura 308L-16.

## 6.6 ALAMBIQUE

En lo que respecta a equipos de extracción de aceites esenciales mediante arrastre con vapor, hidrodestilación o agua-vapor, es necesario involucrarse en experimentaciones realizadas a nivel de laboratorio y planta piloto, esto permite conocer y determinar las variables de proceso que se deben controlar en una extracción de este tipo y que deben a su vez tomarse en cuenta para diseñar los equipos, de tal forma que sean las mas adecuadas a dicho proceso, buscando el menor costo de fabricación y la mejor calidad del producto<sup>27</sup>.

---

<sup>27</sup>BANDONI, Op. Cit., p. 171.

Para determinar el volumen requerido del casco resulta muy valioso evaluar la densidad aparente del material vegetal que se va a destilar, que se puede estimar midiendo el peso del material que ocupa un volumen determinado. Este valor suele estar de 0,2kg/ litro para hojas<sup>28</sup>.

Para la elección de los materiales de construcción del destilador debe tenerse en cuenta que la mejor opción es el acero inoxidable calidad 304, fundamentalmente en todas las partes del equipo que estén en contacto directo con la esencia ya extraída, desde la parte superior del alambique mismo, hasta el frasco florentino o separador<sup>29</sup>.

#### **6.6.1 Consideraciones para el diseño del alambique.**

- Debe tener una capacidad aproximada de 50 kg de material vegetal. De acuerdo con Bandoni, el porcentaje de utilización del tanque es de 80% de su capacidad total.
- El cabezal superior debe evitar la condensación de la mezcla vaporizada y conducirla libremente. Un cabezal cónico es usado para hacer una reducción gradual del diámetro hacia otra sección menor.
- Para determinar el volumen requerido del alambique es necesario evaluar la densidad del material que se va a destilar.
- Para la elección del material de construcción del destilador. Debe tenerse en cuenta que la mejor opción es el acero inoxidable 304.

El alambique lo conforman primordialmente los siguientes elementos: un casco cilíndrico, un cabezal cónico, una canasta, 6 ganchos de cierre, la empaquetadura, el material aislante, el anillo de soporte para el eje de giro y otros accesorios tales

---

<sup>28</sup>Ibid., p. 176.

<sup>29</sup>Ibid., p. 178.

como un termómetro, un manómetro, una válvula de seguridad, un vidrio de nivel con sus respectivas llaves, y otros pequeños accesorios como niples y tapones. A continuación describiremos el proceso de diseño y/o características para cada uno de estos elementos.

**6.6.2 Pasos para el diseño del casco** (figura 44). A partir de los datos de entrada (cuadro 18) utilizamos el siguiente procedimiento:

**Cuadro 18. Datos de entrada para el diseño del casco.**

<b>Datos de entrada</b>	
Presión de diseño.	16 psi para diseñar con la norma ASME VIII DIV.1.
Temperatura.	100°C.
Porcentaje de capacidad.	0.8.
Capacidad.	50 kg aproximadamente.

Fuente: autores del proyecto.

- Determinar la densidad aproximada del material vegetal (cuadro 19).

Tomamos como densidad promedio  $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$ .

- Calcular el volumen o capacidad.

$V_1 = \frac{m}{\rho}$ . En donde  $V_1$  es el volumen para el material vegetal.

$V_2 =$  se definió como 25 L. En donde  $V_2$  es el volumen de agua necesario para el proceso de agua-vapor.

$V_t = V_1 + V_2$ . En  $V_t$  es el volumen total del casco.

Figura 44. Casco.



Fuente: autores del proyecto.

Cuadro 19. Densidades de las plantas a destilar.

<b>Medición de densidades de las plantas a destilar.</b>	
<i>Planta</i>	<i>Densidad</i>
Lippia alba	122
Cidrón	150
Albahaca	135
Manzanilla	190
Estragón Francés	185
Hierbabuena	155
Poleo	122
<b>Densidad promedio</b>	<b>151,28</b>
Densidad seleccionada para efectos cálculos	150
Nota	La densidad en cada celda es un promedio de cinco de mediciones hechas.

Fuente: autores del proyecto.

- Calcular el diámetro y longitud adecuada teniendo en cuenta las dimensiones de los materiales comerciales (ver tabla 1).

**Tabla 1. Diámetro y longitud para el casco.**

DIAMETRO Y LONGITUD ADECUADAS DEL CASCO		
DIÁMETRO	PERIMETRO(*D)	LONGITUD
0,8	2,513	0,919
0,79	2,481	0,943
0,78	2,450	0,967
0,77	2,419	0,992
0,76	2,387	1,019
0,756	2,375	1,029
0,755	2,371	1,032
0,75	2,356	1,046
0,745	2,340	1,060
0,74	2,324	1,074
0,735	2,309	1,089
0,73	2,293	1,104
VOLUMEN FINAL DEL CASCO		0,46M <sup>3</sup>

Fuente: autores del proyecto.

- Establecer la presión de diseño.

Pd= 16 psi.

- Calcular el espesor del casco.

$$t = \frac{Pd * R}{SE - 0.6Pd} \quad \text{en donde:}$$

Pd=presión de diseño.

S= valor del esfuerzo del material.

E= eficiencia de la junta.

R= radio interior.

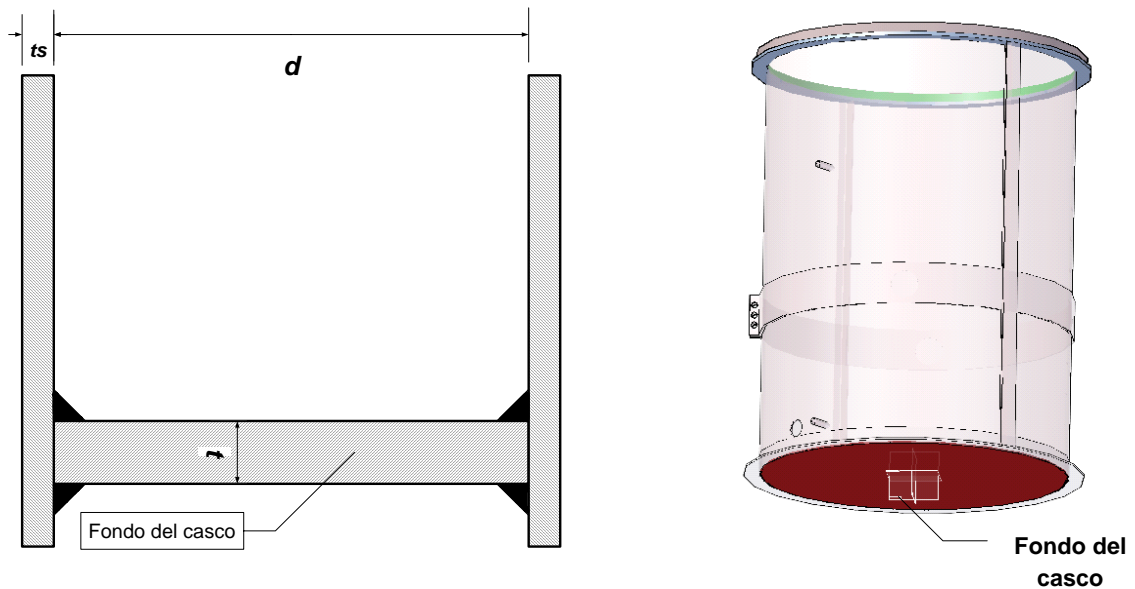
D= diámetro interior.

t=espesor de pared.

Eficiencia de la junta no examinada = 0.7 según norma UW-12<sup>30</sup>.

### 6.6.3 Pasos para el diseño del fondo del casco (figura 45).

Figura 45. Fondo del casco.



Fuente: autores del proyecto.

- Establecer el tipo de cabezal: cabezal circular plano.
- Determinar el diámetro del cabezal (diámetro del cilindro +tolerancia).
- Calcular el espesor.

Para esto debemos hallar la presión estática ejercida por la columna de agua colocando como limite superior que el tanque se llenará completamente.

$$P_E = \rho gh = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 1.03m = 10104.3Pa.$$

$$P = P_d + P_E = 120424,3 Pa.$$

$$t = d \sqrt{CP / SE} \quad \text{y} \quad C = 0.33 * \frac{tr}{ts} \quad \text{con } C_{min} = 0.2.$$

$P_d$  = presión de diseño.

<sup>30</sup>MEGYESY, Eugene F. Manual de recipientes a presión: diseño y cálculo. México: Limusa Noriega Editores. 1998.

$d$ =diámetro interior del casco.

$S$ =valor máximo de esfuerzo permitido del material. (215Mpa)

$t$ =espesor mínimo requerido del cabezal.

$t_r$ =espesor mínimo requerido, por presión del casco.

$t_s$ =espesor real del casco.

$C_{min} < 0.2$  entonces  $C_{min} = 0.2$ .

#### **6.6.4 Pasos para el diseño de la tapa del casco (figura 46).**

Partiendo de los siguientes datos definidos de entrada:

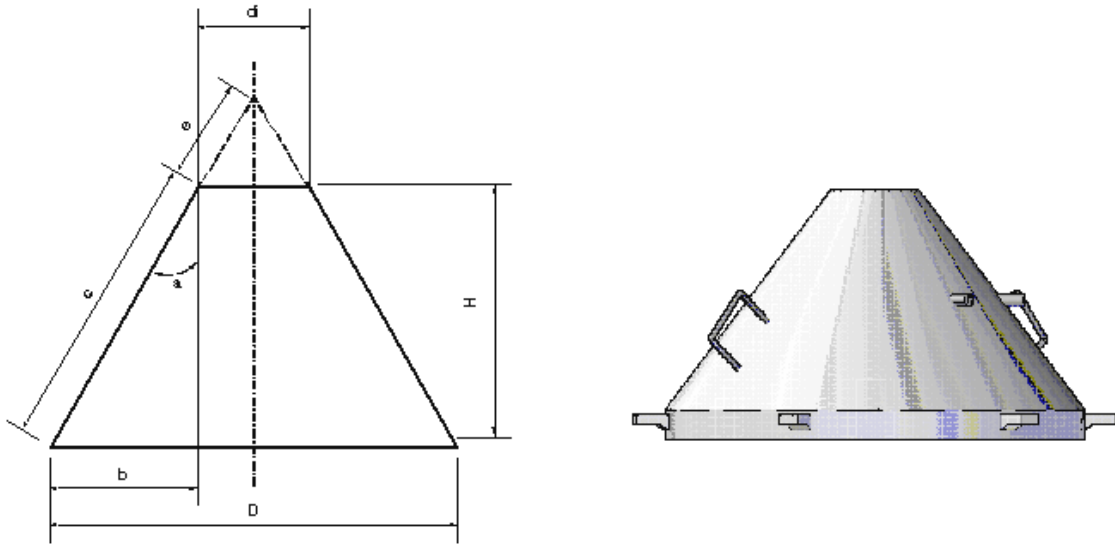
$d_i = 169.7$  mm.

$D = 778.7$  mm.

$H = 415$  mm.

- Establecer el tipo de cabezal: cónico.
- Definir el diámetro del cabezal.
- Definir diámetro de lá base mayor ( $D$ ).
- Definir diámetro de lá base menor ( $d_i$ ).
- Definir lá altura ( $H$ ).

Figura 46. Tapa del casco.



Fuente: autores del proyecto.

- Calcular la conicidad.
- Calcular el espesor (t).

$$t = \frac{PD}{2\cos\alpha(SE + 0.4P)}$$

P=presión máxima de diseño.

D=diámetro exterior.

$\alpha$ =la mitad del ángulo en el vértice.

S=valor del esfuerzo del material.

E=eficiencia de la junta.

- Calcular b.

$$b = \frac{D - d_i}{2}$$

- Calcular C.

$$C = \sqrt{H^2 + b^2}.$$

### 6.6.5 Pasos para el diseño de la canasta (figura 47).

- Calcular la longitud de la malla.

$l=0.8*L$  donde L es la longitud del casco.

- Definir la tolerancia entre la pared de la canasta y el tanque;

Tolerancia=12mm.

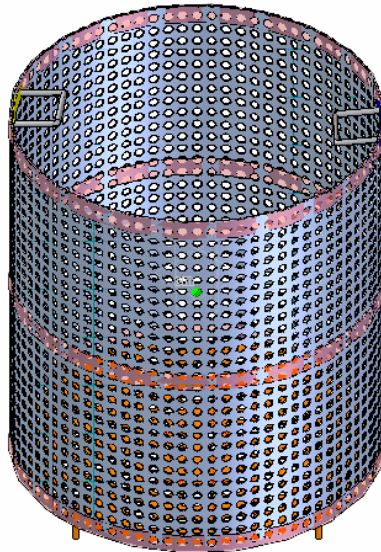
- Calcular el diámetro de la canasta.

$D= C_{\text{casco}}-\text{tolerancia}$ .

- Halla la capacidad de la canasta.

$$\text{Capacidad} = \frac{\pi * d^2 * l}{4}.$$

**Figura 47. Canasta.**



Fuente: autores del proyecto.

### 6.6.6 Pasos para el diseño de los ganchos de cierre (figura 48).

Partiendo de los siguientes datos definidos de entrada:

Diámetro interno del casco= 756mm.

Máxima presión interna= 16psi.

Material de los tornillos y a su vez el esfuerzo de fluencia de este.

Acero inoxidable 304;  $S_y=215$  Mpa o 31200Psi.

Número de pernos= 6.

Pasos para el cálculo:

- Calcular la carga total  $F_t$  sobre la tapa.

$$F_t = P \cdot \pi \cdot D^2 / 4.$$

Calcular la carga media externa ( $F_e$ ) en cada uno de los seis tornillos.

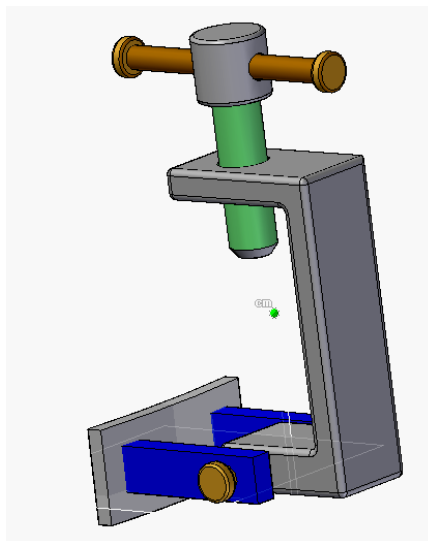
$$F_e = F_t / 6.$$

- Calcular el área de esfuerzo  $A_s$ .

$$A_s = \left( \frac{6F_e}{S_y} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

Con este dato de  $A_s$  vamos a la tabla At 14; (anexo G) y elegimos un diámetro inmediatamente mayor al valor de el área de esfuerzo  $A_s$  obtenido.

**Figura 48. Ganchos de cierre.**



Fuente: autores del proyecto.

**6.6.7 Datos de salida.** Siguiendo los anteriores procedimientos para el diseño del casco, el fondo del casco la tapa del casco y la canasta, se obtienen los siguientes resultados consignados en los cuadros 20, 21, 22 y 23.

**Cuadro 20. Datos de salida para el casco.**

<b>Casco cilíndrico</b>	
<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>
Presión de diseño (Pd)	16 Psi
Temperatura (T)	94°C
% de capacidad	0,8
Capacidad	50 kg
Densidad( $\rho$ )	150 kg/m <sup>3</sup>
Volumen (V)	0,462 m <sup>3</sup>
Diámetro (D)	0,756m
Longitud (L)	1,03m
Eficiencia de la junta (E)	0,7
Material	Acero inoxidable 304
Esfuerzo permitido del material (S)	215 Mpa
Espesor de pared por presión (t)	0,2772 mm
Espesor de pared real	2,5 mm definido estructuralmente

Fuente: autores del proyecto.

**Cuadro 21. Datos de salida para el fondo del casco.**

<b>Fondo del casco</b>	
<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>
Tipo de cabezal	Circular plano
Material	Acero inoxidable 304
Presión de diseño (Pd)	110320 Pa
Presión estática (PE)	10104,3 Pa.
Espesor mínimo del casco, por presión (tr)	0,277mm
Espesor real del casco	2,5 mm
Diámetro del fondo	754 mm
Espesor del fondo	4,27 mm
Espesor final determinado para el fondo	5 mm

Fuente: autores del proyecto.

**Cuadro 22. Datos de salida para la tapa del casco.**

<b>Tapa del casco</b>	
<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>
Tipo de cabezal	Cónico
Diámetro de la base mayor (D)	778,7 mm
Diámetro de la base menor (di)	169,7 mm
Altura (H)	415 mm
Conicidad ( $\alpha$ )	37°
Material	Acero inoxidable 304
Espesor del cabezal	0,357 mm
Espesor real definido para el casco estructuralmente	1/16"

Fuente: autores del proyecto.

**Cuadro 23. Datos de salida para la canasta.**

<b>Canasta</b>	
<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>
Material	Acero inoxidable 304
Diámetro (Di)	740 mm
Longitud (l)	800 mm
Volumen de la canasta	0,344 m
Espesor de la canasta	2 mm

Fuente: autores del proyecto.

**6.6.8 Empaquetaduras.** El material seleccionado para fabricar la empaquetadura es el neopreno siliconado. En el cuadro 24 presentamos sus características.

**Cuadro 24. Características de la empaquetadura.**

<b>Material</b>	<b>Limite de temperatura</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Resistencia química</b>	<b>Resistencia a la abrasión</b>
Neopreno siliconado	-55°C a +425°C	1.25	Buena	Ligera a buena

Fuente: autores del proyecto.

**6.6.9 Aislamiento del casco** (figura 49). El casco se aisló con lana de fibra de vidrio de espesor de 1 ½" (ver propiedades en el anexo D). La cual tiene como funciones, aislar el casco para evitar pérdidas de calor excesivas por la superficie del casco para economizar combustible, así mismo disminuir el tiempo del proceso de ebullición del agua, proporcionar seguridad evitando que una persona sufra quemaduras al colocar las manos sobre el casco. La lana de fibra de vidrio está protegida por una lamina brillante de acero inoxidable AISI 304 calibre 26.

**Figura 49. Aislamiento del casco.**



Fuente: autores del proyecto.

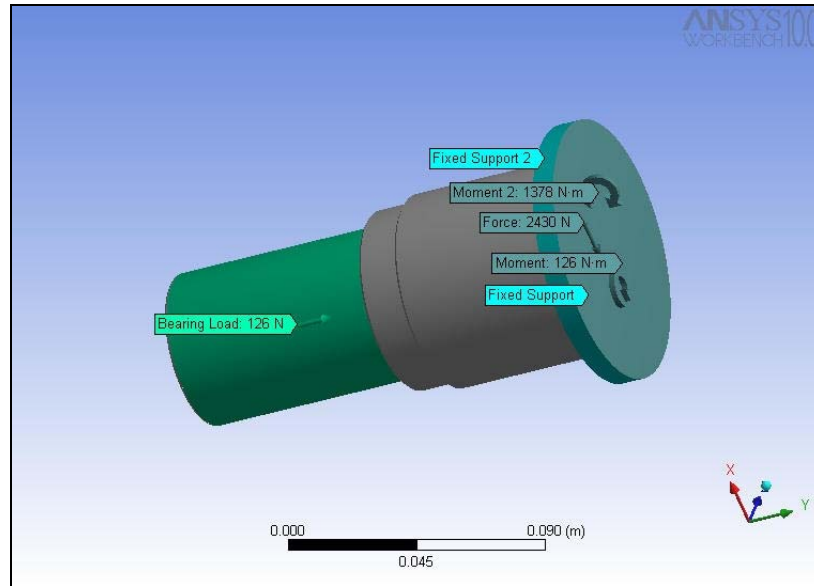
**6.6.10 Anillo de soporte para los ejes de giro.** Este anillo está ubicado sobre el casco del tal forma que cuando el casco esté vacío quede en posición vertical y que cuando este lleno con una mínima fuerza se pueda girar fácilmente. Para esto utilizamos la herramienta CAD\* Solid Edge, porque nos permitió ubicar el centroide del casco y sus componentes con solo digitar cada una de las propiedades físicas de cada pieza.

---

\*Diseño Asistido por Computador.

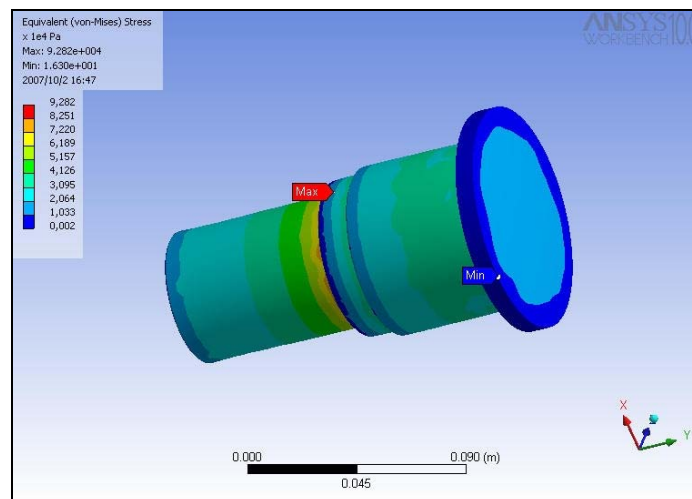
**6.6.11 Eje.** Fabricado en acero SAE AISI 1045, el cual sirve como medio de giro para el casco, facilitando así la carga y descarga del material vegetal. Contiene un disco soldado y la unión se realizó con soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido AWS E7018.

**Figura 50. Fuerzas ejercidas sobre el eje.**



Fuente: autores del proyecto.

**Figura 51. Esfuerzos en el eje.**

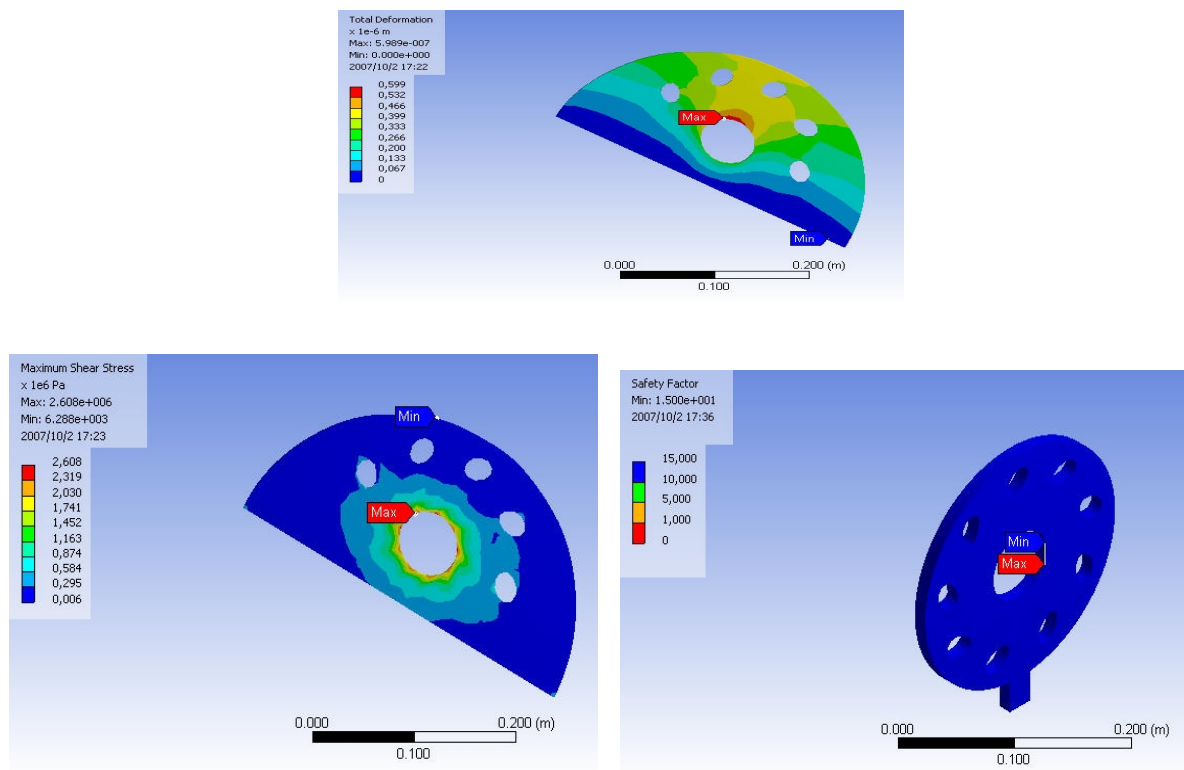


Fuente: autores del proyecto.

En la figura 50 se indican las fuerzas ejercidas sobre el eje y posteriormente en la figura 51 se obtiene el resultado del análisis de esfuerzos del eje y se observa que no presenta ningún tipo de falla. Se utilizó el software Ansys workbench 10 para para comparar resultados.

**6.6.12 Semidisco y disco de giro del casco.** Construidos en lámina HR de  $\frac{1}{2}$ " , los cuales poseen agujeros que al girar permiten varias posiciones de forma segura al casco, utilizando un trinquete especial.

**Figura 52. Semidisco y disco de giro del casco.**

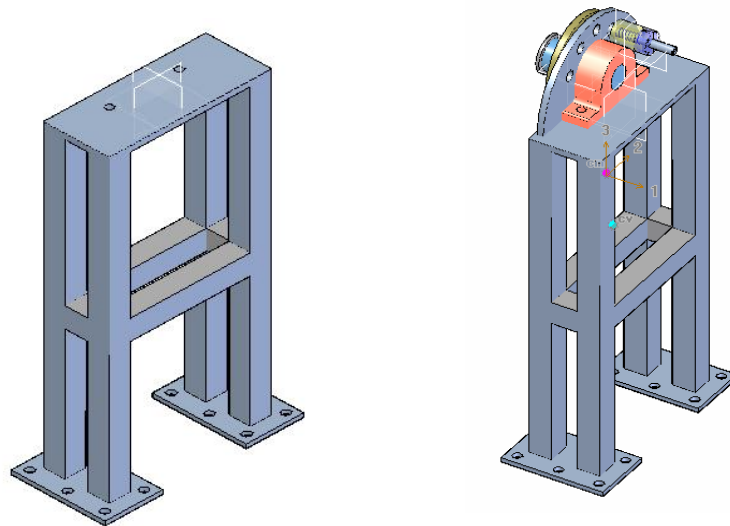


Fuente: autores del proyecto.

En la figura 52 se obtiene el resultado del análisis de esfuerzos del Semidisco y disco de giro del casco y se observa que no presentan ningún tipo de falla.

**6.6.13 Soporte** (figura 53). El casco cuenta con una estructura construida en perfil cuadrado colmena de 2" y 2.82mm de espesor que soporta totalmente al casco y le permite girar permaneciendo estable y sin ningún tipo de vibración. Esta estructura esta recubierta con pintura electroestática, protegiéndola de la oxidación. En el soporte están apoyados dos rodamientos con sus respectivos soportes o chumaceras tipo pesado NKB P 211, para facilitar el giro del casco.

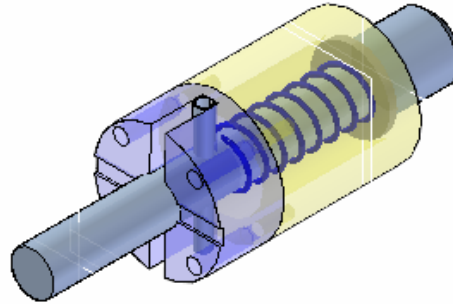
**Figura 53. Soporte del casco.**



Fuente: autores del proyecto.

**6.6.14 Trinquete** (figura 54). La función de este trinquete es frenar y fijar el casco en diferentes posiciones. El eje, la tapa y el cuerpo cilíndrico están construidos en acero SAE AISI 1020, el resorte en alambre de acero ASTM 227calibre 0,0720" y cuenta con pin elástico de 1/4" .

Figura 54. Trinquete.



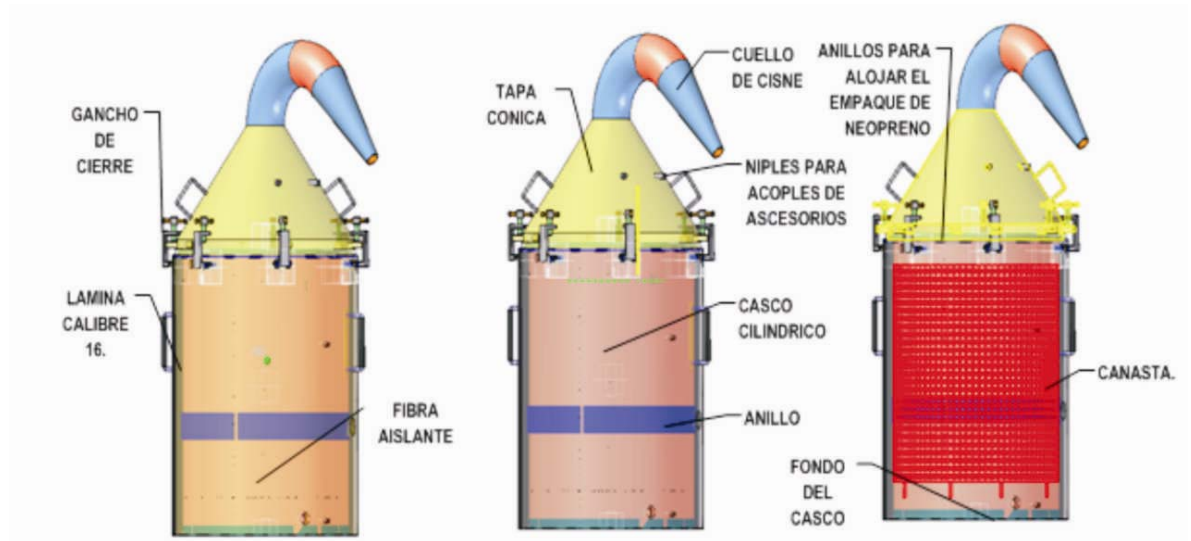
Fuente: autores del proyecto.

**6.6.15 Accesorios.** El alambique cuenta además con los siguientes accesorios:

- **Manómetro:** carátula de 2" con escala de 0 a 30 psi.
- **Termómetro:** con escala de 0 °C a 250 °C.
- **Válvula de seguridad:** Calibrada a 15 psi.
- **Medidor de nivel:** vidrio medidor de nivel con una altura de 600 mm.
- **Válvula de drenaje:** cuenta con un drenaje con una válvula 1".

**6.6.16 Conjunto del alambique.** Todo el conjunto de elementos que conforman el alambique y su respectivo montaje lo podemos observar en la figura 55.

**Figura 55. Elementos del alambique.**



Fuente: autores del proyecto.

## 6.7 REMOLQUE

El remolque es un vehículo de carga que no tiene fuerza motriz propia y que es arrastrado o halado por un vehículo motorizado al cual no le transmite peso. En este caso la carga que transporta el remolque son los componentes descritos en los subcapítulos anteriores, tales como el alambique, recinto de combustión, condensador, separador o vaso florentino, estructuras de soporte y demás accesorios necesarios para llevar a cabo los procesos de extracción de los aceites esenciales (hidrodestilación y agua-vapor), para llegar a zonas en donde hay volúmenes considerables de material vegetal los cuales desplazarlos influye en el presupuesto del proceso y en donde no se cuenta con la provisión de insumos imprescindibles como el agua y el combustible para la obtención de los aceites esenciales.

El remolque construido es del tipo de tres cuartos de dos ruedas, usualmente usado para cargas ligeras.

Dentro de la clasificación SAE Standard J684 para trailers está clasificado como **clase 1** por poseer un peso inferior a 910 kg (incluyendo la carga).

El chasis del remolque consta principalmente de un *bastidor, un cuerpo del remolque, un sistema de suspensión, un tren de soporte, ruedas y otros accesorios.*

La carga total del remolque es prácticamente balanceada en la suspensión del remolque. Usualmente el 15 por ciento de la carga del remolque es empujada contra la conexión del vehículo tractor.

**6.7.1 Bastidor.** Es el conjunto armazón del remolque. Soporte de los grupos funcionales y de la carga a transportar.

Forma parte de la masa suspendida. Sirve de conexión con la masa no suspendida, constituida por suspensión, ejes y ruedas<sup>31</sup>.

El bastidor del remolque se compone de dos rieles llamados largueros, que se extienden uno a cada lado del eje longitudinal del remolque, con miembros transversales más cortos denominados travesaños fijados a ambos largueros a determinados intervalos para darle mayor rigidez debido que el bastidor se enfrenta a la flexión producida como consecuencia de las cargas verticales y por los esfuerzos de torsión que soporta durante las diferentes condiciones de la marcha o cuando está estacionado. Dependiendo de lo anterior se definió el espesor del

---

<sup>31</sup>CASCAJOSA SORIANO, Manuel. Ingeniería de vehículos: sistemas y cálculos. 2 ed. México: Alfaomega; Madrid: Tebar Flores. 2005. p. 201.

material y también el perfil de largueros y travesaños, el cual es abierto para proporcionar rigidez a flexión y elasticidad a torsión.

Los largueros y travesaños están contruidos en chapa de acero laminada en caliente\* de 3/16" de espesor, armada en secciones transversales en forma de C; las uniones se realizaron mediante soldadura con arco metálico protegido (SMAW), electrodo West arco E 7018-1/8". La construcción enteramente soldada contribuye a la eliminación de ruidos y hace al bastidor rígido y fuerte.

La suspensión, eje y ruedas están unidos al bastidor para formar lo que se conoce como chasis.

Un factor importante a tener en cuenta en el diseño del bastidor es su longitud transversal (ancho) puesto que es una de las variables fundamentales atener en cuenta para asegurar la estabilidad del remolque durante la marcha.

**6.7.2 Cuerpo del remolque.** El bastidor y el cuerpo forman una unidad integral. Los travesaños que están debajo del cuerpo refuerzan el entablado del piso y forman la sección trasera del bastidor. El cuerpo sirve de unidad estructural para alojar algunos accesorios que hacen parte del remolque como los son las patas de estacionamiento, las luces de transito y la baranda frontal, entre otras.

El piso del cuerpo del bastidor esta conformado por dos tramos de lámina alfajor\* de 2,5mm de espesor. El extremo delantero descansa directamente en un bastidor en forma de V y posee una baranda divisora construida en lamina hot rolled calibre 26 previamente doblada para darle rigidez y está unida a un marco

---

\*Lamina conocida comercialmente como Hot Rolled o HR. Ver características en el anexo B.

\*Ver características de la lámina alfajor en el anexo C.

construido en perfil angular de 1<sup>1</sup>/<sub>2</sub>" x 3/16" de acero estructural A-36, que también sirve de alojamiento para la rueda de repuesto (figura 56).

También hacen parte del cuerpo dos guardabarros laterales construidos igualmente en lámina alfajor de 2mm de espesor previamente doblada.

Todas las uniones en el cuerpo del remolque se realizaron mediante soldadura con arco metálico protegido (SMAW), electrodo West arco E 7018-1/8".

**Figura 56. Cuerpo del remolque.**



Fuente: autores del proyecto.

**6.7.3 Sistema de suspensión.** Es el conjunto de elementos elásticos que se interponen entre los órganos suspendidos (bastidor y carga) y los órganos no suspendidos (ruedas y eje).

Su función es absorber las reacciones producidas en las ruedas por las desigualdades del terreno, asegurando confort en la marcha y estabilidad del remolque en bien de la carga transportada.

La suspensión se constituye de la forma más general por el conjunto de neumáticos, resortes metálicos (ballestas) y amortiguadores, sin embargo los elementos básicos son los resortes y los amortiguadores.

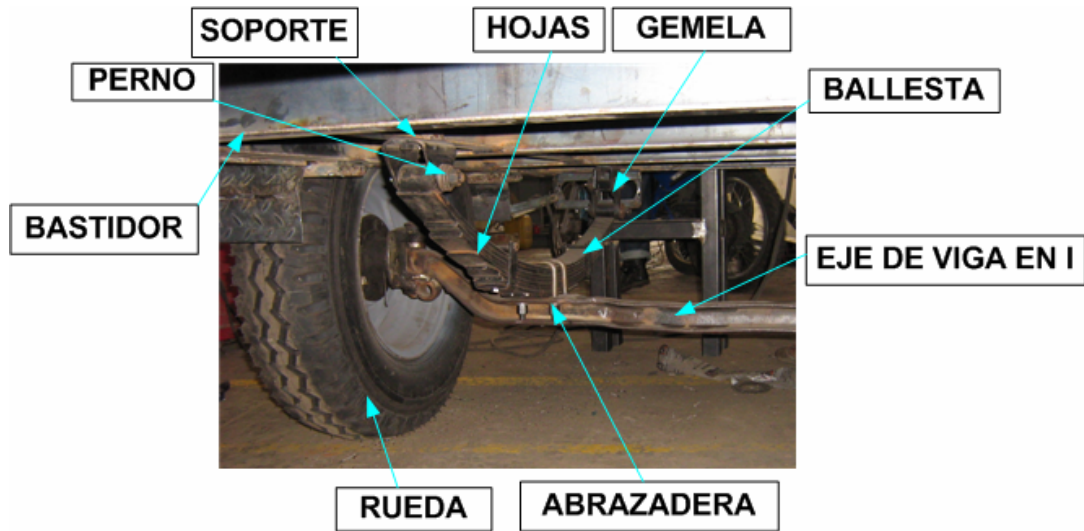
- **Arquitectura de la suspensión.** Fue utilizado un sistema de suspensión de eje rígido de viga en I, en donde hay una unión solidaria entre las dos ruedas del eje, donde los movimientos de una rueda influyen sobre los del lado opuesto. En este sistema un eje sólido de viga en I\* está unido al bastidor del remolque por medio de ballestas de hojas semielípticas. Las ballestas reducen las perturbaciones originadas por los desplazamientos hacia arriba y hacia debajo de las ruedas debido a las irregularidades del suelo, ocasionando un estado de vibración a la masa no suspendida (ruedas y eje); al deformarse la ballesta las hojas se deslizan entre ellas, transformando parte de la energía acumulada por fricción.

- **Las ballestas.** Están constituidas por 6 hojas o láminas de acero especial para muelles, unidas mediante unas abrazaderas que permiten el deslizamiento entre las hojas cuando éstas se deforman por el peso que soportan. Las hojas son de sección rectangular constante y con longitudes escalonadas, dando una forma aproximadamente semielíptica. La hoja superior llamada hoja maestra es la que realmente soporta las fuerzas de tracción, frenada y transversal. Va curvada en sus extremos formando unos ojos en los que se montan unos casquillos de bronce para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos (figura 57).

---

\*El término de viga en I se debe a que la sección transversal del eje es de esta forma.

Figura 57. Sistema de suspensión.



Fuente: autores del proyecto.

La hoja maestra y las de refuerzo soportan la carga estática y dinámica de la masa suspendida.

Algunas de las características de la hoja maestra las podemos detallar en el cuadro 25

Cuadro 25. Características de hoja maestra.

ESPESOR	ANCHURA	DISTANCIA ENTRE CENTROS	ZONA INACTIVA	FORMA
1/4"	2"	105 cm	8cm A C/ LADO	SEMIELÍPTICA

Fuente: autores del proyecto.

- **Amortiguadores.** Estos elementos son los encargados de absorber las vibraciones de los muelles, convirtiendo en calor la energía cinética de la masa

oscilante. Cuando la rueda encuentra un obstáculo o bache, el muelle se comprime o alarga, recogiendo la energía mecánica producida por el choque, energía que devuelve a continuación, por efecto de su elasticidad, rebotando sobre el cuerpo del remolque, ya que es el punto móvil del sistema. Este rebote en forma de vibraciones es el que tiene que frenar el amortiguador, recogiendo, en primer lugar, el efecto de compresión y luego el de reacción del muelle, actuando de freno en ambos sentidos; por esta razón reciben el nombre de amortiguadores de doble efecto<sup>32</sup>.

Es decir, la función de los amortiguadores es la de transformar los movimientos de vibración de los muelles en otros más lentos y al mismo tiempo de menor amplitud y duración, en una palabra amortiguar los movimientos propios del muelle, de lo que se deriva su nombre<sup>33</sup>.

Los amortiguadores seleccionados que hacen parte del sistema de suspensión del remolque son del tipo telescópico de funcionamiento hidráulico. Están constituidos por dos tubos concéntricos cerrados en la parte superior con un retén, a través del cual desliza un vástago unido a otro tubo abierto, que hace de campana protectora, y al ojo del soporte de sujeción al bastidor. La energía desarrollada por el muelle en la compresión y reacción es recogida por el amortiguador y empleado en comprimir el aceite que lleva en su interior. La energía, transformada en calor, es absorbida por el aceite.

- **Neumáticos.** Es el conjunto de elementos que, montados sobre la llanta proporcionan a la rueda del remolque una banda neumática de rodamiento. El

---

<sup>32</sup>Camiones y vehículos pesados. Reparación y mantenimiento. Transmisión-chasis-equipos eléctricos. Madrid: Cultural. 2003. v.2. p. 187.

<sup>33</sup>MINISTERIO DEL EJÉRCITO Y LA FUERZA AEREA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Manual de automóviles y vehículos motorizados. México: Continental. 1970. p. 242.

neumático tiene la misión de absorber pequeñas irregularidades del terreno y proporcionar una ayuda a la suspensión del remolque y confort para el cuidado de la carga. El tipo de neumático utilizado es del tipo de cámara de aire en donde la llanta y la cubierta forman un conjunto resistente a la presión interna mientras que la estanqueidad del aire se consigue por medio de la cámara o tubo y la válvula de seguridad, evitando que el aire escape de su interior. El tamaño del neumático corresponde a una rueda metálica o rin de 15" de diámetro nominal.

**6.7.4 Tren de soporte.** Consiste en un eje sin fin vertical de acero SAE AISI 1010 de 1" de diámetro, rosca ordinaria, con una pequeña rueda giratoria de 4" de diámetro adherida a su extremo de abajo; con el fin de ayudar a sujetar y guiar el remolque cuando esté desacoplado del automóvil de tracción. La altura de la rueda giratoria y el tornillo sin fin puede ser variada por un manubrio de mano, para adaptarse a las condiciones del terreno de estacionamiento y cuando el remolque va a ser arrastrado por un automóvil tractor de diferente altura.

**6.7.5 Ruedas.** Son los elementos de unión entre el remolque y el suelo. Las ruedas están conformadas por un conjunto de elementos conocidos como cubierta o coraza, cámara de aire o tubo y rueda metálica o rin. Este conjunto de elementos tiene como función:

- Soportar la carga del remolque.
- Contribuir a la estabilidad.
- Mejorar la eficacia de la suspensión.

Entre los factores tenidos en cuenta para la selección de las ruedas del remolque vale la pena mencionar:

El tipo de terreno a transitar, que en este caso es bastante irregular por el estado de las carreteras de los municipios colombianos; la estabilidad del vehículo por efectos de la carga a transportar (altura de volteo) e intercambiabilidad con las ruedas del automóvil tractor.

Las principales características de las dos ruedas seleccionadas para el remolque se pueden observar en el cuadro 26.

**Cuadro 26. Características de las ruedas seleccionadas.**

MARCA	ANCHURA NOMINAL	DIÁMETRO NOMINAL	ÍNDICE DE CARGA	CATEGORÍA DE VELOCIDAD
GOOD YEAR	7"	15"	82	M

Fuente: autores del proyecto.

- **Cubierta o coraza.** Es la envoltura externa de la rueda y contiene en su interior la cámara de aire o tubo, está unida a la rueda metálica o rin y colabora a mejorar la suspensión del vehículo, proporcionando la adherencia necesaria al suelo y resistiendo la posible abrasión con el terreno. La cubierta o coraza de las ruedas seleccionadas poseen el tipo de bandas de rodadura necesario para dar una buena tracción en terrenos lodosos, tierra y caminos temporales.
- **Rueda metálica o rin.** Es el elemento de unión entre la cubierta y el eje, encargándose de soportar toda la carga transmitida. Las dos ruedas metálicas seleccionadas para el remolque son del tipo de disco, de 15" de diámetro nominal fabricadas en chapa de acero construidas por un proceso de estampado. La unión del disco al cubo del eje se realizó mediante tuercas y

espárragos, presentando los agujeros de paso de los espárragos de fijación un asiento cónico para centrar correctamente la rueda.

- **Cámara de aire o tubo.** Es un envase de caucho, continuo y circular y tiene por función contener y retener el aire a presión.

**6.7.6 Accesorios.** Otros accesorios de gran importancia que hacen parte del remolque construido son las patas de estacionamiento, el acople de remolque, las luces de tránsito y la estructura de descanso para el casco.

El remolque posee dos *patas de estacionamiento* de 4" de diámetro con agujeros a diferentes niveles para graduar la altura del remolque según las condiciones del terreno y dar estabilidad al remolque.

Posee un *acople* tipo bola clasificado como clase II según la norma SAE Standard J684 para trailers y acoples y sus características se pueden observar en el cuadro 27.

**Cuadro 27. Características del acople de enganche.**

CLASE SAE	CARGA MÁXIMA	DIÁMETRO BOLA
II	3500 lbs.	2"

Fuente: autores del proyecto.

Las *luces* de tránsito del remolque son del tipo pick up, de 12V, con tres divisiones de diferente color para señalar las funciones de frenado (rojo), reversa (blanco), parqueo de emergencia y giro del vehículo (amarillo). Las luces del remolque

cuentan con una conexión eléctrica\* de 6 puestos tipo hembra para simplemente conectar a la instalación eléctrica del automóvil tractor que debe ser tipo macho también de 6 puestos.

Sobre el remolque, hacia el costado derecho se encuentra instalada *una estructura metálica de apoyo* para el que el casco destilador descansa horizontalmente cuando sea halado el remolque, disminuyendo así la altura al piso del centro de gravedad del conjunto remolque y carga, para darle mayor estabilidad durante la marcha. Esta estructura esta construida por dos columnas tubulares en acero de 1 1/2" de diámetro y un semiaro en platina HR de 1 1/2" X 1/4". Una guaya de acero de 1/4" y un gancho tensor rodean el casco destilador para su sujeción durante la marcha.

En la figura 58 se puede observar el remolque construido con sus principales componentes.

**Figura 58. Remolque construido con sus principales componentes.**



Fuente: autores del proyecto.

\*Conocida comercialmente como pacha de 6 puestos.

**6.7.7 Seguridad y prevención.** Se sugirió que para que el remolque transite por las carreteras del territorio nacional porte como mínimo el siguiente equipo de carretera<sup>34</sup>:

- Un gato con capacidad para elevar el vehículo.
- Una cruceta.
- Dos señales de carretera en forma de triángulo en material reflectivo y provistas de soportes para ser colocadas en forma vertical o lámparas de señal de luz amarilla intermitentes o de destello.
- Un botiquín de primeros auxilios.
- Un extintor.
- Dos tacos para bloquear el remolque.
- Caja de herramienta básica que como mínimo deberá contener: Alicates, destornilladores, llave de expansión, llaves fijas y tornillería.
- Llanta de repuesto.
- Linterna.

Además también se sugirió tener en cuenta las siguientes recomendaciones para su transporte y operación:

- Poseer cintas reflectivas y tragaluces en la parte trasera y los costados laterales del remolque.
- Instalar una cadena de seguridad entre el remolque y el vehículo de tracción.
- Instalar dos candados de seguridad, uno para asegurar el acople de arrastre y otro para asegurar la rueda de repuesto.
- Contar con un marco porta-placa.
- Contar con avisos y señales de precaución para no adelantar en curva, especificación de la velocidad máxima, precaución en el manejo de los motores

---

<sup>34</sup>Fuente: <http://www.fonprevial.org.co>.

eléctricos, máxima presión en las ruedas y otras especificaciones del equipo que se crean necesarias para la seguridad durante la operación del equipo.

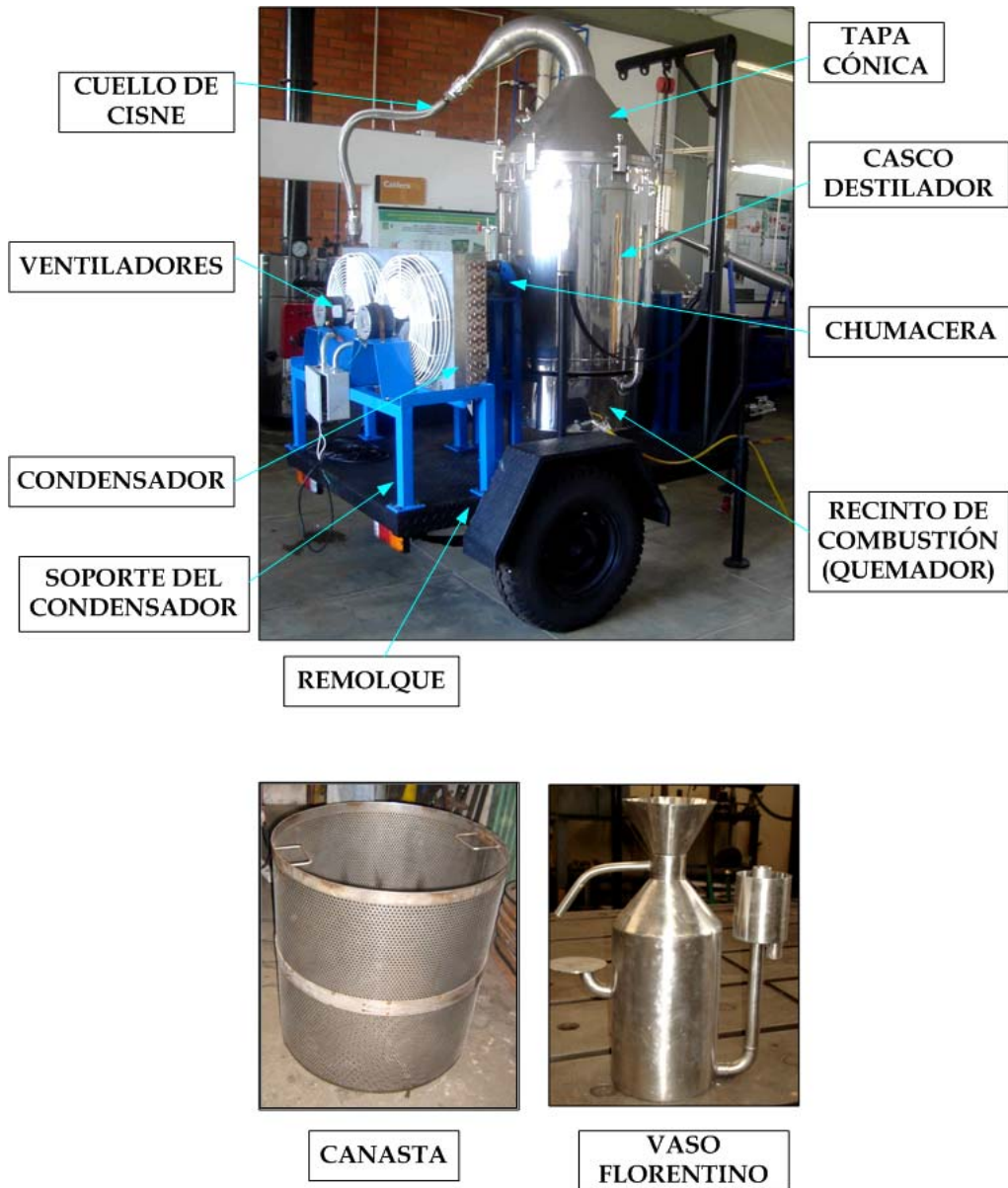
- No adelantar en curva.
- Conducir a una velocidad máxima de 20 km/h.
- El conductor del automóvil de tracción debe conocer las normas y señales de tránsito.
- Portar la documentación exigida por el ministerio de transporte para el tránsito de automóviles y remolques por las carreteras colombianas (placas, registros, licencias, seguros).
- Portar siempre los elementos de protección personal como delantal, casco, guantes, gafas, botas de seguridad y tapa-oidos.

## **6.8 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO FINAL**

El resultado tangible del diseño y construcción del sistema móvil para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 50 kg de material vegetal se muestra en la figura 59.

El equipo presenta las siguientes características generales: un montaje del alambique sobre chumaceras para facilitar la carga y descarga del material vegetal, el interior del alambique contiene una canasta para albergar la materia prima, un cuello de cisne formado por 2 secciones -una rígida y otra flexible- para facilitar el montaje y desmontaje de la tapa del casco destilador y un recinto para la combustión sujeto al casco destilador; cuenta con un condensador de vapor enfriado por aire y un recipiente separador o vaso florentino para la separación del aceite esencial del agua; todos estos componentes instalados en una estructura móvil (remolque), dotada de 2 ruedas y un acople remolcador, para facilitar su transporte a los diferentes puntos donde estarán ubicadas las destilerías.

Figura 59. Equipo final construido.



Fuente: autores del proyecto.

Las características particulares de cada componente del equipo fueron descritas con más detalle en capítulos anteriores. Dimensiones, ensamble, procesos de soldadura y otras características de construcción están incluidas en los planos CAD (Diseño Asistido por Computador) que acompañan el presente trabajo de grado.

## **7. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO**

### **7.1 MANTENIMIENTO DEL CUERPO DEL REMOLQUE**

Debido a que esta estructura está construida en acero al carbono, con recubrimiento de pintura, se hace necesario mantenerla limpia removiendo agentes que puedan deteriorar la pintura y posteriormente presentar oxidación, así como mantenerla seca y libre de toda humedad.

### **7.2 MANTENIMIENTO DE LOS ELEMENTOS EN CONTACTO DIRECTO CON EL MATERIAL VEGETAL, AGUA Y ACEITE ESENCIAL**

Vale recordar que elementos que se encuentran en contacto directo con el material vegetal tales como el casco destilador, la canasta, el cuello de cisne y el vaso florentino que aún cuando han sido construidos con acero inoxidable, es necesario lavarlos con agua y jabón después de cada destilación para evitar obtener un aceite contaminado en las destilaciones siguientes.

### **7.3 MANTENIMIENTO DEL CONDENSADOR**

Cada seis meses o antes si las condiciones locales provocan la obstrucción o ensuciamiento de los pasos de aire a través de la superficie aletada efectuar lo siguiente:

- El serpentín del condensador debe ser limpiado y lavado.

Limpiar periódicamente con un cepillo, aspiradora, agua presurizada, o una solución jabonosa limpiadora de serpentines comercial. Si se usa una solución jabonosa limpiadora, ésta no debe ser de base ácida. Seguir las instrucciones en la etiqueta del limpiador adecuado.

- Verificar la operación de los ventiladores del condensador.

Verificar que cada ventilador gire libremente.

Apretar todos los tornillos que sujetan el ventilador.

Inspeccionar las aspas del ventilador para cualquier señal de fatiga u otras características de desgaste. Si cualquier desgaste anormal es observado, cambiar las aspas.

#### **7.4 MANTENIMIENTO DE LAS BALLESTAS**

Dada la posición de las ballestas en el remolque éstas están expuestas constantemente a los efectos del polvo, el agua, el barro, la oxidación; como durante el trabajo las hojas de las ballestas deben deslizarse unas sobre otras sin excesivo rozamiento, periódicamente se debe prestar especial cuidado en conservarlas limpias y bien engrasadas, introduciendo entre ellas grasa lubricante a base de grafito.

## 8. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Los valores de los componentes, elementos y accesorios necesarios para la construcción del sistema móvil para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 50 kg de material vegetal, se puede observar en el cuadro 28. Los valores aquí consignados son tomados a la fecha de construcción del equipo\*.

**Cuadro 28. Costos de construcción.**

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
1	Alambique en lámina de acero inoxidable de espesor 2.5 mm y diámetro 757 mm, altura 1030 mm, 3 niples de ½", 1 niple de 1", fondo de 5 x 756 mm, brida superior de 7 mm con anillos de sello, empaque, ángulo y perfiles en AC para soporte de Foil y chaqueta en FV diámetro-835 x 1030 mm con cubierta en lámina inoxidable C26**.	1	3'980.000	3'980.000
2	Canasta en láminas inoxidable perforada, cal 16 de diámetro-706 x 752 mm con fondo perforado, bases soporte en tornillos de ½", 3 anillos circulares de refuerzo de 38 x 3 mm*.	1	2'245.000	2'245.000
3	Soporte para quemador con anillos soporte en platina, ángulo 38 x 4.7 mm y tornillos en acero A36, diámetro 761 mm*.	1	277.000	277.000

---

\*Valores de componentes, elementos y accesorios a diciembre de 2006.

\*\*Garantía de 1 año limitada a defectos de fabricación y construcción sujeta a planos suministrados.

4	Soporte para condensador de vapor en AC, perfil colmena 50 x 50 mm tamaño 615 x 1277 x 203 mm*.	1	265.000	265.000
5	Tapa cónica en acero inoxidable C16, diámetro 800 mm, borde en platina de 3 x 38 mm, salida en codo y semicodo de 6" con reducciones copa 6"/4"/2"/1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> ", bases tipo prensa en C de 38 x 57 x 150 mm y tornillos en T para apriete de sello*.	1	2'952.000	2'952.000
6	Estructura móvil para casco hidroddestilador de 147x 200 cm en AC, compuesto de chasis en perfil C 3"x 3/16", mesa en lámina alfajor de 2,5 mm, tren rodante con eje hueco, muelles, bocines, juego de rin - llantas de 14", tiro de arrastre en perfil C y luces de señalización normalizadas*.	1	2'723.000	7'623.000
7	Mecanismo de volteo para tanque hidroddestilador en AC, compuesto de anillo cinturón de 4" x 1/8", puntas en acero 1045 de 63 x 170 mm, discos A36 de 12 x 322 mm, torres en perfil colmena 50 x 50 mm con placa superior de 1/2", placa base 5/16" y chumaceras tipo pesado*.	1	1'027.000	1'027.000
8	Recipiente separador inoxidable diámetro 220 x 200 mm con tapa fija en cono C16, fondo, cuello, cono recolector C16 y vasija auxiliar cilíndrica de 63 x 80 mm con fondo y accesorios*.	1	562.000	562.000
9	Condensador de vapor con accesorios: 2 motores siemens de 1/3 de HP, 2 aspas de 20", 2 arañas protectoras, soportes en lámina galvanizada cal 24, colectores en cobre de 1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> ".	1	2'700.000	2'700.000

\*Garantía de 1 año limitada a defectos de fabricación y construcción sujeta a planos suministrados.

\*Garantía de 1 año limitada a defectos de fabricación y construcción sujeta a planos suministrados.

10	Quemador de gas, que incluye boquillas, válvula de paso y flauta**.	1	400.000	400.000**
11	Accesorios generales para equipo, manómetro 0 a 30 psi, termómetro de 3" de carátula de 0 a 150 °C, manguera S-96 en acero inox para cuello de cisne, acoples rápidos para manguera S-96, 1 arrancador de motor de 2.5 a 4 Amp, tornillería en general, uniones en acero inox, juego de llaves de nivel de ½", vidrio visor de nivel, llave de bola para drenaje.	Varios	1'852.000	1'852.000
12	<b>Subtotal incluido IVA</b>			18'983.000
13	Valor administración 7%.			1'328.810
14	Valor imprevistos 5%.			949.150
15	Valor utilidad 9%.			1'708.470
16	Valor IVA sobre utilidad 16%.			273.355,2
17	<b>Valor total.</b>			23'242.785,2

---

\*\* Este valor no incluye la válvula de control Robertshaw unitrol 110 SR.

## CONCLUSIONES

- Durante la ejecución del presente trabajo de grado fue de vital importancia la aplicación del conocimiento y recomendaciones sugeridas por profesionales de diferentes disciplinas (Química, Ingeniería Química, Biología, Ingeniería Agronómica, Ingeniería Industrial, Ingeniería Mecánica) al diseño del equipo, aplicando el concepto de diseño concurrente necesario para obtener como resultado un equipo móvil para la extracción de aceites esenciales, que supliera las necesidades planteadas al inicio del proyecto.
- El presente trabajo de grado contribuye a la generación de conocimiento en la cadena productiva de los aceites esenciales en el área de transferencia de tecnología que actualmente adelanta el CENIVAM para brindar asesoría técnica y científica a los pequeños y grandes cultivadores, a microempresarios y asociaciones campesinas que estén interesadas en la cadena productiva de los aceites esenciales.
- Como resultado final del presente trabajo de grado se obtuvo la construcción de un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales el cual es de gran significado como apoyo para la creciente industria de aceites esenciales en nuestro país, ya que se lograron suplir algunas necesidades tecnológicas y científicas, importantes para la obtención de los aceites esenciales a pequeña y mediana escala como alternativa para satisfacer las necesidades socioeconómicas fundamentales de pequeños y medianos empresarios, asociaciones y cooperativas campesinas.

- Como pioneros en el país en la construcción de un sistema móvil para la extracción de aceites esenciales vale la pena resaltar que todos los componentes, accesorios y procesos de fabricación empleados son de ámbito nacional, de tal forma que queda abierta la posibilidad de construir nuevos y mejorados prototipos que con lleven a la producción en serie de estos equipos.
- La construcción del sistema móvil para la extracción de aceites esenciales permite llegar a zonas en donde hay volúmenes considerables de material vegetal los cuales desplazarlos influye en el presupuesto del proceso y en donde no se cuenta con la provisión de insumos imprescindibles como el agua y el combustible para la obtención de los aceites esenciales.

## RECOMENDACIONES

- Realizar la inscripción del remolque en el registro nacional automotor ante el ministerio de transporte nacional y demás tramites legales y reglamentación que establece el código de transito colombiano para autorizar su circulación por el territorio nacional colombiano.
- Elaborar un catálogo de operación del equipo y un plan periódico de mantenimiento preventivo, que permita el correcto desempeño del equipo y prevenga posibles fallas que se puedan presentar durante su funcionamiento.
- Implementar al equipo los diferentes accesorios y elementos de seguridad necesarios para su operación (elementos de protección personal como casco, botas, delantal, gafas, guantes, tapa-oidos, advertencias de operación, etc.) transito y circulación tales como luces y cintas reflectivas, tragaluces, equipo de carretera (extintor, botiquín, herramientas, llanta de repuesto, conos reflectivos, gato, cruceta, tacos, linterna, etc.) avisos de giro, velocidad máxima, precaución y demás equipos de prevención, seguridad y consideraciones emitidas por el ministerio de transito y transporte nacional con el fin de prevenir cualquier clase de accidente y lograr la correcta movilización del equipo por las carreteras nacionales.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Sección VIII -Part UG. División 1. Edición 2001. 110 p.

BANDONI, Arnaldo. Los Recursos Vegetales Aromáticos en Latinoamérica. Su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. 2000.

BRUMBAUGH, James E. Heating, ventilating and air conditioning library. Oil, gas and coal burners. Controls. Ducts. Piping. Valves. 5 ed. Indianapolis: audel. 1979. v.2. 550 p.

Camiones y vehículos pesados. Reparación y mantenimiento. Transmisión-chasis-equipo eléctrico. Madrid: Cultural. 2003. v.2. p. 180-189.

CASCAJOSA SORIANO, Manuel. Ingeniería de vehículos: sistemas y cálculos. 2 ed. Madrid: Tebar Flores. 2005. 557 p. + 1 Cd-Rom.

CASILLAS, A. L. Máquinas. Cálculos de taller. 23 ed. España: máquinas. 1958. 643 p.

CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. 829 p. + diagramas + 1 Cd-Rom.

Confedegas informa: Colombia-Venezuela. Integración a todo gas/Confederación de la Industria y del Comercio del Gas. No. 86 (jul-sep 2006). Bogotá: CONFEDEGAS, 2006. 76 p.

CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: Mc. Graw -Hill. 1992. 194 p.

DENNY, Tim. Field Distillation for Herbaceous Oils. 3 ed. Australia: Denny, McKenzie Associates, Lilydale. May 2001. 275 p.

ENCICLOPEDIA CEAC DEL MOTOR Y AUTOMÓVIL. Transmisiones y bastidor. 3 ed. Barcelona: CEAC. 1970. 490 p.

FAIRES, Virgil Moring. Diseño de elementos de máquinas. México: Limusa. 1998. 802 p.+diagramas.

FONT MEZQUITA, José y DOLS RUIZ Juan. Tratado sobre automóviles. México: Alfaomega. 2001. v.1. p. 8.1-9.7.

GELVEZ AROCHA, Omar Armando. Apuntes de Transferencia de calor. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2006. 200 p.

GUENTHER, Ernest. The essential oils. History-origin in plants production-analysis. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company. 1972. v.1. 427 p.

INCROPERA, Frank P y DEWITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: Prentice Hall. 1999. 912 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Compendio de dibujo técnico. Bogotá D.C.: Centauro. 2004. 354 p.

KOELLHOFFER Leonard, MANZ August F, HOMBERGER Eugene G. Manual de soldadura. México: Limusa. 2000. 508 p.

Mc QUISTON Faye C, PARKER Jerald D, SPITLER Jeffrey D. Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y diseño. México: Limusa -Wiley. 2003. 622 p.

MEGYESY, Eugene F. Manual de recipientes a presión: diseño y cálculo. México: Limusa Noriega Editores. 1998. 482 p.

MINISTERIO DEL EJÉRCITO Y LA FUERZA ÁEREA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Manual de automóviles y vehículos motorizados. México: Continental. 1970. 653 p.

MUÑOZ LOPEZ, Fernando. Plantas medicinales y aromáticas. Estudio, cultivo y procesado. Madrid: mundi-prensa. 2002. 365 p.

SHAH, Ramesh K y DUSAN, P. Sekulic. Fundamentals of heat exchanger design. Haboken: John Wiley. 2003. 941 p.

#### **PAGINAS WEB**

Tecnologías de cultivo y poscosecha de plantas medicinales, aromáticas y tintóreas.  
Disponibile en <http://www.herbotecnia.com.ar>.

Thermocoil-División serpentines. Disponible en <http://www.thermocoil.com.co>.

Código nacional del transito. Disponible en <http://www.fonprevial.org.co>.

## **ANEXOS**

## Anexo A. Propiedades del acero austenítico AISI 304.



**Cia. General de Aceros S.A.**

*Es respaldado!*

### ACERO AUSTENITICO AISI 304

Composición química:

TIPO	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
304	0.08 max	2.00 max	0.045 max	0.030 min.	1.00 max	18.0- 20.0	8.00- 10.50	

Propiedades del acero

El AISI 304 se diferencia de los demás por las diversas cantidades de Níquel que contiene; a medida que su cantidad aumenta estos aceros presentan una menor acritud durante su elaboración por deformación plástica; posee características mecánicas no muy elevadas a temperatura ambiente y optimas a temperaturas muy bajas, en particular la resiliencia. Presenta buena resistencia a la corrosión y buena soldabilidad.

Propiedades físicas	
PESO ESPECIFICO g/cm <sup>3</sup>	8.06
RESISTIVIDAD ESPECIFICA a 20°C μ Ω.cm	72.0
CALOR ESPECIFICO 0/100 K cal / Kg °C	0.12
COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA MEDIO X 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	17.3 18.4
CONDUCTIVIDAD TERMICA Cal / cm. Sec. °C	0.039
INTERVALO DE FUSION °C	1400-1455

Aplicaciones

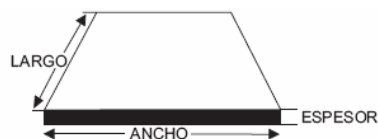
Piezas varias en electrodomésticos, industria agrícola y alimenticia, también en la elaboración de cubertería, fabricas de azúcar, lecherías, cervecías, etc.

Soldadura

Se puede soldar fácilmente.

Fuente: <http://www.cga.com.co>

## Anexo B. Propiedades de las láminas hot rolled.



### 7.3. LAMINAS HOT ROLLED O LAMINADAS EN CALIENTE

#### DIMENSIONES Y PROPIEDADES PARA EL DISEÑO

Calidades más comunes		COMPOSICIÓN QUÍMICA							PROPIEDADES MECÁNICAS				APLICACIONES MÁS FRECUENTES	
		L	C	MN	P	S	SI	CU	LÍMITE ELÁSTICO	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		% ALARGA		
ASTM	DIN		(x 100)	(x 100)	(x 100)	(x 100)	(x 100)	(x 100)						
A - 36	ST 33 - 1.2	MIN		80				15	23 kg/mm <sup>2</sup>		41 kg/mm <sup>2</sup>	400 Mpa	20	Estructuras metálicas en general
		MAX	25	120	4	4	30	20	25 kg/mm <sup>2</sup>	250 Mpa	56 kg/mm <sup>2</sup>	550 Mpa	23	
A 283 GR C	RST 37 - 1.2	MIN		50				7			39 kg/mm <sup>2</sup>	380 Mpa	20	Tanques de almacenamiento
		MAX	18	90	3,5	3,5	35	30	21 kg/mm <sup>2</sup>	205 Mpa	46 kg/mm <sup>2</sup>	450 Mpa	23	
A 285 GR C		MIN									38 kg/mm <sup>2</sup>	380 Mpa	23	Recipientes a presión de baja e intermedia resistencia a la tracción
		MAX	28	90	3,5	3,5			21 kg/mm <sup>2</sup>	205 Mpa	45 kg/mm <sup>2</sup>	515 Mpa	27	
A 131 GRA	RST 34 - 1.2	MIN		53							41 kg/mm <sup>2</sup>	400 Mpa	21	Construcción naval en general
		MAX	21		4	4	50,4		23 kg/mm <sup>2</sup>	235 Mpa	50 kg/mm <sup>2</sup>	490 Mpa	24	
A 516 GR 70		MIN	27	85				15			49 kg/mm <sup>2</sup>	485 Mpa	17	Recipientes a presión temperaturas media - alta
		MAX	31	120	4	3,5	40		27 kg/mm <sup>2</sup>	260 Mpa	63 kg/mm <sup>2</sup>	620 Mpa	21	
A 514 GR A	RQT 601	MIN				1,5					71 kg/mm <sup>2</sup>	690 Mpa		Resistencia a la abrasión
		MAX	20	150	3,5	4	50		64 kg/mm <sup>2</sup>	600 Mpa	87 kg/mm <sup>2</sup>	850 Mpa	19	

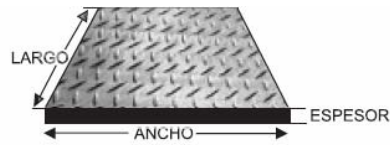
ESPESOR			m <sup>2</sup>	1.0 X 2.0 m	1.22 X 2.44 m (4' x 8')	1.83 X 6.09 m (6' x 20')	2.0 x 6.0 m	2.44 x 6.09 m (8' x 20')
CALIBRE	PULGADA	MIJIMETRO	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
16		1,5	11,78	23,56	35,01	131	141	175
14		1,9	14,92	29,85	44,35	166	179	222
		2,5	19,63	39,27	58,35	219	236	292
12		2,66	20,89	41,78	62,09	233	251	311
11		3	23,56	47,12	70,02	263	283	350
	1/8"	3,17	24,9	49,79	73,99	278	299	370
		4	31,42	62,83	93,37	350	377	467
		4,5	35,34	70,69	105,04	394	424	525
	3/16"	4,76	37,38	74,77	111,11	417	449	556
		5	39,27	78,54	116,71	438	471	584
		6	47,12	94,25	140,05	525	565	700
	1/4"	6,35	49,87	99,75	148,22	556	598	741
	5/16"	7,94	62,36	124,72	185,33	695	748	927
		8	62,83	125,66	186,73	700	754	934
		9	70,69	141,37	210,07	788	848	1051
	3/8"	9,53	74,85	149,7	222,44	834	898	1113
		10	78,54	157,08	233,41	876	942	1167
		12	94,25	188,5	280,1	1051	1131	1401
	1/2"	12,7	99,75	199,49	296,44	1112	1197	1483
		13	102,1	204,2	303,44	1138	1225	1518
		15	117,81	235,62	350,12	1313	1414	1751
	5/8"	15,88	124,72	249,44	370,66	1390	1497	1854
		16	125,66	251,33	373,46	1401	1508	1868
		19	149,23	298,45	443,49	1664	1791	2218
	3/4"	19,05	149,62	299,24	444,65	1668	1795	2224

Dimensiones y Propiedades de Productos



Fuente: <http://www.agofer.com.co>

## Anexo C. Propiedades de las láminas alfajor o antideslizantes.



### 7.4. LAMINAS ALFAJOR O ANTIDESLIZANTES

#### DIMENSIONES Y PROPIEDADES PARA EL DISEÑO

Calidades mas comunes		COMPOSICION QUIMICA							PROPIEDADES MECANICAS				APLICACIONES MAS FRECUENTES	
ASTM	DIN	L	C	MN	P	S	SI	CU	LIMITE ELASTICO		RESISTENCIA A LA TRACCION			% ALARGA
ASIM 569		MIN												
		MAX	15	60	3,5	1			25 kg/mm <sup>3</sup>	250 Mpa	35 kg/mm <sup>2</sup>	365 Mpa	22	Fabricación de pisos antideslizantes

ESPELOR			M2	1.0 X 2.0 MTS	1.22 X 2.44 MMTS (4' X 8')	1.0 X 3.0 MTS	1.22 X 3.66 MTS (4' X 12')	1.83 X 6.09 MTS (6' X 20')
CALIBRE	PULGADA	MILIMETRO	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.
		2,5	20,68	41,35	61,44	62,03	92,32	230
12		2,66	22	44	65,38	65,99	98,23	245
11		3	24,81	49,62	73,73	74,43	110,78	277
	1/8"	3,17	26,22	52,43	77,91	78,65	117,06	292
		4	33,08	66,16	98,31	99,24	147,71	369
		4,5	37,22	74,43	110,6	111,65	166,17	415
	3/16"	4,76	39,37	78,73	116,99	118,1	175,77	439
		5	41,35	82,7	122,89	124,05	184,64	461
		5,5	45,49	90,97	135,18	136,46	203,1	507
		6	49,62	99,24	147,47	148,66	221,56	553
	1/4"	6,35	52,51	105,03	156,06	157,54	234,49	585
		7,5	62,03	124,05	184,33	186,08	276,95	691
	5/16"	7,94	65,66	131,32	195,15	196,99	293,2	732
		8	66,16	132,32	196,62	198,48	295,42	738
		9	74,43	148,86	221,2	223,29	332,34	830
	3/8"	9,53	78,81	157,63	234,22	236,44	351,92	879
		10	82,7	165,4	245,78	248,1	369,27	922
		12	99,24	198,48	294,93	297,72	443,13	1106
	1/2"	12,7	105,03	210,06	312,14	315,09	468,98	1171

Dimensiones y Propiedades de Productos



Fuente: <http://www.agofer.com.co>

## Anexo D. Lana en fibra de vidrio para aislamiento térmico.



# LANA AW

Aislamiento Térmico para servicio en caliente

### DESCRIPCIÓN:

La Lana AW de FiberGlass es un aislamiento térmico hecho con lana de fibras de vidrio inorgánicas y elásticas, aglomeradas con resina termo-resistente, presentada en rollos.

### USOS:

La Lana AW está diseñada para ser empleada en aplicaciones como aislamiento térmico de equipos y electrodomésticos que trabajan a temperaturas hasta de 540°C (1000°F) con el espesor recomendado. Este aislamiento es ampliamente utilizado en sistemas de paneles, recubrimientos flexibles, hornos industriales o superficies irregulares.

### BENEFICIOS:

- **Excelente Funcionamiento Térmico**  
La eficiencia térmica de la Lana AW contribuye a reducir las pérdidas de calor y el consumo de combustibles.
- **Peso Liviano**  
El bajo peso de la fibra de vidrio facilita la instalación y manipulación del aislamiento, incluso cuando se trabaja con grandes cantidades.
- **Elasticidad**  
Su elasticidad garantiza llenar completamente todos los espacios con el aislamiento asegurándose alta eficiencia en el funcionamiento de los artefactos.
- **Rápido y Fácil de Instalar**  
Su presentación en rollos permite cubrir grandes áreas rápidamente, eliminando el trabajo tedioso de colocar lámina por lámina.

*"Líderes en ahorro y conservación de energía".*



- Incombustible
- Resiste la vibración sin deformarse
- Inorgánico
- No genera ni acelera la corrosión sobre acero, hierro, cobre o aluminio.
- No absorbe humedad ambiental.

### ESPECIFICACIONES TECNICAS

- Conductividad Térmica: 0.039 w/°C.m= Valor típico (0.27 BTU.in/hr.°F.ft²).
- Características de Quemado Superficial: ASTM E84 Propagación de llama 25.
- Temperatura de aplicación: Máx 540°C (1000°F).
- Empaque: Bolsas de polietileno
- Unidad: Rollos

### DIMENSIONES:

	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
600" X 48" X 1"	15.24m	1219 mm	25.4 mm
300" X 48" X 1"	7.62 m	1219 mm	25.4 mm
600" X 48" X 1½"	15.24 m	1219 mm	50.8 mm

### ESPEORES RECOMENDADOS

Espesor	Ts Tq	1000°F (538°C)	850°F (454°C)	700°F (371°C)	550°F (288°C)	400°F (288°C)	250°F (121°C)
1"	Ts	250	228	204	180	154	125
	Q	203	168	134	100	67	34
2"	Ts	187	173	159	144	128	110
	Q	110	91	73	55	37	19
3"	Ts	161	151	140	129	117	104
	Q	76	63	50	38	25	13
4"	Ts	146	138	129	120	111	-
	Q	58	48	39	29	20	-
5"	Ts	137	130	122	-	-	-
	Q	47	39	31	-	-	-
6"	Ts	130	124	-	-	-	-
	Q	139	33	-	-	-	-

Cálculos realizados para: Velocidad de viento = 0

Emisividad Exterior = 0.2

Temperatura ambiente = 86°F (30°C)

TS = Temperatura Superficial en °F

Q = Pérdidas de Calor en BTU/h.ft²

Fuente: <http://www.fiberglasscolombia.com.co>

## Anexo E. Propiedades del agua saturada.

730  
APENDICE 1

**TABLA A-9**

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P <sub>sat</sub> kPa	Densidad, ρ kg/m <sup>3</sup>		Entalpía de vaporización, h <sub>fg</sub> kJ/kg	Calor específico, C <sub>p</sub> J/kg · °C		Conductividad térmica, k W/m · °C		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 <sup>-3</sup>	0.922 × 10 <sup>-5</sup>	13.5	1.00	-0.068 × 10 <sup>-3</sup>
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 <sup>-3</sup>	0.934 × 10 <sup>-5</sup>	11.2	1.00	0.015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 <sup>-3</sup>	0.946 × 10 <sup>-5</sup>	9.45	1.00	0.733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 <sup>-3</sup>	0.959 × 10 <sup>-5</sup>	8.09	1.00	0.138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 <sup>-3</sup>	0.973 × 10 <sup>-5</sup>	7.01	1.00	0.195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 <sup>-3</sup>	0.987 × 10 <sup>-5</sup>	6.14	1.00	0.247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 <sup>-3</sup>	1.001 × 10 <sup>-5</sup>	5.42	1.00	0.294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 <sup>-3</sup>	1.016 × 10 <sup>-5</sup>	4.83	1.00	0.337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 <sup>-3</sup>	1.031 × 10 <sup>-5</sup>	4.32	1.00	0.377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 <sup>-3</sup>	1.046 × 10 <sup>-5</sup>	3.91	1.00	0.415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 <sup>-3</sup>	1.062 × 10 <sup>-5</sup>	3.55	1.00	0.451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 <sup>-3</sup>	1.077 × 10 <sup>-5</sup>	3.25	1.00	0.484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 <sup>-3</sup>	1.093 × 10 <sup>-5</sup>	2.99	1.00	0.517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 <sup>-3</sup>	1.110 × 10 <sup>-5</sup>	2.75	1.00	0.548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 <sup>-3</sup>	1.126 × 10 <sup>-5</sup>	2.55	1.00	0.578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 <sup>-3</sup>	1.142 × 10 <sup>-5</sup>	2.38	1.00	0.607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 <sup>-3</sup>	1.159 × 10 <sup>-5</sup>	2.22	1.00	0.653 × 10 <sup>-3</sup>
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.176 × 10 <sup>-5</sup>	2.08	1.00	0.670 × 10 <sup>-3</sup>
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 <sup>-3</sup>	1.193 × 10 <sup>-5</sup>	1.96	1.00	0.702 × 10 <sup>-3</sup>
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 <sup>-3</sup>	1.210 × 10 <sup>-5</sup>	1.85	1.00	0.716 × 10 <sup>-3</sup>
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 <sup>-3</sup>	1.227 × 10 <sup>-5</sup>	1.75	1.00	0.750 × 10 <sup>-3</sup>
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 <sup>-3</sup>	1.261 × 10 <sup>-5</sup>	1.58	1.00	0.798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 <sup>-3</sup>	1.296 × 10 <sup>-5</sup>	1.44	1.00	0.858 × 10 <sup>-3</sup>
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 <sup>-3</sup>	1.330 × 10 <sup>-5</sup>	1.33	1.01	0.913 × 10 <sup>-3</sup>
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 <sup>-3</sup>	1.365 × 10 <sup>-5</sup>	1.24	1.02	0.970 × 10 <sup>-3</sup>
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 <sup>-3</sup>	1.399 × 10 <sup>-5</sup>	1.16	1.02	1.025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 <sup>-3</sup>	1.434 × 10 <sup>-5</sup>	1.09	1.05	1.145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 <sup>-3</sup>	1.468 × 10 <sup>-5</sup>	1.03	1.05	1.178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 <sup>-3</sup>	1.502 × 10 <sup>-5</sup>	0.983	1.07	1.210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 <sup>-3</sup>	1.537 × 10 <sup>-5</sup>	0.947	1.09	1.280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.571 × 10 <sup>-5</sup>	0.910	1.11	1.350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 <sup>-3</sup>	1.641 × 10 <sup>-5</sup>	0.865	1.15	1.520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 <sup>-3</sup>	1.712 × 10 <sup>-5</sup>	0.836	1.24	1.720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 <sup>-3</sup>	1.788 × 10 <sup>-5</sup>	0.832	1.35	2.000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 <sup>-3</sup>	1.870 × 10 <sup>-5</sup>	0.854	1.49	2.380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 <sup>-3</sup>	1.965 × 10 <sup>-5</sup>	0.902	1.69	2.950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 <sup>-3</sup>	2.084 × 10 <sup>-5</sup>	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 <sup>-3</sup>	2.255 × 10 <sup>-5</sup>	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 <sup>-3</sup>	2.571 × 10 <sup>-5</sup>	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 <sup>-3</sup>	4.313 × 10 <sup>-5</sup>	—	—	—

**Nota 1:** La viscosidad cinemática  $\nu$  y la difusividad térmica  $\alpha$  se pueden calcular a partir de sus definiciones,  $\nu = \mu/\rho$  y  $\alpha = k/\rho C_p = \nu/Pr$ . Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

**Nota 2:** La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

**Fuente:** Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), págs. 291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p. 730.

## Anexo F. Propiedades del aire a la presión de 1 atm.

736  
APÉNDICE 1

**TABLA A-15**

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $C_p$ , J/kg · °C	Conductividad térmica, k, W/m · °C	Difusividad térmica, $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	Viscosidad dinámica, $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

*Nota:* Para los gases ideales, las propiedades  $C_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

*Fuente:* Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. 4 ed. México: Mc Graw-Hill. 2004. p. 736.

Anexo G. Norma americana unificada.

Norma americana unificada. Véase subtítulo en tabla AT 14

SERIES EXTRAFINAS (NEF y UNEF)					SERIES DE 8 HILOS (8 N y 8 UN) (TAMAÑOS PRIMARIOS)					
Designación del tamaño	Diámetro mayor básico		Hilos por pulg (tpi)	Diámetro menor Rosca exterior		Área para esfuerzo $A_s$ cm <sup>2</sup> pulg <sup>2</sup>	Designación del tamaño	Diámetro menor Rosca exterior		Área para esfuerzo $A_s$ cm <sup>2</sup> pulg <sup>2</sup>
	mm	pulg		mm	pulg			mm	pulg	
12	5,486	0,2160	32	4,513	0,1777	0,1742 0,0270	1	21,503	0,8466	3,910 0,606
$1/4$	6,350	0,2500	32	5,376	0,2117	0,2445 0,0379	$1\ 1/8$	24,678	0,9716	5,097 0,790
$5/16$	7,938	0,3125	32	6,964	0,2742	0,4032 0,0625	$1\ 1/4$	27,853	1,0966	6,452 1,000
$3/8$	9,525	0,3750	32	8,551	0,3367	0,6013 0,0932	$1\ 3/8$	31,028	1,2216	7,955 1,233
$7/16$	11,173	0,4375	28	10,000	0,3937	0,8219 0,1274	$1\ 1/2$	34,203	1,3466	9,626 1,492
$1/2$	12,700	0,5000	28	11,587	0,4562	1,097 0,170	$1\ 5/8$	37,378	1,4716	11,48 1,78
$9/16$	14,288	0,5625	24	12,989	0,5114	1,381 0,214	$1\ 3/4$	40,553	1,5966	13,42 2,08
$5/8$	15,875	0,6250	24	14,577	0,5739	1,729 0,268	$1\ 7/8$	43,728	1,7216	15,55 2,41
$11/16$	17,403	0,6875	24	16,164	0,6364	2,123 0,329	2	46,903	1,8466	17,87 2,77
$3/4$	19,050	0,7500	20	17,493	0,6887	2,490 0,386	$2\ 1/4$	53,253	2,0966	22,97 3,56
$13/16$	20,638	0,8125	20	19,080	0,7512	2,955 0,458	$2\ 1/2$	59,603	2,3466	28,65 4,44
$7/8$	22,225	0,8750	20	20,667	0,8137	3,458 0,536	$2\ 3/4$	65,953	2,5966	35,03 5,43
$15/16$	23,813	0,9375	20	22,255	0,8762	4,000 0,620	3	72,303	2,8466	42,00 6,51
1	25,400	1,0000	20	23,842	0,9387	4,587 0,711	$3\ 1/4$	78,653	3,0966	49,50 7,6738
$1\ 1/16$	26,988	1,0625	18	25,254	0,9943	5,155 0,799	$3\ 1/2$	85,003	3,3466	57,81 8,96
$1\ 1/8$	28,575	1,1250	18	26,842	1,0568	5,813 0,901	$3\ 3/4$	91,353	3,5966	66,71 10,34
$1\ 3/16$	30,163	1,1875	18	28,429	1,1193	6,510 1,099	4	97,703	3,8466	76,19 11,81
$1\ 1/4$	31,750	1,2500	18	30,017	1,1818	7,245 1,123	$4\ 1/4$	104,053	4,0966	86,32 13,38
$1\ 5/16$	33,338	1,3125	18	31,605	1,2443	8,026 1,244	$4\ 1/2$	110,403	4,3466	97,40 15,1
$1\ 3/8$	34,925	1,3750	18	33,192	1,3068	8,839 1,370	$4\ 3/4$	116,753	4,5966	108,40 16,8
$1\ 7/16$	36,513	1,4375	18	34,779	1,3693	9,697 1,503	5	123,103	4,8466	120,60 18,7
$1\ 1/2$	38,100	1,5000	18	36,367	1,4318	10,58 1,64	$5\ 1/4$	129,453	5,0966	133,50 20,7
$1\ 9/16$	39,688	1,5625	18	37,954	1,4943	11,55 1,79	$5\ 1/2$	135,803	5,3466	146,50 22,7
$1\ 5/8$	41,275	1,6250	18	39,542	1,5568	12,52 1,94	$5\ 3/4$	142,153	5,5966	160,60 24,9
$1\ 11/16$	42,863	1,6875	18	41,129	1,6193	13,55 2,10	6	148,503	5,8466	174,80 27,1

Fuente: FAIRES, Virgil Moring. Diseño de elementos de máquinas. México: Limusa. 1998. p. 204.

## **Anexo E. Planos**