

**DISEÑO DE UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITES ESENCIALES
POR ARRASTRE CON VAPOR**

**RONALD GRANADOS MONTENEGRO
WILMER ALBERTO ARIAS JAIMES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.007

**DISEÑO DE UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITES ESENCIALES
POR ARRASTRE CON VAPOR**

**RONALD GRANADOS MONTENEGRO
WILMER ALBERTO ARIAS JAIMES**

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

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2.007

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres, Omaira Rosa y Carlos Alfonso, Todo lo que soy se lo debo a ustedes.

A mi esposa, Marelbis, por su inmenso amor, apoyo y comprensión.

A mi hija, Nicolle

A mis hermanas, Rosaura y Camila

A mis amigos.

Ronald Granados Montenegro

DEDICATORIA

A mi madre, Herlinda, quien lo ha dado todo por sus hijos

A mi padre, Luis Alberto

A mi hermano, Johany Euraldo

A mis amigos.

Wilmer Alberto Arias Jaimes

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por los dones de sabiduría, perdón, fortaleza, entendimiento y paciencia que me ha brindado.

A mis padres, quienes con su infinito amor, apoyo incondicional y paciencia han hecho de mí la persona que soy hoy día.

A Omar Gélvez Arocha, ingeniero mecánico, director del proyecto por su colaboración.

A mi compañero, Wilmer Alberto, por contar conmigo en la realización de este proyecto.

A los integrantes del centro de investigación de excelencia CENIVAM, por su apoyo y colaboración.

A mis Amigos, por ser como mis hermanos brindándome todo su apoyo a lo largo de mi carrera.

Y en general a todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

Ronald Granados Montenegro

AGRADECIMIENTOS

A Omar Gélvez Arocha, ingeniero mecánico, director del proyecto, por su colaboración.

A mis padres por su ayuda incondicional y por su paciencia.

A mi hermano por que siempre estuvo pendiente.

A mis amigos que me animaron y ayudaron siempre que los necesitaba.

A los integrantes del grupo CENIVAM UIS por su colaboración.

Wilmer Alberto Arias Jaimes

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 ACEITE ESENCIAL	3
1.1 DEFINICIÓN	3
1.2 CARACTERÍSTICAS	3
1.3 HISTORIA	4
1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES	7
1.4.1 Superficiales	7
1.4.2 Subcutáneos.	8
1.5 PRODUCCIÓN DEL ACEITE ESENCIAL	8
1.5.1 <i>Lippia alba, Cymbopogon citratus y Pelargonium graveolens</i>	8
1.5.2 Mercado nacional.	13
1.5.3 Mercado mundial	15
2 METODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES	17
2.1 DESTILACIÓN	17
2.1.1 Hidrodestilación	17
2.1.2 Destilación por arrastre con vapor	18
2.1.3 Destilación agua-vapor	20
2.2 HIDRODIFUSIÓN	20
2.3 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN DE MICROONDAS	21
3 DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR	23
3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA	23
3.1.1 Fase de calentamiento	23

3.1.2	Fase de extracción	24
3.1.3	Fase de enfriamiento	24
3.2	EQUIPO DE DESTILACIÓN	26
3.2.1	Generador de vapor	26
3.2.2	Destilador	27
3.2.3	Condensador	29
3.2.4	Recipiente separador	31
4	DISEÑO	33
4.1	INTRODUCCIÓN	33
4.2	CRITERIOS DE DISEÑO	35
5	DISEÑO TÉRMICO DEL DESTILADOR	36
5.1	PRUEBAS LLEVADAS A CABO POR TIM DENNY	36
5.2	ADAPTACIÓN DEL TIEMPO DE EXTRACCIÓN	38
5.3	PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL FLUJO MÁSIKO DE VAPOR	40
5.4	DATOS DEL PROCESO	42
5.5	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	44
5.6	TIEMPO DE EXTRACCIÓN	46
5.6.1	Tiempo de extracción para herbáceas muy absorbentes	46
5.6.2	Tiempo de extracción para herbáceas ligeramente absorbentes	47
5.7	FLUJO MÁSIKO NECESARIO DE LA CALDERA	48
5.8	POTENCIA DE LA CALDERA	50
6	DISEÑO MECÁNICO DEL DESTILADOR	52
6.1	CARTUCHO	52
6.1.1	Pared	53
6.1.2	Base	54
6.1.3	Malla	55
6.1.4	Barras de izaje	55

6.1.5	Barras de refuerzo	57
6.1.6	Pivote	57
6.2	PARED DEL DESTILADOR	58
6.3	DISTRIBUIDOR DE VAPOR	60
6.3.1	Cálculo del diámetro	61
6.3.2	Cálculo del número mínimo de agujeros	62
6.3.3	Cálculo del paso entre agujeros (p)	62
6.4	CABEZAL INFERIOR	62
6.5	CABEZAL SUPERIOR	64
6.5.1	Sistema de cierre	64
6.5.2	Sello	65
6.5.3	Soporte para los pernos de sujeción	66
6.5.4	Bisagra	68
6.5.5	Brazo para el levantamiento	69
6.6	SOPORTE PARA EL CARTUCHO	73
6.7	SOPORTE PARA EL DESTILADOR	75
6.8	ABERTURAS PARA LAS TUBERÍAS	75
6.8.1	Para la entrada	75
6.8.2	Para la salida	77
6.8.3	Para el drenaje	77
6.9	IZAJES PARA LEVANTAR EL DESTILADOR	77
6.10	REFUERZOS	79
7	DISEÑO TÉRMICO DEL CONDENSADOR	80
7.1	DATOS DE PROCESO	82
7.2	CONDENSACIÓN	84
7.2.1	Coeficiente de transferencia de calor por el lado de los tubos	86
7.2.2	Coeficiente de transferencia de calor por el lado del casco	88
7.3	SUBENFRIAMIENTO	95

8	DISEÑO MECÁNICO DEL CONDENSADOR	97
8.1	BOQUILLAS	97
8.1.1	Lado del casco	97
8.1.2	Lado de los tubos	99
8.2	ESPESOR DEL CASCO	99
8.3	CABEZALES	101
8.4	PLACA PORTATUBOS	103
8.5	BRIDAS	105
9	DISEÑO DEL SEPARADOR PARA AEs	113
9.1	LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS	113
9.2	LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS DE ACEITE A TRAVÉS DEL AGUA EN UN PROCESO DE SEPARACIÓN	114
9.3	ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL SEPARADOR	115
9.3.1	Cilindro interno	116
9.3.2	Cilindro externo	117
9.3.3	Cuello	119
9.3.4	Centro	120
10	ACCESORIOS	122
10.1	TUBERÍAS	123
10.1.1	Caldera-destilador	123
10.1.2	Destilador-condensador	123
10.1.3	Drenaje	123
10.2	VÁLVULAS	124
10.3	MANÓMETROS	124
10.4	TERMÓMETROS	125
10.5	TRAMPAS DE VAPOR	126
10.5.1	Función	126
10.5.2	Selección	126

10.6	BOMBA DE SUMINISTRO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO	128
11	ANÁLISIS FINANCIERO	130
11.1	PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN	130
11.2	RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.	130
11.3	ANÁLISIS COMPARATIVO CONTRUCCIÓON LOCAL VS. IMPORTACIÓN	133
	CONCLUSIONES	136
	RECOMENDACIONES	137
	BIBLIOGRAFÍA	138
	ANEXOS	140

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cultivo de <i>Lippia alba</i>	9
Figura 2. Cultivo de <i>Limonaria</i>	11
Figura 3. Cultivo de <i>Pelargonium graveolens</i>	12
Figura 4. Balanza comercial de los aceites esenciales en Colombia.....	14
Figura 5. Exportaciones de aceites esenciales en Colombia.....	15
Figura 6. Hidrodestilación.	18
Figura 7. Sistema de destilación por arrastre con vapor	19
Figura 8. Destilación agua-vapor	20
Figura 9. Equipo de hidrodifusión	21
Figura 10. Caldera pirotubular.....	26
Figura 11. Destilador de aceites esenciales.....	27
Figura 12. Condensador de serpentín	29
Figura 13. Condensador de casco y tubos	30
Figura 14. Separadores de aceites esenciales.....	32
Figura 15. Diagrama para determinar el flujo másico de vapor.....	41
Figura 16. Cartucho.....	52
Figura 17. Barra de izamiento para el cartucho	55
Figura 18. Pivote del cartucho	58
Figura 19. Destilador diseñado	59
Figura 20. Distribuidor de vapor	61
Figura 21. Cabeza toroidal tipo ASME.....	63
Figura 22. Sistema de cierre con tuerca tipo mariposa	64
Figura 23. Soporte para los pernos de sujeción.....	67

Figura 24. Bisagra	68
Figura 25. Cabezal superior del destilador.....	70
Figura 26. Brazo de la tapa superior.....	70
Figura 27. Cargas sobre el cabezal superior del destilador.....	71
Figura 28. Contrapeso.....	72
Figura 29. Soporte para el cartucho	73
Figura 30. Soporte del Destilador	76
Figura 31. Izaje para levantar el destilador	78
Figura 32. Zonificación del Condensador.....	81
Figura 33. Esquema de localización de fluidos.....	82
Figura 34. Placa porta tubos	103
Figura 35. Condición de operación.....	108
Figura 36. Condición de asentamiento.....	109
Figura 37. Velocidad de ascenso de las partículas de aceite de lavanda a través del agua.....	114
Figura 38. Recipiente separador para AEs Ligeros	115
Figura 39. Velocidad de las partículas de agua y aceite	119
Figura 40. Centro del separador.....	121
Figura 41. Esquema de la planta extractora	122
Figura 42. Válvula de cheque	124
Figura 43. Manómetro	125
Figura 44. Termómetro	126
Figura 45. Bomba de suministro de agua	128
Figura 46. Curva de funcionamiento de la bomba	129
Figura 47. Equipo de extracción de AEs comercial	134

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características del AE de pronto alivio.....	9
Tabla 2. Características del aceite esencial de limonaria	11
Tabla 3. Principales importadores de aceites esenciales.....	15
Tabla 4. Prueba realizada por Denny con lavanda.....	37
Tabla 5. Datos del proceso de destilación.....	43
Tabla 6. Tiempo de calentamiento	46
Tabla 7. Tiempo de extracción para herbácea muy absorbente.....	47
Tabla 8. Tiempo de extracción herbácea ligeramente absorbente.....	48
Tabla 9. Flujo másico requerido de la caldera.....	50
Tabla 10. Dimensiones de la bisagra	69
Tabla 11. Dimensiones del izaje del destilador.....	78
Tabla 12. Datos generales del proceso.....	83
Tabla 13. Datos para la zona de condensación	84
Tabla 14. Área de T.C para la etapa de condensación (primera iteración)	93
Tabla 15. Área de T.C para la etapa de condensación. (Solución)	94
Tabla 16. Área de T.C para el proceso de subenfriamiento.	96
Tabla 17. Diámetro de las boquillas del lado del casco.	99
Tabla 18. Espesor mínimo de casco.	101
Tabla 19. Espesor mínimo de cabezal según recomendaciones.	103
Tabla 20. Espesor de la placa porta tubos por flexión	104
Tabla 21. Espesor de la placa porta tubos por cortante	105
Tabla 22. Condiciones de diseño para la brida.	107
Tabla 23. Características del empaque del condensador.....	107

Tabla 24. Brazos de momentos de las bridas.....	111
Tabla 25. Condensación en tuberías aisladas que llevan vapor saturado en aire sin mover a 21°C.....	127
Tabla 26. Parámetros de Diseño para Trampas Termostáticas.....	128
Tabla 27. Costos de construcción.....	131
Tabla 28. Servicios industriales de la planta extractora.....	132
Tabla 29. Costo total del producto por mes.....	133
Tabla 30. Costo de importación de una planta de destilación de AEs.	135

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. TIEMPO DE EXTRACCIÓN EN ACEITES SUPERFICIALES	141
ANEXO B. ANALISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE SOFTWARE CAE	146
ANEXO C. SELECCIÓN DE LA CALDERA Y SU EQUIPO AUXILIAR	155
ANEXO D. SELECCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO	162
ANEXO E. INSTRUCCIONES PARA OPERAR LA PLANTA DE DESTILACIÓN	165
ANEXO F. PLANOS DE CONSTRUCCIÓN	167

RESUMEN

TÍTULO:

**DISEÑO DE UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITES
ESENCIALES POR ARRASTRE CON VAPOR***

AUTORES:

Wilmer Alberto Arias Jaimes.

Ronald Granados Montenegro. **

PALABRAS CLAVES:

Aceites Esenciales, Arrastre con vapor, Destilación.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es el diseño de una planta para la extracción de aceites esenciales (AEs) por arrastre con vapor de mediana capacidad (300 kg. de material vegetal) para ser usado en zonas de cultivo por cooperativas de campesinos.

Con el diseño de dicha planta se pretende dar un impulso al sector agroindustrial del país mediante la creación de tecnologías propias, específicamente relacionado con el diseño de plantas extractoras de AEs, debido a que la adquisición y montaje de dichas plantas requiere una inversión inicial que es alta si se importan todos los equipos y que no son fácilmente asequibles por cooperativas de campesinos, principales beneficiarios del desarrollo de un mercado competitivo y sostenible de la agroindustria de esencias, extractos y derivados naturales.

El proyecto se llevó a cabo a partir de las condiciones de capacidad de material vegetal y tiempo disponible para la extracción. Inicialmente se

* Trabajo de Grado

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

determinó el flujo másico de vapor requerido para el proceso, de acuerdo con las condiciones anteriormente descritas para la selección de la caldera. Luego se diseñó el destilador, el condensador y el recipiente separador. El diseño del destilador está conformado por un cartucho o canasta removible que agiliza el proceso de reemplazo de material vegetal ya procesado; además del recipiente que contiene el cartucho y cuya tapa superior es pivotada para facilitar la entrada y salida del cartucho. El condensador está dimensionado para que la temperatura de los condensados (agua y AEs) permita una adecuada separación entre el agua y los AEs. El resultado de este proyecto es un diseño económico, de fácil operación y seguro.

SUMMARY

TITLE:

ESSENTIAL OILS EXTRACTOR PLANT DESIGN BY STEAM HAULAGE *

AUTHORS:

Wilmer Alberto Arias Jaimes.

Ronald Granados Montenegro. **

KEY WORDS:

Essential oils, steam extraction, distillation.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to design a plant for the essential oils (EOs) extraction by steam haulage of medium capacity (300 kg), to be used in cultivation areas by farm's cooperatives.

With the design of this plant it is sought to give an impulse to the agroindustrial sector of the country by means of the creation of own technologies, specifically related with the design of EOs extractor plants, because the acquisition and assembly of these plants requires a high initial investment if all the equipments are imported and those are not easily accessible for farm's cooperatives, the main beneficiaries of the development of a competitive and sustainable market of the EOs agroindustry, extracts and other naturals derives.

The project was carried out starting from the capacity conditions of vegetable material and available time for the extraction. Initially the steam mass flow was determined, it required for the process, according to the conditions previously described for the boiler selection. Then the

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Gélvez.

distiller was designed, the condenser and the receiver separator. The distiller's design is conformed by a cartridge or removable basket that it speeds up the substitution process of vegetable material already processed; besides the recipient that contains the cartridge and whose superior cover is pivoted to facilitate the entrance and exit of the cartridge. The condenser is sized in order to the condensation temperature (water and EOs) allows an appropriate separation of the water and the EOs. The result of this project is an economic design, of easy operation and sure.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad se utiliza el proceso de destilación para capturar las esencias y aromas de las plantas aromáticas y medicinales en aceites que hoy día llevan el nombre de “aceites esenciales”, el proceso durante los años se ha ido perfeccionando, evolucionando de tal forma que la industria de los aceites esenciales hace parte de un gran mercado en el ámbito mundial (farmacéutica, alimentos, cosmética, etc.), con excelentes dividendos.

Colombia es un país con una vasta riqueza biológica, que ofrece una amplia variedad de opciones, para una adecuada explotación de sus recursos naturales a escala agroindustrial. Para lograr esto, es necesario desarrollar investigación en aspectos sociales, económicos y tecnológicos, con el fin de ofrecer una alternativa a las personas interesadas en desarrollar este tipo de industria y, de esta forma, obtener un producto que sea competitivo en los mercados nacional e internacional. Las plantas aromáticas podrían ser una de las tantas posibilidades que existen en nuestro país para generar industria y, más específicamente, en su aprovechamiento para la extracción de aceites esenciales (AEs), los cuales son mezclas de compuestos orgánicos, productos del metabolismo secundario de las plantas. Los AEs se emplean para la elaboración de mezclas saborizantes, aromatizantes, licores, perfumes, artículos de aseo, como enmascaradores de olores de pinturas y caucho, en la síntesis orgánica fina y como materias primas para la elaboración de productos farmacéuticos, entre otras aplicaciones.

El presente trabajo hace parte de la línea de investigación de transferencia de tecnología que adelanta el Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM) , con el proyecto titulado: "Estudio Integral de Especies Aromáticas y Medicinales Tropicales Promisorias para el Desarrollo Competitivo y Sostenible de la Agroindustria de Esencias, Extractos y Derivados Naturales en Colombia", donde se han venido estudiando diferentes plantas tropicales con posible potencial para la extracción de AEs y su utilización a escala agroindustrial. El propósito de este trabajo es el diseño de una planta para la extracción de aceites esenciales mediante arrastre con vapor con capacidad para procesar 300 kg de material vegetal, que permita a las cooperativas de campesinos costear los equipos que requieren para la obtención de los aceites a producir, hecho que no sería viable si estos se importarían desde otros países.

Los resultados adquiridos en el presente trabajo serán de interés para la naciente industria de AEs en Colombia, ya que se ofrece una herramienta tecnológica y científica valiosa en el diseño de plantas para la obtención de AEs a escala agroindustrial. También se plantea una alternativa al pequeño y mediano industrial interesado en el desarrollo de la industria de AEs.

1 ACEITE ESENCIAL

1.1 DEFINICIÓN

- Parte del metabolismo de un vegetal compuesto generalmente por terpenos, que están asociados o no a otros compuestos, la mayoría de ellos volátiles y que generan en conjunto el olor de dicho vegetal (Bandoni, 2000).
- Mezcla de componentes volátiles producto del metabolismo secundario de las plantas en cuya composición interviene una porción de hidrocarburos de la serie polimetilénica del grupo de los terpenos¹ que responden a la fórmula $(C_5H_8)_n$ junto con otros compuestos casi siempre oxigenados (alcoholes, ésteres, éteres, aldehídos y compuestos fenólicos) que son los que transmiten a los aceites el aroma que los caracteriza (Stashenko, E. 1995).

1.2 CARACTERÍSTICAS

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. Cuando están frescos, a temperatura ambiente, son incoloros, ya que al oxidarse se resinifican y toman un color amarillento oscuro (lo que se previene depositándolos en recipientes de vidrio de color

¹ La trementina está constituida exclusivamente de terpenos, mientras que el aceite esencial de almendras carece completamente de ellos (Bandoni, 2000)

topacio, totalmente llenos y cerrados herméticamente). 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 [2].

1.3 HISTORIA

El uso de los aceites esenciales se remonta a la antigüedad. Los egipcios los utilizaron bajo la forma de baños aromáticos. Homero decía del Egipto: “Tierra fecundada que produce abundantes drogas, unas son remedio y otras son perfume; país de médicos los más sabios del mundo”.

El egipcio Zozimo de Tebas (siglo III), eminente químico, reporto que la destilación seca era practicada en los templos bajo la protección del Dios Horus. Se han encontrado escritos que demuestran que los egipcios sabían destilar las esencias de las Coníferas 40 siglos A.C. Los faraones utilizaron los aceites para ser embalsamados. Una vez retiradas las vísceras del cuerpo las personas que embalsamaban llenaban el vientre del difunto con la mirra pura, canela y otros extractos vegetales. Después de una maceración de 70 días en NATRUM, se lavaba el cuerpo y se envolvía en telas impregnadas de un pegamento especial. Esta técnica logró una conservación del cuerpo, de al menos, 3000 años (Sallé y col., 1991).

Los romanos y los griegos utilizaron los aromas para perfumar sus baños. En el tratado de olores, Atenea cita a Antiphane: “Ella se lava en una tina cubierta de oro, los pies y las manos con perfume de Egipto, para su mejilla y sus senos, ella toma el perfume de Fenicia, para los brazos ella utiliza la menta, para sus cejas y ojos la mejorana, para sus piernas y su cuello, el serpillito...” (*Thymus Serpyllum*).

En la "Historia Natural", del libro XIII, Plinio cita los orígenes y los compuestos de perfumes que existían en esa época. Describe igualmente un aparato de destilación para obtener esencia de trementina a partir de la resina del pino.

La caída del imperio romano hace olvidar la utilización de los aceites esenciales. Recién en la edad media los árabes redescubren la destilación de plantas, y es en el siglo XIII gracias a los trabajos de Gerberen que inventan el serpentín y el medio de enfriamiento. Después de una serie de expediciones los cruzados reportan entre 1097 y 1270 la mayoría de los descubrimientos de los árabes.

Al mismo tiempo en Francia la burguesía y los señores usaban baños aromáticos, la capital tenía una treintena de baños públicos. Es en esa época que la farmacia favorece el desarrollo de la destilación de aceites esenciales, que fueron conocidos con el nombre de "Quinta esencia". Jean Roquetaille, en 1350, adquiere renombre gracias a su obra "Sobre la virtud y propiedades de la quinta esencia de todas las cosas". El cirujano de Luis XIII, David de Planis Campy (1589 - 1644), describe igualmente todos los conocimientos para extraer la quinta esencia. Bajo el reinado de Luis XIV, la falta de higiene era común. Los ricos y señores utilizaban una gran cantidad de perfume para enmascarar su mal olor a tal grado que el rey tuvo que prohibir su utilización al fin de su reinado, por llegar a un exceso en su uso. El químico y médico de Luis XIV, Lémery, describe en su "Diccionario de Drogas Simples" todas las plantas que se utilizan para la fabricación de drogas medicinales. Se contaba con alrededor de sesenta plantas de las cuales se extraían aceites esenciales. El siglo XIV fue también una época donde los baños aromáticos tuvieron un

auge considerable. En esa época la industria de la perfumería nace en Grasse y se extrae el aceite esencial de lavanda y espliego. En el siglo XVII casi todas las plantas aromáticas de Europa y el Medio Oriente ya eran destiladas. En el siglo XVIII se realizaban los primeros controles, con el fin de descubrir las falsificaciones. Demanchy en su obra sobre “El arte de destilación de aguas fuertes” en 1775 describe un equipo para la destilación de plantas empleando vapor de agua.

A mediados del siglo XIX los primeros análisis químicos y la producción de aceites esenciales comerciales hacen su aparición. Cabe señalar que el *codex Medicamentarius* francés de 1837 contenía la descripción de 44 aceites esenciales, mientras que el *codex* de 1949 mencionaba solamente 10. Esto fue la consecuencia del fuerte impulso dado a la industria de síntesis en esos años, y que llegó hasta pasados los primeros cincuenta años del siglo XX.

Desde fines del siglo XIX hasta nuestros días el desarrollo de la ciencia y tecnología han permitido ampliar enormemente el conocimiento de las propiedades y la composición de los aceites esenciales. Fueron fundamentales los trabajos de Otto Wallach, premio Nóbel de Química de 1910 por su labor en el análisis de los terpenos; los del suizo Leopold Ruzicka, premio Nóbel de Química de 1939 por sus trabajos de síntesis orientada a la perfumería; las contribuciones de los ingleses A. V. Martin y R. L. Synge, premios Nóbel de Química de 1952, por haber desarrollado la técnica de la cromatografía en fase gaseosa, la herramienta analítica por excelencia para el estudio de los aceites esenciales; y la labor de la escuela de aromaterapia y medicina natural desarrolladas por hombres como el Ing. Gattefossé y el Dr. Leclert, entre otros.

Hoy, gracias al notorio interés que está teniendo nuestra sociedad por los productos naturales, y con el respaldo de toda la experiencia y la información científica disponible, el mercado de los aceites esenciales ha vuelto a tener un renovado impulso, por lo que se puede pronosticar nuevas y mejores perspectivas de crecimiento.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

La clasificación de aceites esenciales que aquí se hace está basada en la ubicación de los aceites dentro de una determinada herbácea, es decir si se encuentran en la superficie de ésta o incrustados a cierto nivel de su superficie externa (subcutáneos).

1.4.1 Superficiales. Los aceites superficiales son aquellos que se encuentran en su totalidad en la superficie externa de la herbácea. Las mentas (hojas), lavandas (flores) y los aceites secretados en el pericarpio de frutas cítricas son típicos de esta clase.

Estos aceites se caracterizan porque el tiempo que se requiere para extraerlos de la herbácea es inversamente proporcional al flujo másico de vapor (en el caso de arrastre con vapor como se explica más adelante), es decir, si cargas de herbácea de igual tamaño y forma son procesadas a diferentes flujos másicos de vapor, el tiempo de extracción es menor en la carga con flujo másico mayor.

Estos aceites se clasifican de acuerdo a la capacidad absorbente (de agua) de la herbácea, en aceites superficiales de herbácea muy absorbente y herbácea ligeramente absorbente.

La lavanda tiene una superficie muy vellosa y absorbente, la cual podemos asimilar a la envoltura de un papel grueso y manchado. Por otro lado, la menta tiene una superficie muy lisa y debería secarse al sol para darle de algún modo capacidad absorbente [8].

1.4.2 Subcutáneos. Muchos aceites son secretados por debajo de la superficie externa de la herbácea. Estos se encuentran en diversos lugares tales como:

- En la corteza de los árboles: cinamón, casia.
- Entre las fisuras de la madera de los árboles: tronco de sándalo, madera de cedro.
- En flores secas y capullos: diente de ajo, manzanilla.
- En una gran variedad de semillas y frutas: jengibre, lirio, vetiver.
- Entre los lechos de la palizada de hojas muy rudas: eucalipto y árbol de té.[8]

1.5 PRODUCCIÓN DEL ACEITE ESENCIAL

1.5.1 *Lippia alba*, *Cymbopogon citratus* y *Pelargonium graveolens*. *Lippia alba*. Uno de los tres tipos de plantas aromáticas a las que se pretende extraer su aceite esencial es la herbácea conocida en Colombia como pronto alivio (*Lippia alba*). Una descripción de ésta y su aceite esencial extraído mediante el proceso de arrastre con vapor se puede ver en la tabla 1.

Figura 1. Cultivo de *Lippia alba*



Tabla 1. Características del AE de pronto alivio

Nombre Científico	<i>Lippia alba</i>
Nombre Común	Pronto alivio
Familia	<i>Verbenaceae</i>
Tipo de Cultivo	Orgánico
Componentes mayoritarios	Carvona 52%
	Limoneno 36%
	Biciclosesquifelandreno 5,5%
	Otros 6,5%
Usos	Anti-hipertensivo
	Vasodilatador
	Anti-bacterial
	Anti-inflamatorio
	Sedativo suave
	Materia Prima para aplicación en Aromaterapia.
Color	Amarillo Claro
Toxicidad	Ninguna Conocida
Densidad	0,89g/ml
Índice de Refracción	1,583
Punto de Ebullición	202-255 °C
Solubilidad	Soluble en etanol a 25 °C

La *Lippia alba* es un arbusto ramificado con una altura de hasta 1.5 m. Se establece en sitios con alta luminosidad, soporta épocas sin lluvia de hasta 6 semanas y crece en altitudes entre 0 y 1100 m.s.n.m. La primera cosecha se realiza entre los 5 y 6 meses después de la siembra. En plantaciones del Caribe se reportan rendimientos de 1 ton de material seco (hojas y flores) por ha. El rendimiento en peso de su aceite esencial es muy variable y oscila entre 0.1 a 1.2% [9].

El pronto alivio es una herbácea cuya aceite esencial no se produce en Colombia para su exportación, menos para consumo interno. Como se puede ver en la Tabla 1 tiene gran potencial en la industria farmacéutica debido a los usos médicos que éste posee y a su composición química.

Limonaria. Especie vivaz, cespitosa, perteneciente a la familia botánica de las gramíneas, con un rizoma corto, ramificado, que origina numerosos macollos. Puede alcanzar una altura de hasta 1,50 m. Las hojas son largas y planas. El llamado "aceite de lemongrass" es obtenible por destilación de dos especies distintas: el *Cymbopogon citratus* Stapf, a la que se considera que brinda el producto genuino, y el *Cymbopogon flexuosus* Stapf., llamado más apropiadamente "malabar grass" o "cochin grass". El aceite es de color amarillo, con intenso olor a limón; contiene citral (70 - 85%), geraniol, linalol, metilheptenona, citronelal, limoneno, dipenteno, etc. [10]

Figura 2. Cultivo de Limonaria



La demanda anual de Limonaria para la producción de su aceite esencial es de más de 100 toneladas. En la Tabla 2 se puede ver los principales aspectos de la producción de Aceite Esencial de Limonaria.

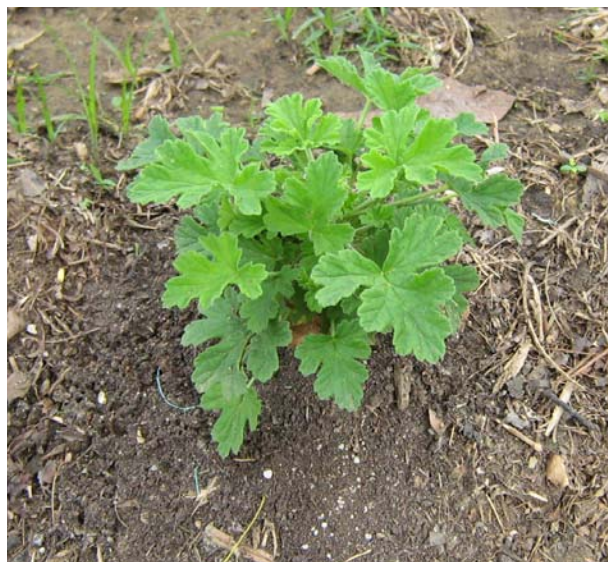
Tabla 2. Características del aceite esencial de limonaria

Tipo de Planta	Pasto semi-perenne
Parte cosechada	Hojas y tallo
Tiempo de vida económico	3 a 4 años
Cultivo a la primera cosecha	4 a 6 meses
Intervalos subsecuentes de cosecha	3 a 4 meses
Período de máximo rendimiento de aceite	Segundo año
Rendimiento de aceite promedio anual	90 kg. / ha
Precio de exportación en bruto / ha	US\$810 /ha

Fuente: GREEN, Clinton. Export Development of Essential Oils and Spices by cambodia. 2002

Geranio. Originario de la provincia de Cape en Sudáfrica donde se pueden encontrar alrededor de 600 especies, la variedad de *Pelargonium graveolens* es la más utilizada para la extracción de aceites esenciales. Los principales constituyentes del aceite de geranio son citroneol (19.28-40.23%) y geraniol (6.45-18.44%).

Figura 3. Cultivo de *Pelargonium graveolens*



Pelargonium graveolens es un arbusto perenne con una altura de 60 a 90 cm. y tallo ramificado. La extracción de su aceite se hace de las hojas y la destilación por arrastre con vapor es el método que produce mayores rendimientos de sus aceites esenciales. Los rendimientos de aceite varían entre de 0.1 a 0.15%; sin embargo en el sur de Rusia (ahora Georgia), se han desarrollado híbridos con un rendimiento por encima del 0.4%.

El geranio es cultivado en Argelia, Egipto, Marruecos, China, Islas Reunión y Georgia. Su aceite esencial es producido en pequeñas cantidades en España,

Malasia, Bélgica, Congo, Kenia e India. China, Egipto e Islas Reunión son los mayores productores de aceite.

Pelargonium graveolens presenta los mismos períodos de cultivo y cosecha del *Cymbopogon citratus* (limonaria) pero tan sólo tiene un rendimiento promedio de 26kg de aceite por hectárea. Bajo buenas condiciones de manejo, rendimientos por encima de 50 kg/ha se han obtenido en Andhra Pradesh (India).

El uso del Geranio depende de la variedad pero podría decirse a nivel general que se usa principalmente en la fabricación de jabones, cremas y en perfumería.

1.5.2 Mercado nacional. “Colombia es un país tropical privilegiado por su posición geográfica con costas en dos océanos y una variedad de climas y topografía. El cultivo de plantas aromáticas y la posterior obtención de sus aceites esenciales surgen como una posibilidad de aprovechamiento no sólo en el campo agrícola sino en el humano, generando una agroindustria de tecnología barata con escasa producción de desechos, poca demanda de insumos y un valor agregado importante” [\[2\]](#).

Colombia ha sido país importador de productos forestales no maderables (PFNM) y se está tratando de revertir este hecho, substituyendo importación con producción nacional.

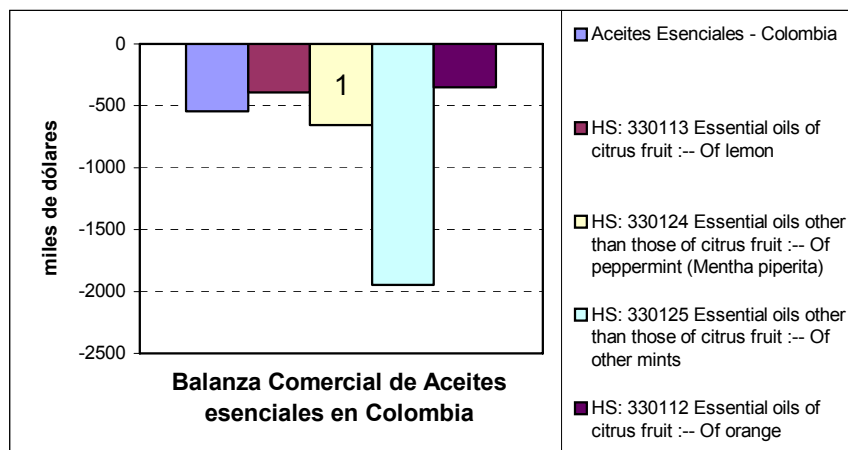
Durante el año 2000, Colombia importó aceites esenciales por un valor superior a los 6.9 millones de dólares; monto muy superior a los 2.1 millones de dólares que comercializó durante ese mismo año. Los principales aceites

esenciales importados por Colombia son los aceites esenciales de cítricos (naranja, limón, lima) y los aceites de mentas (menta piperita, vetiver, etc.) [2].

Las mayores importaciones que se realizaron corresponden a la clasificación arancelaria número HS 330125, que corresponde a aceites esenciales de otras mentas (Diferentes a menta piperita y vetiver). En segundo lugar se encuentran los aceites esenciales diferentes a aquellos de frutas cítricas (HS330129) de los cuales, Colombia importó más de 1.5 millones de dólares en el año 2000 [2].

A continuación se muestra la balanza comercial² para el año 2000 discriminando por tipo de aceite esencial:

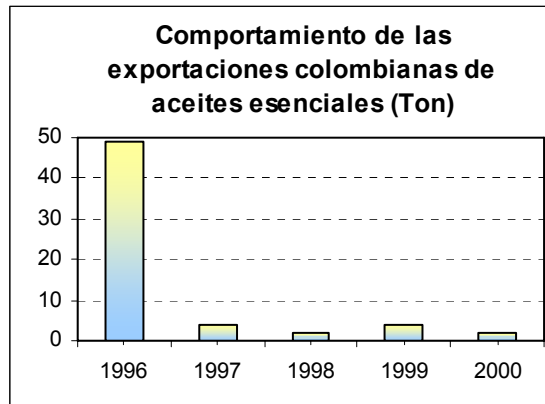
Figura 4. Balanza comercial de los aceites esenciales en Colombia



Las exportaciones de aceites esenciales en Colombia han presentado la siguiente tendencia [2]:

² Balanza comercial = Exportaciones - Importaciones

Figura 5. Exportaciones de aceites esenciales en Colombia



Es clara la tendencia de las exportaciones colombianas, su disminución ha sido dramática. Para el año 2000 el valor de las exportaciones es muy cercano a cero. El bajo nivel de las exportaciones colombianas se ha mantenido en el año 2001 sin registros para los años siguientes.

1.5.3 Mercado mundial. Importaciones. Según datos de la FAO [2, 4], las importaciones de aceites esenciales han tenido una tendencia al alza desde 1996 hasta el 2000. A pesar de haber presentado una leve caída desde 1997, durante 1999 y 2000 presentaron nuevamente una tendencia al alza.

A continuación se presenta una lista del valor de las importaciones de los principales importadores de aceites esenciales.

Tabla 3. Principales importadores de aceites esenciales

País Importador	Valor Importaciones (US \$ '000)
Unión Europea	296,019
Estados Unidos	235,649
Japón	78,477
Suiza	52,057

Fuente: UNCTAD, para Agosto de 2002.

Los principales países importadores dentro de la Unión Europea son el Reino Unido, que importa el 27% del total de las importaciones de la Unión Europea en términos de volumen, seguido de Francia (18%), Holanda (16%), Alemania (16%), España (8%) e Italia (5%) [\[2\]](#).

Exportaciones. Aunque las exportaciones de la Unión Europea de aceites esenciales disminuyeron un 1.8% en 1998, éstas alcanzaron los \$2 millones de dólares. El principal exportador de la Unión Europea fue Francia, representando el 33% del total de las exportaciones de éstos países, seguido del Reino Unido (20%), Alemania (18%) y Holanda (9%). Los principales destinos fueron Alemania, Reino Unido, Italia, Estados Unidos, Francia, España, y Suiza, que juntos recibieron el 54% de las exportaciones de la Unión Europea [\[4\]](#). Mientras tanto el mercado de los aceites esenciales ha experimentado un gran dinamismo en Estados Unidos en los últimos años, con un aumento en las exportaciones superior al 50% entre 1998 y 2002, pasando de US\$ 600 millones a US\$ 910 millones [\[2, 10\]](#).

2 METODOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES

2.1 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. El término destilar proviene del latín “destillare”: separar por medio del calor, alambiques u otros vasos una sustancia volátil llamada esencia de otras más fijas, enfriando luego su vapor para reducirla nuevamente a líquido.

La destilación es un proceso físico pues no se produce ninguna transformación de sustancias sino una separación, desde el punto de vista de la física la destilación se define del siguiente modo: “muchas sustancias de punto de ebullición muy alto, calentadas juntamente con el agua pasan a estado de vapor a la temperatura de ebullición de ésta, son por lo tanto, volátiles con el vapor de agua y pueden obtenerse y purificarse por destilación en corriente de ese vapor.

2.1.1 Hidrodestilación. Muchos siglos han pasado desde que la humanidad empezó a hervir plantas aromáticas en agua para extraer sus propiedades activas concentradas. Con los considerables refinamientos modernos éste método ancestral todavía está en uso. El material vegetal es cargado dentro de un tanque y cubierto con suficiente agua para asegurar que el material de la planta esté más o menos suspendido y pueda moverse libremente en el medio líquido. El agua es entonces hervida y los vapores que suben por este

“destilador” son atrapados y condensados. En estado líquido el agua y el aceite aromático son inmiscibles y se separan espontáneamente de acuerdo a sus densidades relativas.

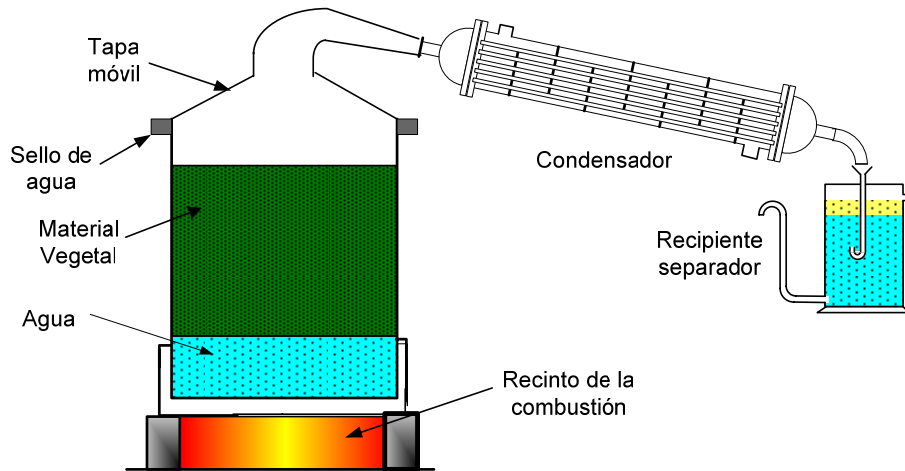


Figura 6. Hidrodestilación.

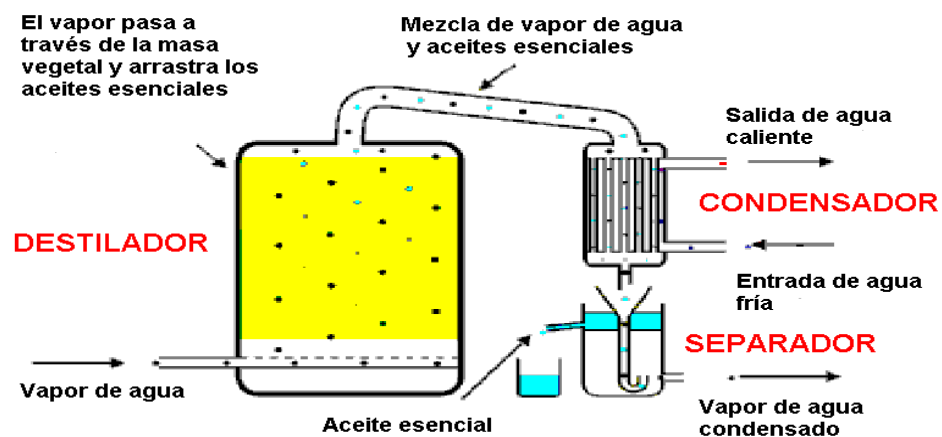
En la destilación con agua el material vegetal siempre debe encontrarse en contacto con el agua. En caso de que el calentamiento del destilador se haga con fuego directo sobre éste, el agua presente en el destilador deberá ser suficiente y permanente para llevar a cabo toda la destilación a fin de evitar el sobrecalentamiento y carbonización del material vegetal, dado que este hecho provoca la formación de olores desagradables en el producto final [5].

2.1.2 Destilación por arrastre con vapor. En este sistema al material vegetal no se le permite entrar en contacto con el agua dentro del recipiente generador de vapor. La herbácea, a temperatura ambiente, es cargada dentro de un tanque que sirve como destilador con una tapa suficientemente ajustada y que con frecuencia se incorpora en ésta la tubería de salida del

vapor. Un flujo de vapor se introduce debajo del material vegetal y que luego se mueve en forma ascendente a través de la carga (material vegetal).

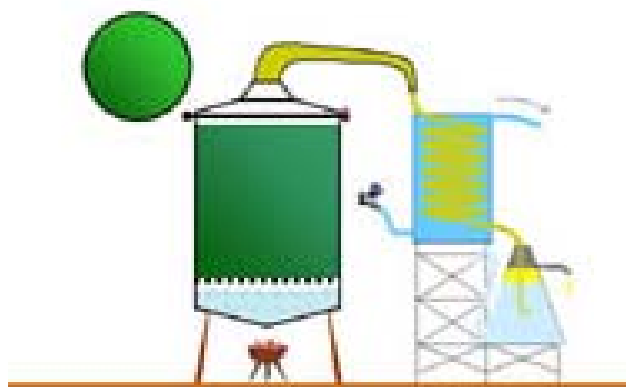
Comenzando desde el fondo, el vapor de agua se condensa sobre la superficie de la herbácea, entregando el calor latente, que eleva la temperatura en las capas sucesivas de la herbácea hasta el punto de ebullición. Cuando la temperatura en la parte superior de la carga llegue a ser igual a la temperatura de saturación de los aceites, los aceites que alcancen la superficie de la herbácea comenzaran ha evaporarse. El vapor de agua que va llegando (proveniente de un generador de vapor) conducirá entonces una mezcla de vapores de agua y aceite fuera de la parte superior de la carga y estos vapores son luego llevados hasta un condensador. Aquí de nuevo, el aceite y el agua son inmiscibles en estado líquido y se separan de acuerdo con sus densidades relativas. Esta operación continúa hasta que el aceite virtualmente se agota en la herbácea. La carga consumida es entonces removida y reemplazada por material fresco.

Figura 7. Sistema de destilación por arrastre con vapor



2.1.3 Destilación 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 este sistema y en anteriormente mencionado es que el material vegetal se encuentra suspendido sobre un tramado (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 cuando el material ha sido previamente secado o cuando éste tiene una alta absorción de agua. El vapor es saturado, con alta humedad y fluye a una presión cercana a la atmosférica.

Figura 8. Destilación agua-vapor

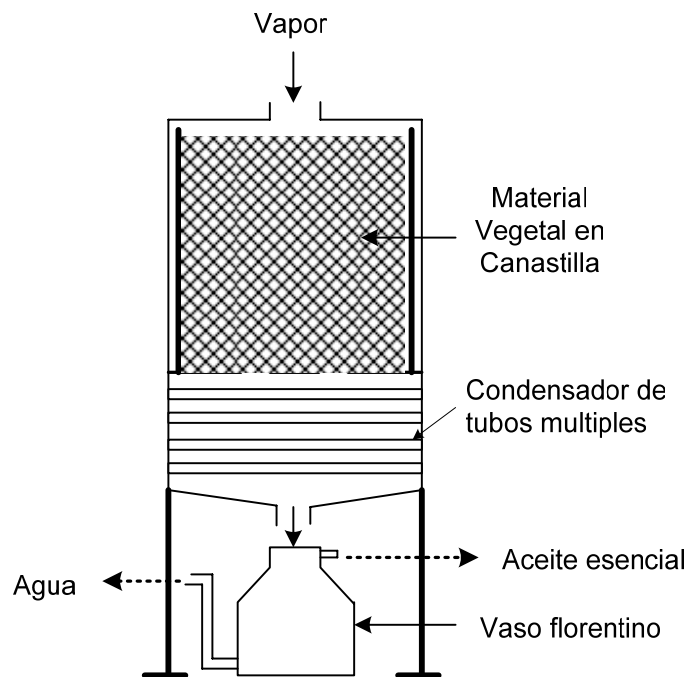


2.2 HIDRODIFUSIÓN

La sociedad Montenier Technologies ha desarrollado un sistema de extracción llamado H.D.F. que usa un flujo descendente de vapor de agua que pasa a través del material vegetal. La concepción del extractor tipo H.D.F. hace uso de la acción osmótica del vapor de agua, haciendo que se libere bajo forma de azeótropo el aceite esencial contenido en el material vegetal. Este proceso de ósmosis es conocido bajo el nombre de hidrodifusión. El principio

es el de hacer liberar y condensar el vapor aprovechando la gravedad, dispersando el azeótropo producido por el vapor de agua en el material vegetal. Esta nueva técnica permite disminuir los inconvenientes de la hidrodestilación clásica. Los aparatos de este tipo funcionan actualmente en diferentes países [3].

Figura 9. Equipo de hidrodifusión



2.3 EXTRACCIÓN ASISTIDA POR RADIACIÓN DE MICROONDAS

Es una técnica patentada originalmente en Canadá. Consiste en aprovechar el mismo proceso de los hornos a microondas caseros, es decir calentar el agua contenida en el material vegetal, que a su vez está inmerso en un disolvente “transparente” a las microondas, como pueden ser Cl_4C , 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 principal ventaja de esta técnica es su velocidad, pues pueden lograrse extracciones en minutos, cuando comparativamente una técnica tradicional como la hidrodestilación necesita varias horas [3].

La implementación del sistema de microondas a escala industrial, si bien es factible tecnológicamente, implica una fuerte inversión económica. Además se debe tener en cuenta que, como en cualquier cambio de tecnologías tradicionales, los productos obtenidos suelen diferir en calidad de los normalmente ofrecidos en el mercado internacional y pueden por lo tanto significar un problema para competir con el producto comercialmente consagrado.

3 DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR

3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

La destilación por arrastre con vapor se hace en tres fases: la fase de calentamiento, la fase de extracción y la fase de enfriamiento. En estas tres fases hay transferencia de calor de diferentes maneras y en la fase de extracción hay adicionalmente transferencia de masa.

3.1.1 Fase de calentamiento. Esta fase comienza con la admisión de vapor de agua proveniente de la caldera hasta el punto donde empiezan a evaporarse los aceites esenciales y son arrastrados por la parte superior del destilador hacia el condensador. En esta fase el vapor de agua transfiere calor latente tanto al material vegetal como al recipiente que lo contiene. Matemáticamente el calor transferido se calcula como:

$$Q_c = m_{vc} \cdot h_{fg} = [(M_s \cdot Cp_s) + (M_h \cdot Cp_h)] \cdot \Delta T$$

Q_c : Calor de calentamiento

m_{vc} : Masa de vapor requerida para el calentamiento

h_{fg} : Calor latente de vaporización del agua

M_s : Masa del recipiente que contiene la herbácea

M_h : Masa del material vegetal (herbácea)

Cp_s : Calor específico del material del recipiente

Cp_h : Calor específico de la herbácea

ΔT : Gradiente de Temperatura

El gradiente de temperatura es la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de evaporación de los aceites esenciales. La temperatura de evaporación de los aceites queda definida por la temperatura a la cual el vapor de agua pasa a través del material vegetal, por ejemplo si el vapor que entra es saturado y a presión atmosférica la temperatura de dicho vapor es de 100°C.

3.1.2 Fase de extracción. Esta fase comprende desde el momento en que empieza a producirse condensado de agua y aceite hasta que éste último finalmente se agota. En esta fase la transferencia de calor es muy compleja y generalmente se calcula el tiempo requerido para la extracción a un flujo másico de vapor dado con base en pruebas realizadas con diferentes cantidades de la misma herbácea. El cálculo del tiempo de extracción para aceites superficiales se explica con detalle en el anexo A.

También hay transferencia de masa pues hay una pequeña cantidad de aceite que es arrastrado junto con el vapor de agua. El rendimiento medido en mililitros de aceite producido por kilogramo de herbácea es el factor más usado para evaluar la transferencia de masa.

La mayor parte del vapor suministrado por la caldera se utiliza en esta fase y un análisis teórico (con base en sistemas multicompuestos) se hace inviable ya que dependiendo de las condiciones del suelo y clima para una herbácea determinada los compuestos de los aceites esenciales extraídos pueden variar considerablemente de región a región.

3.1.3 Fase de enfriamiento. Consiste primero en condensar los vapores de agua y aceite provenientes del destilador y luego enfriarlos a una

temperatura adecuada para que la separación agua-aceite se haga lo más rápido posible sin permitir que los componentes importantes de los aceites se pierdan por evaporación.

Este proceso se lleva a cabo en un intercambiador de calor que se diseña de acuerdo al área requerida para extraer cierta cantidad de calor como:

$$A = \frac{Q}{U \cdot LMTD}$$

Siendo:

A: Área de transferencia de calor, equivalente a la superficie externa total del serpentín (condensador de este tipo) o a la superficie interna total de los tubos (en el caso de un condensador de casco y tubos)

Q: Cantidad de calor liberada por la mezcla de vapores agua-aceite esencial durante la condensación de la misma y posterior enfriamiento, dentro del condensador.

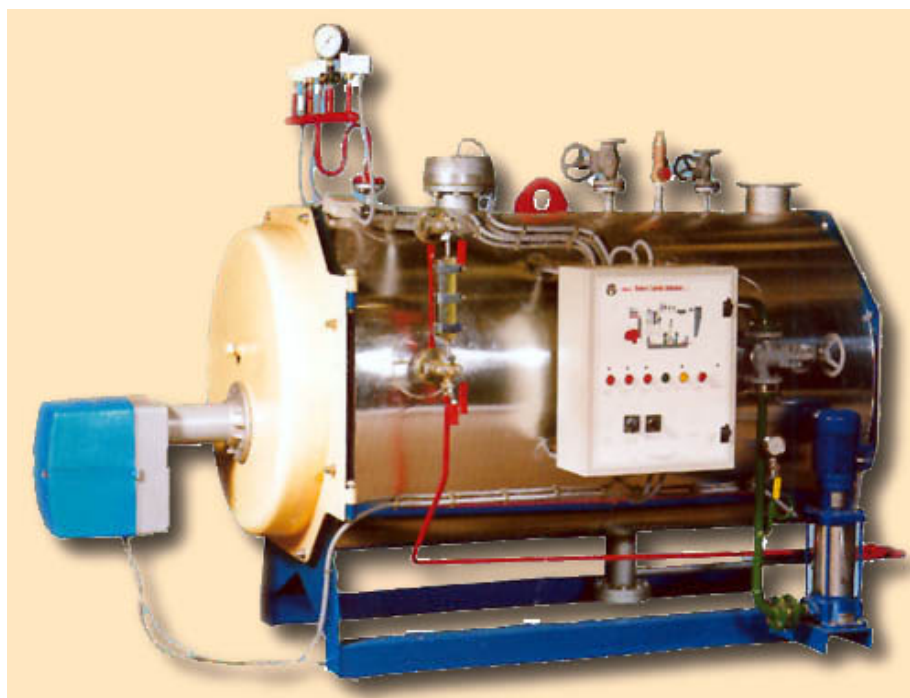
U: Coeficiente global de transferencia de calor.

LMTD: Diferencia media logarítmica entre las temperaturas de entrada y salida del agua y las temperaturas de entrada del vapor y salida del condensado en el condensador.

3.2 EQUIPO DE DESTILACIÓN

3.2.1 Generador de vapor

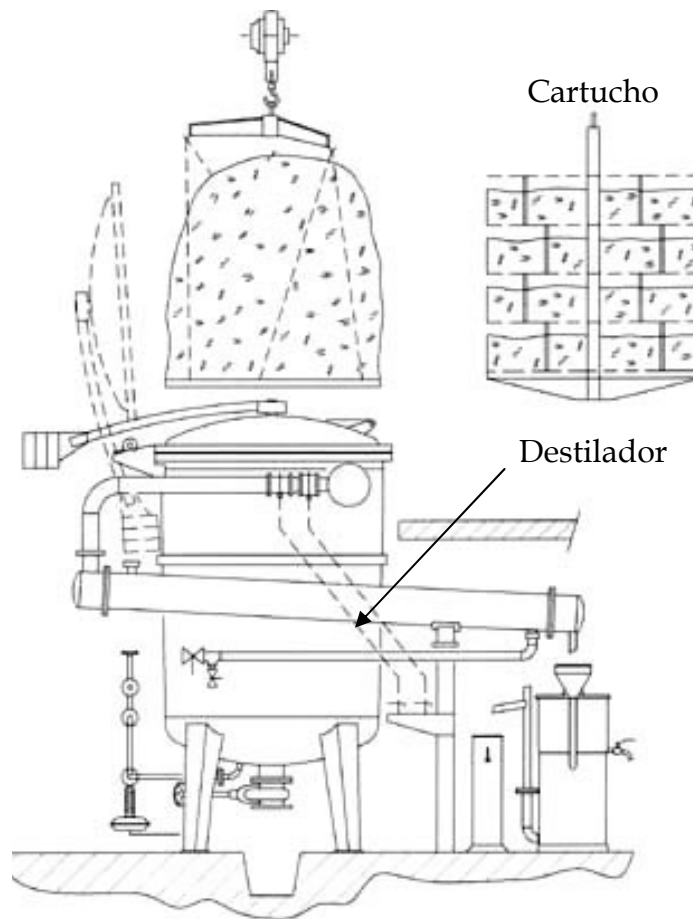
Figura 10. Caldera pirotubular



Es el equipo auxiliar que provee de vapor de agua al equipo de extracción. Un generador de vapor se puede definir como “una serie de dispositivos que aprovechando el poder calorífico de un combustible producen vapor”. La capacidad de un generador de vapor se expresa en Caballos Caldera (CC), y para definir este termino, se dice que un generador de vapor tiene una capacidad de un caballo caldera, cuando es capaz de producir 15.65 kg/hr (34.5 lb/hr) de vapor saturado a 100° C, utilizando agua de alimentación a la misma temperatura [3].

3.2.2 Destilador

Figura 11. Destilador de aceites esenciales



El destilador o alambique, es donde se deposita el material a destilar. Consiste en un tanque cilíndrico de un diámetro igual o algo inferior a la altura, que tiene en la parte superior una tapa que debe ser cerrada herméticamente.

El destilador se construye en diversos materiales de chapa cuyo espesor es también variable según el trabajo, pero es preferible que sea de acero inoxidable. Los tubos de conexión deben ser amplios y de acuerdo a la rapidez de destilación, más grande cuanto mas veloz sea esta.

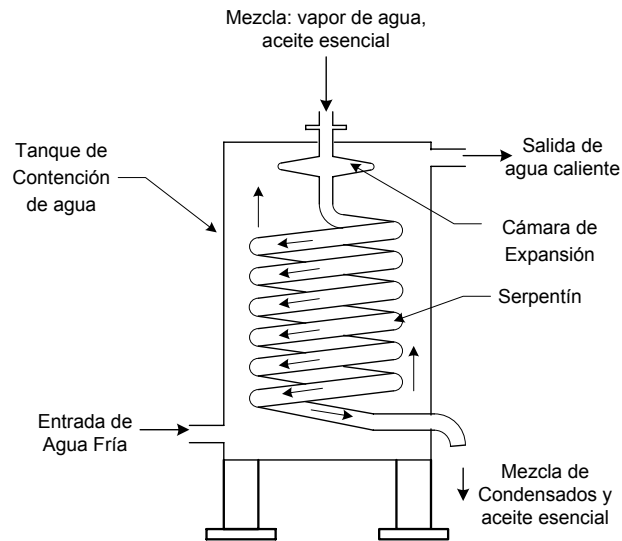
Debajo de la parrilla o criba, se encuentra el tubo de entrada de vapor, cuidando que entre el fondo y el tubo la distancia sea lo suficientemente grande, como para que se produzca aquí la condensación de agua. La distribución del vapor se asegura por la disposición en espiral o en cruz, de la prolongación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

Un alambique bien construido debe ser hermético, para esto deberá cuidarse el ajuste de las juntas y el cierre de la tapa. La carga de material no debe estar comprimida; para obtener los mejores resultados se pueden hacer separaciones, por medio de patas, de las cargas que estén mas abajo. El objeto principal es buscar que el vapor atraviese correctamente el material vegetal y que no se deslice por las paredes del destilador. Debido a que el vapor se difunde por los lugares que le oponen menos resistencia, no son recomendables los cestos (cartuchos) de alambres o perforados, pues el vapor tiende a dirigirse a través de las mallas y entre los costados del cesto y el alambique. Los mejores cestos son los que tienen costados de chapa sin agujeros, pero con el fondo perforado.

El empleo de cestos ayuda a la carga y descarga del material, sobre todo en alambiques grandes. La carga y descarga del alambique es un punto importante. Ahorra tiempo el contar con grúas y que el lugar de cultivo esté cercano al de la planta de destilación [\[3, 8, 10\]](#).

3.2.3 Condensador. En la condensación de vapores se pueden 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 del separador de aceite.

Figura 12. Condensador de serpentín



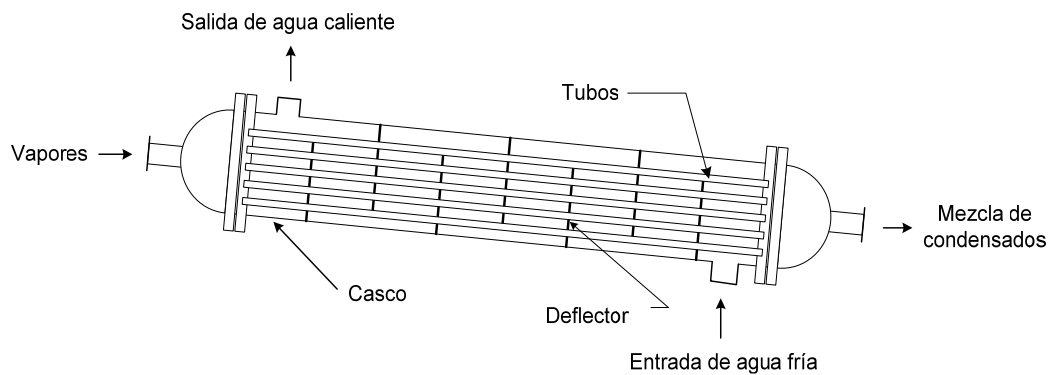
Uno de los condensadores utilizados es el que consta de serpentín y cámara de expansión (Figura 12). En este tipo de condensador se alimenta la mezcla de vapores a una cámara de expansión donde se obtiene la mayor parte de los condensados. Estos van descendiendo a la parte baja del condensador.

Es conveniente fabricar las espiras del serpentín con menores diámetros a medida que se aleja de la salida de vapores del destilador. Esto se aconseja para evitar un taponamiento en la primera porción de la tubería y también para optimizar la transferencia de calor en las últimas porciones del serpentín, dado que allí el condensado ya es un líquido, por lo que conviene que ocupe la mayor parte del tubo. Lo más usual es dividir el largo del serpentín en tramos de diámetros cada vez menores.

El serpentín y la cámara de expansión se colocan dentro de un tanque de contención de agua de enfriamiento, la cual deberá de estar circulando para aumentar el coeficiente de transferencia de calor. El agua fría que se utiliza para la condensación se alimenta en al parte inferior del tanque de contención y se descarga por la parte superior del mismo. 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, también es más costosa su fabricación (Figura 13). Otra ventaja que presentan es que son más seguros, 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.

Figura 13. Condensador de casco y tubos



En este modelo suele alimentarse la mezcla de vapores por dentro de los tubos y el agua de enfriamiento circulando por el exterior de los mismos, realizando de este modo la transferencia de calor. Por lo general estos condensadores se ubican inclinados o en forma vertical, con el fin de facilitar la descarga de los condensados. Las necesidades promedio de condensación de vapores en una destilación de esencias están estimadas entre los 25 y los 50 kg/m²/hr [3].

Debe tenerse en cuenta que en muchos casos es importante disponer de un sistema de regulación del flujo de agua refrigerante, por que algunas esencias necesitan una temperatura superior a la del ambiente para separarse totalmente del agua. También es importante esto en los casos donde es posible una solidificación del material a temperatura ambiente (caso del mentol en la menta japonesa o de esencias semisólidas como la de palo santo: *Bulnesia sarmientoi*).

3.2.4 Recipiente separador. Llamado también vaso Florentino, es un dispositivo destinado a realizar la separación de un aceite esencial del vapor de agua condensado que se utilizó para su extracción del material vegetal.

Debido a las características propias de los aceites esenciales, podemos dividirlos para su separación en dos grandes grupos, “aceites esenciales pesados” y “aceites esenciales ligeros”. Esta división se basa en que los aceites esenciales tienen una densidad muy cercana a la del agua, denominándose “aceites esenciales pesados” a aquellos aceites cuya densidad es mayor a la densidad del agua y por consiguiente se depositan en la parte inferior del separador. Por el contrario, los “aceites esenciales ligeros” son

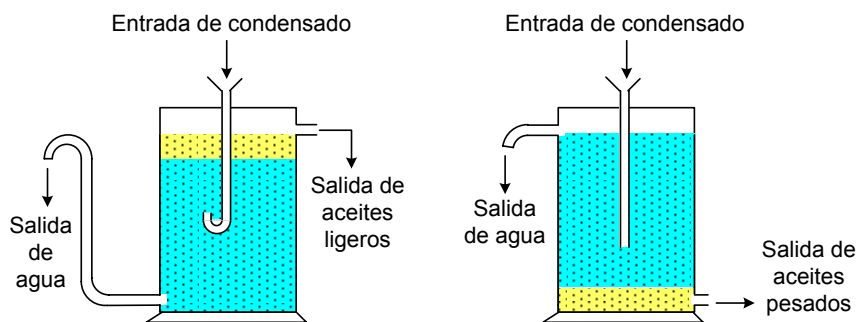
aquellos aceites esenciales que tiene una densidad menor a la densidad del agua y que por lo tanto se acumulan en la superficie de la misma [3, 8].

Se sabe que también influye la temperatura a la que se realiza la separación. Con el incremento de la temperatura, la densidad de los aceites decrece más rápidamente que la densidad del agua. Así, en los “aceites esenciales ligeros”, la diferencia entre las densidades se hace mayor con el incremento de la temperatura y esto permite que se separen con facilidad [3, 8].

Existe una gama extensa de separadores de aceite esencial, lo cual permite seleccionar el adecuado para nuestro caso particular (Figura 14).

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

Figura 14. Separadores de aceites esenciales



4 DISEÑO

4.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto está concebido para llevar a cabo el diseño de una planta extractora de aceites esenciales, esto quiere decir que se diseñaron o seleccionaron: un generador de vapor (caldera), un destilador, un condensador, un recipiente separador de AEs y el sistema de enfriamiento para el agua que produce el condensado (torre de enfriamiento).

El diseño se desarrolló en las siguientes etapas:

Para el destilador:

1) *Diseño térmico*: específicamente se calculó el flujo másico de vapor requerido para que el proceso se lleve a cabo en un tiempo determinado de las especies vegetales tipo arbusto: “pronto alivio” (*lippia alba*), “geranio” (*Pelargonium graveolens*) y “limonaria” (*Cymbopogon citratos*), con base en el procedimiento recomendado por Tim Denny para este tipo de herbáceas como se puede ver en las secciones 5.1 a 5.3.

2) *Diseño mecánico*: comprende el diseño del cartucho, el diseño del soporte para el cartucho, las tapas inferior y superior, el distribuidor de vapor, los izajes y los soportes del destilador.

3) *Selección de la caldera:* A partir del flujo másico de vapor requerido se selecciona una caldera operada por gas.

Para el condensador:

1) *Diseño térmico:* se refiere al cálculo del área mínima necesaria del condensador para enfriar los vapores de agua-aceite provenientes del destilador hasta una temperatura determinada.

2) *Diseño mecánico:* se realizó el dimensionamiento del haz de tubos, las bridas, la placa portatubos, los cabezales, las boquillas de entrada y salida, el diseño de los soportes y los izajes.

3) *Selección de la torre de enfriamiento.* Se selecciona a partir del flujo de calor que es necesario retirar del condensador. Este calor se evalúa a partir de dos parámetros: el rango (diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua de enfriamiento) y el flujo másico de agua por el lado del casco del condensador.

Para el vaso florentino (recipiente separador):

En el caso del recipiente separador agua-aceite condensado, el dimensionamiento se hace a partir de pruebas que midan la velocidad de separación del aceite con respecto al agua y del volumen de condensado que se espera producir (tanto agua como aceite) como se verá más adelante.

4.2 CRITERIOS DE DISEÑO

La planta se ubicará en una zona cercana a la siembra de los cultivos, con el fin de suministrar disponibilidad constante de material vegetal fresco durante la duración del proceso de extracción y facilidad en el transporte hacia el lugar donde se encuentra la planta extractora.

La planta extractora se diseña teniendo en cuenta la cantidad de material a procesar en un tiempo establecido, partiendo que la destilación se lleva a cabo mediante el proceso de arrastre con vapor, se determinó inicialmente la cantidad de vapor necesario para suplir con las necesidades anteriormente descritas (Cantidad de material y tiempo), luego se diseñaron los elementos que componen la planta extractora (Destilador, cartucho, condensador y separador) bajo las siguientes condiciones de operación:

- El vapor para el proceso es saturado y a presión atmosférica.
- El suministro de vapor durante el proceso de destilación debe ser continuo y a un flujo másico constante.
- La extracción se hace por cilindros desmontables (cartuchos) con capacidad para 300 kg. de material vegetal cada uno.
- Facilidad para manipulación (dos personas).
- Operación en turnos de 70 minutos incluyendo el tiempo disponible para el cambio del cartucho de 10 minutos.

5 DISEÑO TÉRMICO DEL DESTILADOR

Al determinar el vapor que debe ser suministrado por la caldera se tuvo en cuenta el procedimiento sugerido por TIM DENNY [8], quien llevó a cabo experimentos con plantas de lavanda y menta para la obtención de aceites esenciales, los cuales arrojaron parámetros a seguir para las demás plantas con características similares.

A continuación se hace una breve descripción sobre las pruebas de Denny y sus resultados que servirán más adelante para entender el procedimiento del cálculo del flujo másico de vapor requerido.

5.1 PRUEBAS LLEVADAS A CABO POR TIM DENNY

En la Tabla 4 se muestra las condiciones a las que se llevó una de las pruebas con lavanda. Estas condiciones junto con los valores obtenidos en dicha prueba (cantidad de agua y aceite recogido a la salida del condensador en un tiempo determinado) se tomaron como valores estándar y sirven como referencia para el cálculo del tiempo de extracción de una herbácea similar a condiciones diferentes (densidad, masa de material vegetal y altura de la carga).

El tiempo total registrado en la Tabla 4 (segunda columna) corresponde al tiempo de extracción. Este tiempo se define como aquel período que va desde el momento en que empieza a producirse aceite esencial hasta el momento en que éste aceite se agota. El tiempo de extracción, T_e para

herbáceas muy absorbente como la lavanda, depende de dos parámetros que son únicos de cada herbácea³. Estos son el *tiempo básico*, **t** y el *parámetro de incremento de la cantidad de aceite por unidad de altura de la carga*, **s**. Matemáticamente:

$$T_e = t \cdot \sqrt{1 + \frac{H}{s}} \quad (5.1)$$

Donde **H** es la altura de la carga en el destilador.

Tabla 4. Prueba realizada por Denny con lavanda

DETALLES DE LA CARGA	Hora a la que se recogió el condensado	Fracción de Agua en ml	Fracción de Aceite en ml	Progreso del aceite producido en ml
No. 978/75	1503	2300	475	
Masa: 301 kg	1505	5805	1005	1480
Área de la sección transversal: 1,026 m ²	1507	5900	545	2025
Flujo másico de vapor: 3,17 kg/min.	1509	5950	253	2278
Densidad de Empacado: 308 kg/m ³	1511	6045	144	2422
	1513	5520	79	2501
	1515	5485	63	2564
	1517	5485	46	2610
	1519	6130	36	2646
Altura de la carga: 0.95 m	1521	6140	27	2673
	1523	6150	17	2690
	1525	6150	12	2702

Fuente: DENNY, Tim. Field distillation for herbaceous oils. Pág. 52.

El tiempo básico, **t** y el parámetro de incremento de aceite, **s**, fueron deducidos comparando los tiempos de extracción de dos pruebas **T_{e1}** y **T_{e2}** con diferentes alturas **H₁** y **H₂**:

³ En el Anexo A se explica con detalle la deducción del tiempo de extracción en función de **t** y **s**.

$$\frac{T_{e1}}{T_{e2}} = \sqrt{\frac{1+(H_1/s)}{1+(H_2/s)}} \quad (5.2)$$

$$t = T_{e1} \cdot \sqrt{\frac{s}{s+H_1}} \quad (5.3)$$

5.2 ADAPTACIÓN DEL TIEMPO DE EXTRACCIÓN

Partiendo de un proceso de referencia (prueba estándar) se puede adaptar los parámetros que definen el tiempo de extracción a las condiciones de diseño. Estos parámetros se modifican cuando la densidad de referencia es diferente a la densidad de empaque del material vegetal que se quiere procesar.

1) Para el parámetro **t** la corrección se hace dividiendo el tiempo básico que obtuvo Denny por **F_{cd}** (factor de corrección por densidad). **F_{cd}** depende de la masa de material vegetal (**M_h**), de la densidad de empaque utilizada en las pruebas (**ρ_l** para la lavanda y **ρ_m** para la menta), de la altura de la carga (**H**) y del área transversal a la dirección del flujo de vapor (**A**). Para el caso de la lavanda **F_{cd}** se calcula como:

$$F_{cd} = \frac{(A - 0.00664 \cdot (\rho_l \cdot H \cdot A)^{2/3})}{(A - 0.00664 \cdot (M_h)^{2/3})} \quad (5.4)$$

2) La altura **H** se modifica multiplicando su valor por la relación de densidades como:

$$H_v = H \cdot \frac{\rho}{\rho_l} \quad (5.5)$$

Donde H_v es la altura virtual, es decir, la altura de la carga a la densidad de referencia. ρ es la densidad empaque de diseño.

3) El parámetro de *incremento* de aceite esencial, s , se modifica cuando el rendimiento por kilo, R_d [ml de aceite producido / kg de material vegetal] de diseño es diferente del rendimiento por kilo obtenido en las pruebas de Denny, R . El valor de s varía inversamente con el cambio en el rendimiento, es decir:

$$s_c = s \cdot \frac{R}{R_d} \quad (5.6)$$

Donde s_c es el parámetro corregido y s es el parámetro de referencia.

Los valores de s para la lavanda y la menta se toman como los valores reales sin hacer ninguna modificación, ya que el rendimiento por kilo R depende básicamente de las condiciones de suelo y clima donde se cultive la herbácea.

El tiempo de extracción, T_e a las condiciones de diseño se calcula entonces como:

$$T_e = t_c \cdot \sqrt{1 + \frac{H_v}{s}} \quad (5.7)$$

$$\text{Donde } t_c = \frac{t}{F_{cd}} \quad (5.8)$$

5.3 PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL FLUJO MÁSSICO DE VAPOR

Cuando se tiene una masa dada de material vegetal de una herbácea particular, la cantidad en kg de vapor requerido para la extracción de sus aceites esenciales es dependiente de dicha masa.

El flujo de vapor, \dot{m}_v que se debe suministrar al material vegetal queda entonces determinado por el tiempo de proceso (en este caso 1 hora) en que se planea hacer la operación de extracción ya que

$$\dot{m}_v = \frac{M_v}{T_p} \quad (5.9)$$

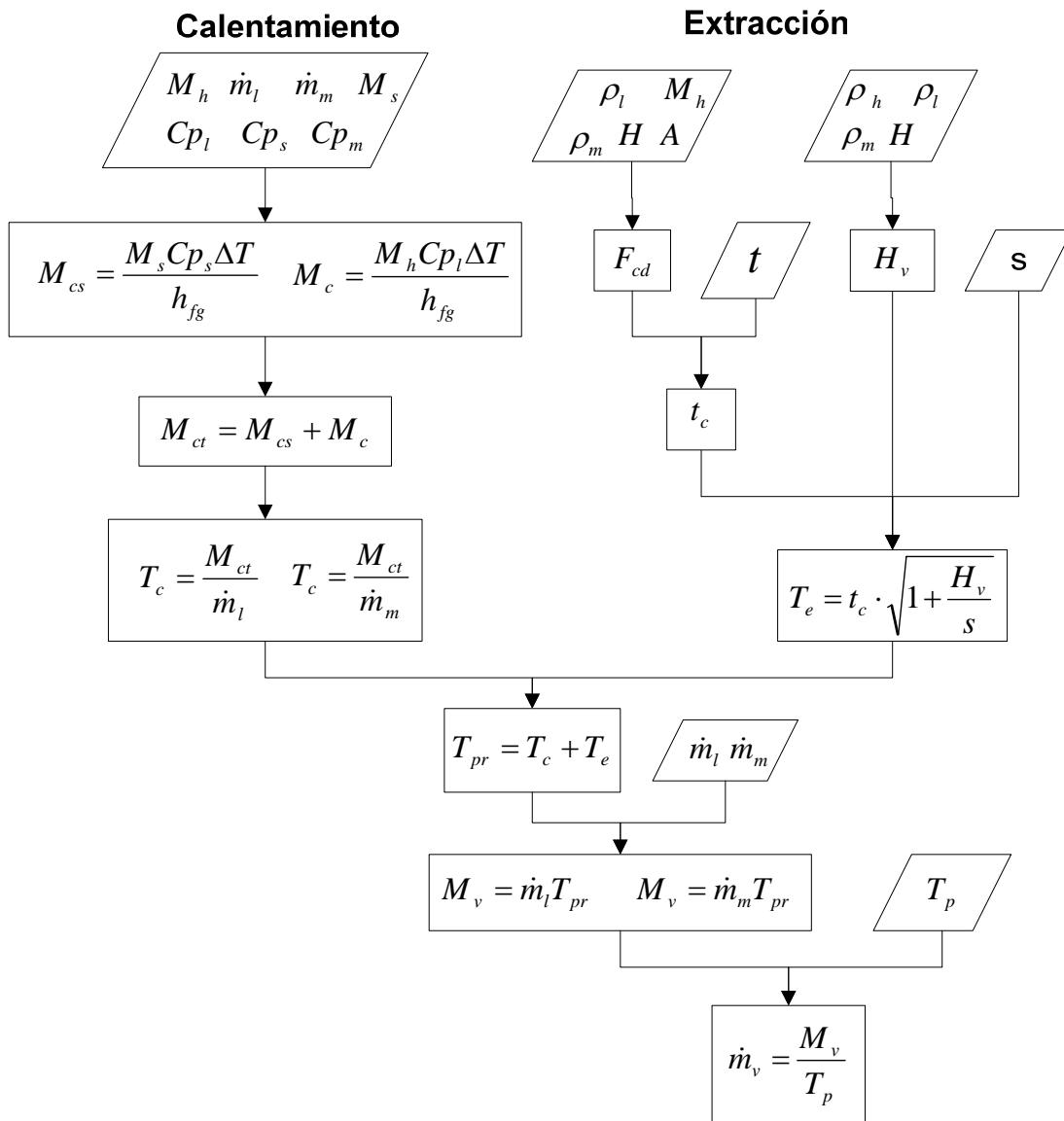
M_v es la cantidad de vapor requerido

T_p es el tiempo de proceso.

El tiempo de proceso (T_p) es la suma del tiempo de calentamiento (T_c) y el tiempo de extracción (T_e). El tiempo de calentamiento es el tiempo necesario para llevar el material vegetal y su recipiente contenedor a la temperatura de ebullición de los aceites esenciales que dicho material contenga. Este tiempo depende de la masa de material vegetal (M_h), de la masa del cartucho (M_s), del flujo másico de vapor (\dot{m}_l para la lavanda y \dot{m}_m para la menta), del poder calorífico de los aceites esenciales de la herbácea (C_{p_l} para la lavanda y C_{p_m} para la menta) y del poder calorífico del material de que esta hecho el cartucho (C_{p_s}). En la siguiente sección se explica con detalle el procedimiento del cálculo del tiempo de calentamiento (T_c).

El tiempo de proceso que se calcula es un tiempo de referencia, T_{pr} que junto con el flujo másico de vapor que el ingeniero Tim Denny utilizó en sus pruebas (\dot{m}_l y \dot{m}_m) permite calcular la masa de vapor requerida (M_v) para procesar lavanda o menta.

Figura 15. Diagrama para determinar el flujo másico de vapor



Como la masa de vapor requerida (M_v) es constante ya que siempre se va a procesar la misma cantidad de material vegetal (M_h), de la ecuación 5.9 con un tiempo de proceso, $T_p = 60$ minutos se calcula el flujo másico de vapor (\dot{m}_v) que se requiere para extraer los aceites esenciales de lavanda o menta. El flujo másico que sea mayor entre estas dos herbáceas es el requerido para llevar el proceso de extracción a las condiciones de diseño. Este flujo másico obtenido permitirá seleccionar la caldera, diseñar el condensador y dimensionar el recipiente separador.

5.4 DATOS DEL PROCESO

Comprenden tanto las propiedades de la herbácea como las del material del cual está construido el cartucho, estos se clasifican en datos de diseño y datos tomados de las pruebas realizadas por Denny. A continuación se hace un listado de cada uno de los datos que se utilizan junto con su nomenclatura.

Datos de Diseño:

- Masa de la herbácea a procesar: M_h [kg]
- Densidad de empacado de la herbácea: ρ [kg/m³]
- Densidad del material del cartucho (acero SAE 304): [kg/m³]
- Calor específico del acero: C_p [kJ/kg*K]
- Calor latente del vapor: h_{fg} [kJ/kg]
- Diferencia entre la temperatura ambiente y la del vapor: ΔT [°C]
- Tiempo de cambio del cartucho: t_c [min]
- Tiempo de proceso: T_p [min]
- Diámetro interno del cartucho: D_i [m]

- Espesor del cartucho: e [m]
- Masa del fondo y accesorios del cartucho: M_r [kg]

Datos de las pruebas realizadas por Denny:

- Calor específico de la lavanda y menta: C_{p_l} y C_{p_m} [kJ/kg*K]
- Flujo másico de vapor de referencia: \dot{m}_l y \dot{m}_m [kg./min]
- Densidades de empacado de menta y lavanda: ρ_l y ρ_m [kg/m³]
- Tiempo básico de la lavanda y menta: t_l y t_m [min]
- Parámetro de incremento de la lavanda y la menta: s_l y s_m [m]

Tabla 5. Datos del proceso de destilación.

Dato	Valor	Observación
M_h	300	Masa de la herbácea a procesar
ρ	200	Densidad de diseño
ρ_l	308	Densidad de la lavanda
ρ_m	276	Densidad de la menta
C_{p_l}	3.347	Calor Específico de la lavanda
C_{p_m}	2.929	Calor Específico de la menta
ρ_s	7900	Densidad del acero SAE 304
C_{p_s}	0.451	Calor específico del acero SAE 304
h_{fg}	2257	Calor latente de vaporización
ΔT	80	Se toma Temperatura Ambiente de 20 °C
T_p	60	Es el tiempo de proceso
D_i	1.143	45''. Es el mismo de las pruebas de Tim Denny
e	0.0025	Calculado para los requerimientos de Presión
\dot{m}_l	3.17	Flujo másico de vapor para la lavanda
\dot{m}_m	3	Flujo másico de vapor para la menta
t_l	9.719	Tiempo básico de la lavanda
t_m	12.09	Tiempo básico de la menta
s_l	0.4095	Parámetro de incremento de la lavanda
s_m	0.468	Parámetro de incremento de la menta
M_r	48.2	Ver detallado en el diseño mecánico del cartucho

Fuente: Autores del proyecto

5.5 TIEMPO DE CALENTAMIENTO

El tiempo de calentamiento es el necesario para incrementar la temperatura de la herbácea y el recipiente contenedor (cartucho) hasta la temperatura de trabajo (saturación del vapor).

Aquí se realiza un balance de energía para establecer la masa de vapor requerida para calentar la herbácea y el cartucho, con la masa de vapor calculada y el flujo másico de referencia se calcula el tiempo de calentamiento. Este tiempo se determina de la siguiente manera:

- 1) Se calcula el área de la sección transversal del cartucho [m²]:

$$A = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \quad (5.10)$$

- 2) Se calcula la altura de la carga [m]:

$$H = \frac{M_h}{\rho \cdot A} \quad (5.11)$$

- 3) Se calcula el diámetro externo del cartucho [m]:

$$D_e = D_i + 2 \cdot e \quad (5.12)$$

- 4) Se calcula el volumen de la pared del cartucho [m³]:

$$V_w = \frac{\pi \cdot (D_e^2 + D_i^2) \cdot H}{4} \quad (5.13)$$

- 5) Se calcula la masa de la pared del cartucho [kg]:

$$M_w = \rho_s \cdot V_w \quad (4.14)$$

6) Se calcula la masa total del cartucho [kg]:

$$M_s = M_w + M_r \quad (4.15)$$

7) Se hace un balance de energía para calcular la masa de vapor requerida para calentar el cartucho [kg]:

$$M_{cs} = \frac{M_s \cdot Cp_s \cdot \Delta T}{h_{fg}} \quad (5.16)$$

8) Se hace un balance de energía para calcular la masa de vapor requerida para calentar la herbácea un ΔT :

a) Para la lavanda:

$$M_c = \frac{M_h \cdot Cp_l \cdot \Delta T}{h_{fg}} \quad (5.17)$$

b) Para la menta:

$$M_c = \frac{M_h \cdot Cp_m \cdot \Delta T}{h_{fg}} \quad (5.18)$$

9) Se calcula la masa de vapor total de calentamiento [kg]:

$$M_{ct} = M_{cs} + M_c \quad (\text{lavanda y menta})$$

10) Se calcula el tiempo de calentamiento, T_c [min], con el valor de \dot{m}_l y

\dot{m}_m :

$$T_c = M_{ct} / \dot{m}_l \quad \text{Para la lavanda} \quad (5.19)$$

$$T_c = M_{ct} / \dot{m}_m \quad \text{Para la menta} \quad (5.20)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Tiempo de calentamiento

	A	H	H diseño	D _e	V _w	M _w	M _s	M _{cs}	M _c	M _{ct}	T _c
Lavanda	1.026	1.46	1.5	1.148	0.0135	107	155	2.5	35.6	38.1	12
Menta									31.2	33.6	11.2

Fuente: Autores del proyecto

5.6 TIEMPO DE EXTRACCIÓN

Es el periodo después del calentamiento hasta el momento en el cual termina la destilación. Su calculo depende si la herbácea es muy absorbente (tiene una gran capacidad de absorber agua) o ligeramente absorbente.

5.6.1 Tiempo de extracción para herbáceas muy absorbentes. En el caso del aceite superficial de herbácea muy absorbente el tiempo de extracción depende de dos parámetros que son el **tiempo básico** (t) y el **parámetro de incremento** (s) definidos en el anexo A.

Los valores obtenidos por Tim Denny en las pruebas realizadas con lavanda para estos dos parámetros se toman como referencia para los cálculos del tiempo de extracción. Los pasos a seguir son:

- 1) Calcular en factor de corrección de densidad, F_{cd} , debido a que la densidad de empaque de la carga de prueba es diferente a la densidad de diseño. Este factor se calcula con la ecuación 5.4
- 2) Calcular el tiempo básico corregido, t_c , de la ecuación 5.8 con base a un tiempo básico $t = 9.719$ minutos calculado por Denny:

3) Calcular la altura virtual de la carga, H_v [m] con base a la relación de densidades. Esta altura virtual sería la altura del material vegetal empacado como si estuviera a la densidad de prueba. Se calcula como:

$$H_v = H \cdot \frac{\rho}{\rho_t} \quad (5.21)$$

4) Calcular el tiempo de extracción, T [min] en base al flujo másico de vapor utilizado en la prueba. Este tiempo es un tiempo virtual, pero sirve para comparar como se verá más adelante en el cálculo del vapor requerido.

$$T_e = t_c \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{H_v}{s}\right)} \quad (5.22)$$

Donde el parámetro de incremento, s , es igual a 0.4095 m.

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Tiempo de extracción para herbácea muy absorbente

F_{cd}	t_c	H_v	T_e
0.864	11.25	0.974	20.7

Fuente: Autores del proyecto

5.6.2 Tiempo de extracción para herbáceas ligeramente absorbentes. Para aceites superficiales de herbáceas ligeramente absorbentes como se puede ver en el anexo A, el tiempo de extracción para la menta es inversamente

proporcional al flujo de vapor, pero no hay un factor de corrección para la densidad de empaque debido a que las pruebas realizadas por Denny fueron hechas siempre a una densidad cercana de 276 kg/m³ para la menta. Por eso, para tener en cuenta el efecto de la densidad, Tim Denny adoptó los parámetros de la lavanda para la menta usando el modelo de tiempo de extracción para herbácea muy absorbente. Esta aproximación es justificable debido a que la menta durante la segunda etapa de la extracción se comporta como la lavanda⁴. La ecuación para el cálculo del factor de corrección cambia en cuanto al valor de una constante por lo que la ecuación quedaría como:

$$F_{cd} = \frac{(A - 0.01176 \cdot (\rho_m \cdot H \cdot A)^{2/3})}{(A - 0.01176 \cdot (M_h)^{2/3})} \quad (5.23)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 8 tomando un tiempo básico, $t = 12.09$ min y un parámetro de incremento del área de aceite, $s = 0.468$ m.

Tabla 8. Tiempo de extracción herbácea ligeramente absorbente

F_{cd}	t_c	H_v	T_e
0.747	16.18	1.059	29.24

Fuente: Autores del proyecto

5.7 FLUJO MÁSIKO NECESARIO DE LA CALDERA

Teniendo en cuenta los tiempos de extracción y calentamiento calculados anteriormente para cada una de las herbáceas y los flujos de vapor utilizados

⁴ Ver Figura A.2, Anexo A.

en las pruebas, se procede a calcular la masa de vapor requerida y finalmente el flujo másico para las condiciones de diseño como sigue:

- 1) Se calcula el tiempo de proceso, T_{pr} [min] con base al flujo másico de referencia, aunque no es el tiempo de proceso real me permite determinar la masa de vapor como se verá en el siguiente paso.

$$T_{pr} = T_c + T_e \quad (5.24)$$

- 2) Se calcula la masa de vapor requerido, M_v [kg] a partir del flujo másico de vapor de referencia, \dot{m}_l y \dot{m}_m [kg/min] y del tiempo de proceso, T_{pr} :

$$M_v = \dot{m}_l \times T_{pr} \text{ para la lavanda} \quad (5.25)$$

$$M_v = \dot{m}_m \times T_{pr} \text{ para la menta} \quad (5.26)$$

- 3) Se calcula el flujo másico requerido, \dot{m}_v [kg/h], con base a la masa de vapor calculada en el paso 2 y utilizando el tiempo de proceso real, T_p , que es de 60 minutos.

$$\dot{m}_v = \frac{M_v}{T_p} \cdot 60 \quad (5.27)$$

- 4) Se hace una corrección del flujo másico debido a que la caldera tiene una eficiencia. Tomando para la eficiencia de la caldera un valor de 90% tenemos que el flujo másico requerido de la caldera, \dot{m}_c [kg/h] es:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_v}{0.9} \quad (5.28)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Flujo másico requerido de la caldera

	T_{pr}	M_v	\dot{m}_v	\dot{m}_c
Lavanda	32.7	104	104	115.6
Menta	40.45	121.4	121.4	135

Fuente: Autores del proyecto

5.8 POTENCIA DE LA CALDERA

La capacidad se expresa en Caballos Caldera (BHP) donde la capacidad de 1 BHP produce 15.65 kg/hr de vapor saturado a 100° C, utilizando agua de alimentación a la misma temperatura, es decir:

$$BHP = \frac{\dot{m}_c}{15.65} \quad (5.29)$$

Para extraer el aceite de lavanda se necesitan 7.4 BHP, mientras que para extraer el aceite de menta se necesitan 8.6 BHP. Comercialmente se fabrican calderas de 10 BHP, luego una caldera de esta potencia sería la más adecuada.

Una caldera de 10 BHP con una eficiencia del 90% me entregaría 140.85 kg/hr y se requieren 121.4 kg/hr de vapor para extraer el aceite de menta en 60 minutos. Este margen de seguridad permite manejar la incertidumbre debido al hecho que se desconoce el flujo másico de vapor para las tres especies vegetales que se pretenden procesar.

Pruebas a pequeña escala no permiten calcular los parámetros t y s pues el aceite extraído es muy poco⁵. Se requiere por tanto llevar a cabo pruebas con el destilador cuando entre en operación.

⁵ En pruebas hechas con limonaria, usando el destilador de cobre del Cenivam, para una carga de 3 kg, el rendimiento fue de 3.33 ml/kg, es decir sólo se logró extraer 10 ml en un proceso que tardó 2 horas. Un porcentaje de los aceites esenciales de la herbácea pudieron haber salido con el agua condensada, pues el proceso de destilación fue agua-vapor y este requiere que se le haga cohobación.

6 DISEÑO MECÁNICO DEL DESTILADOR

6.1 CARTUCHO

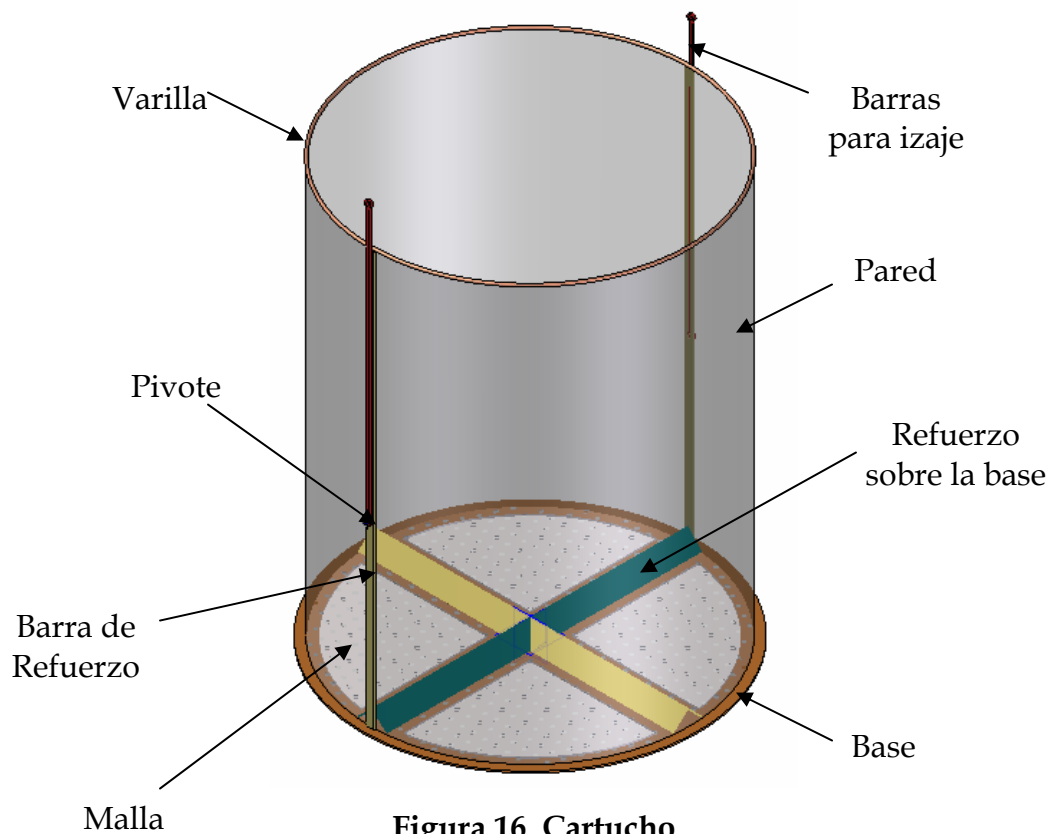


Figura 16. Cartucho

Este elemento sirve para confinar el material vegetal durante el proceso de extracción de los aceites esenciales. El sistema de cilindros móviles o cartuchos permiten iniciar un nuevo ciclo de extracción en un período corto de tiempo. Estos cartuchos además son de fácil manipulación ya que tienen barras para izamiento, que son pivotadas, y que permiten sacar el material ya procesado mientras está suspendido como se puede ver en la figura 16. Otra ventaja es no permitir asentamiento de material vegetal en el fondo del

destilador que pueda provocar obstrucción en el distribuidor de vapor, debido a que el material vegetal esta contenido dentro del cartucho.

Los elementos que constituyen el cartucho son:

- Pared
- Base
- Barras de izaje
- Barras de refuerzo
- Malla
- Pivote del cartucho

6.1.1 Pared. El espesor del cartucho es el primer cálculo que se debe hacer, pues de éste dependerá su geometría y su peso. Este elemento sólo tiene cargas estáticas: el peso del material vegetal y su propio peso. Para determinar el espesor de la pared sin embargo se asume que el cartucho es un recipiente sometido a presión, en este caso el vapor proveniente de la caldera.

De acuerdo a la norma ASME el recipiente debe soportar por los menos 20 psi por encima de la presión de operación. Este cálculo se hizo a partir de la ecuación de recipientes sometidos a presión interna:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} \quad (6.1)$$

Donde:

P = 152 kPa (presión de diseño, 22 psi)

R = 571.5 mm (Radio interno, 22.5")

S = 106924 kPa (Esfuerzo permisible para el acero SAE 304)

$E = 0.7$ (eficiencia de la junta)

Luego $t = 1.162$ mm. Como valor estándar se toma una lámina de 2.5 mm (calibre 12)

En el paso 4 de la sección 5.5 se calculó el volumen de la pared del cartucho, $V_w = 0.0135$ m³ y este valor se toma como el volumen efectivo. En la siguiente sección se tiene en cuenta además de la pared otros elementos que componen el cartucho.

6.1.2 Base. El espesor de la base del cartucho se determinó mediante análisis de esfuerzos usando CAE (Ingeniería Asistida por Computador) ya que el diámetro de la base queda determinado por el diámetro interno del destilador. Como se verá más adelante el diámetro del destilador es de 48" (1219.2 mm) por lo que el diámetro de la base del cartucho se tomó de 1210 mm, con cuatro agujeros en forma de sección circular como se puede ver en la Figura 16.

El proceso para determinar el espesor de la base del cartucho fue iterativo, es decir, se asumió un espesor de placa y luego se calculó con la ayuda de un programa CAE (Anexo B), el factor de seguridad. Como el espesor de 6 mm no fue suficiente para soportar el material vegetal se optó por usar un refuerzo de dos perfiles en ángulo de 76.2X76.2X5 mm cuya longitud es de 1143 mm, igual al diámetro interno del cartucho.

El volumen de la base sin los agujeros es:

$$V_b = \frac{\pi}{4} \cdot (1.210)^2 \cdot 0.006 \quad (6.2)$$

$$V_b = 6.899 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

El volumen de los agujeros, con un radio de 458 mm es:

$$V_a = \pi \cdot (0.458)^2 \cdot 0.006 \quad (6.3)$$

$$V_a = 3.954 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

El volumen de los dos perfiles en ángulo que sirven como refuerzo para la base del cartucho se calcula como:

$$V_r = [(2 \cdot 0.076 - 0.005) \cdot 0.005] \cdot 2.286 \quad (6.4)$$

$$V_r = 1.68 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

El volumen neto de la base, V_{nb} :

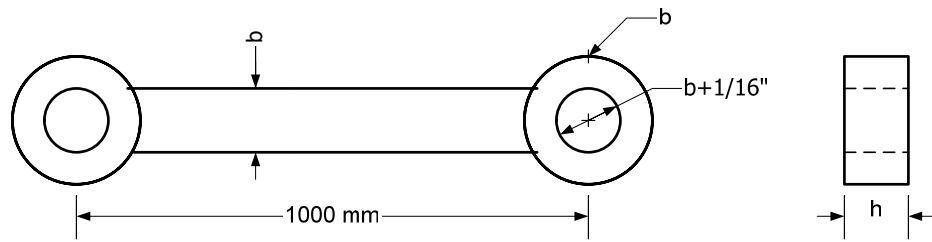
$$V_{nb} = V_b + V_r - V_a \quad (6.5)$$

$$V_{nb} = 4.625 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

6.1.3 Malla. Se utiliza una malla con una densidad de área de 20 agujeros por pulgada cuadrada. Esta malla tiene un diámetro de 1143 mm y 1 mm de espesor y está ubicada entre el refuerzo de la base (perfil en ángulo invertido) y la cara anterior de ésta.

6.1.4 Barras de izaje. Para el dimensionamiento de las barras de izaje se tiene en cuenta el peso de la pared, de la base, de la malla (cuyo peso es de aproximadamente 7 kg), y de una varilla de 10 mm de diámetro que se suelda sobre el borde superior del cartucho como protección contra choques.

Figura 17. Barra de izamiento para el cartucho



El volumen de la varilla, V_v es

$$V_v = \frac{\pi}{4} \cdot 0.01^2 \cdot (\pi \cdot 1144.5) \quad (6.6)$$

$$V_v = 2.834 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

El peso del cartucho, P_c , con una densidad ρ_s para el acero de 7900 kg/m^3 es entonces:

$$P_c = (V_w + V_{nb} + V_v) \cdot \rho_s + 7 \quad (6.7)$$

$$P_c = 152.42 \text{ kg.}$$

La carga que actúa sobre cada barra de izaje es el peso del cartucho más los 300 kg de material vegetal. En este caso se toma una carga sobre cada barra de 500 kg y el área mínima que debe tener cada barra se calcula como:

$$A_{\min} = N_s \cdot \frac{F_b}{S_y} \quad (6.8)$$

$N_s = 2$ Factor de de seguridad

$F_b = 4905 \text{ N}$ Fuerza sobre cada barra, igual al peso del cartucho con material

$S_y = 106 \text{ MPa}$ Esfuerzo admisible (Acero SA-479 Grado 304)

Luego $A_{\min} = 92.547 \text{ mm}^2$. Se toma un valor de 93 mm^2 . Esta área es igual a $b \cdot h$ donde b se toma de 12.7 mm ($1/2''$). El valor para h es:

$$h = \frac{93}{12.7} = 7.323 \text{ mm. Se toma un valor de } 8 \text{ mm.}$$

Con un pasador del mismo material se calcula el *factor de seguridad para el pasador*, N_p como

$$N_p = \frac{(\pi \cdot b^2 \cdot S_y)}{2 \cdot F_b} \quad (6.9)$$

$$N_p = 5.5$$

6.1.5 Barras de refuerzo. Como el cartucho es pivotado, se le adiciona dos barras laterales para que sirvan de apoyo a las barras de izaje. Se toma un área de $30 \times 6 \text{ mm}$ con hueco para el pasador de $1/2'' + 1/16''$ por tolerancia, es decir 14.3 mm . Es área sometida a tracción: $A_t = (30 - 14.3) \times 6 = 94.2 \text{ mm}^2$

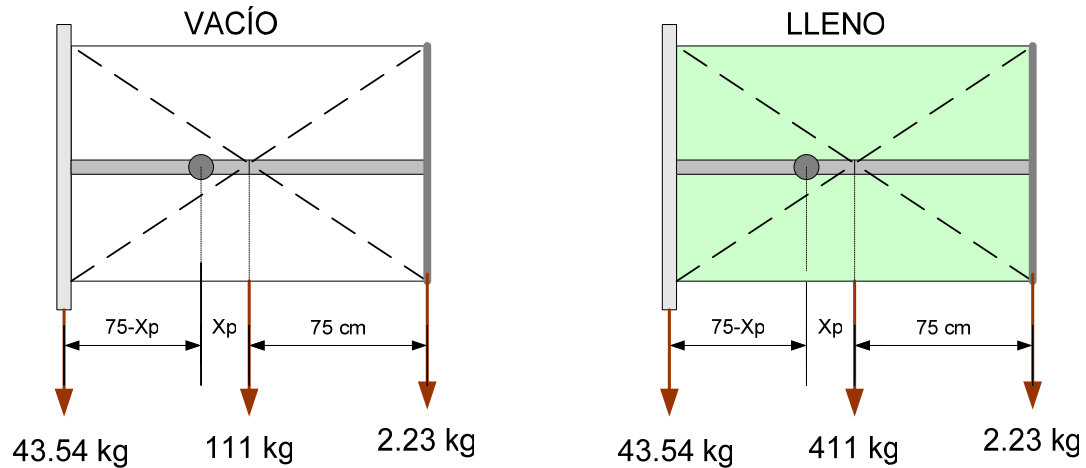
El factor de seguridad para las barras es entonces

$$N_b = \frac{A_t \cdot S_y}{F_b} \quad (6.10)$$

$$N_b = 2.036$$

6.1.6 Pivote. Se calcula el punto de pivote del cartucho. Este punto está un valor X_p [m] de la distancia media del cartucho en la posición horizontal. El cartucho debe tender a la posición vertical cuando esté vacío y debe auto inclinarse cuando este cargado con el material vegetal. En la figura 18 se muestra el cartucho cuando está en posición horizontal y las cargas que influyen en la determinación del cálculo de X_p .

Figura 18. Pivote del cartucho



Haciendo sumatoria de momentos igual a cero, cuando el cartucho está vacío

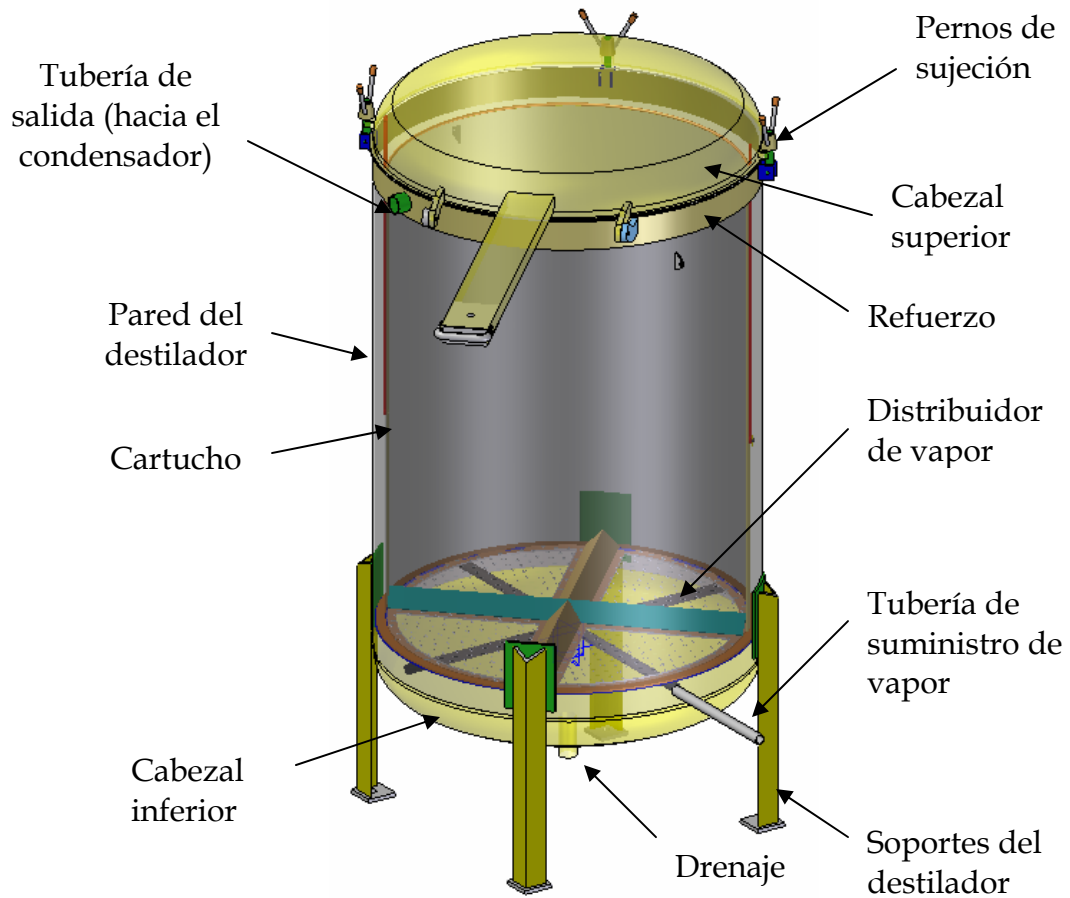
tenemos que el valor de $X_p = \frac{(43.54 - 2.23) \times 75}{43.54 + 111 + 2.23} = 19.8 \text{ cm}$

Se toma un valor $X_p = 10 \text{ cm}$ para que cuando esté vacío y en la posición horizontal tienda a levantarse y facilite su movilización. Además cuando el cartucho esté lleno de material vegetal, se dispone de un momento en sentido horario para facilitar la descarga de material que ya ha sido procesado.

6.2 PARED DEL DESTILADOR

El destilador se diseña como un recipiente a presión (aunque en realidad la presión de operación es la presión atmosférica como en el caso del cartucho) que se mantiene fijo y que contiene al cartucho. Este destilador tiene el suministro de vapor en la parte inferior que se hace mediante un distribuidor longitudinal en forma de cruz como se puede ver en la Figura 19. Las condiciones de temperatura y presión son las mismas a las que se encuentra el cartucho.

Figura 19. Destilador diseñado



Se determina primero el espesor mínimo de pared requerido, pues de éste dependerá su geometría y su peso. Este cálculo se hizo a partir de la ecuación 6.1 donde:

$P = 152 \text{ kPa}$ (presión de diseño, 1.5 Atm)

$R = 609.6 \text{ mm}$ (Radio interno, 24")

$S = 106924 \text{ kPa}$ (Esfuerzo permisible para el acero SAE 304)

$E = 0.7$ (eficiencia de la junta)

Luego $t = 1.239 \text{ mm}$. Como valor estándar se toma una lámina de 2.5 mm (calibre 12)

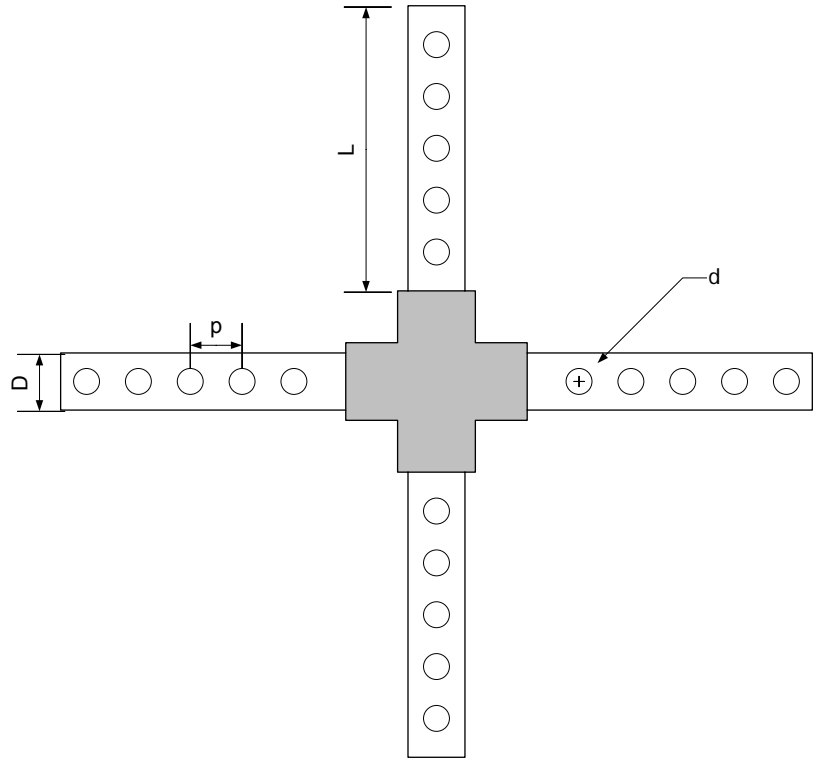
La altura del destilador depende de la altura del cartucho, del distribuidor de vapor y del diámetro de la tubería que va del destilador al condensador. En las siguientes secciones se muestra el dimensionamiento de estos elementos junto con los cabezales (superior e inferior), el sistema de cierre rápido seleccionado, el brazo para el levantamiento del cabezal superior, el soporte para todo el equipo y los izajes para su levantamiento.

6.3 DISTRIBUIDOR DE VAPOR

El dimensionamiento del distribuidor de vapor se hace mediante el siguiente procedimiento:

- Cálculo del diámetro
- Cálculo del número mínimo de agujeros.
- Paso entre agujeros.

Figura 20. Distribuidor de vapor



6.3.1 Cálculo del diámetro. El diámetro se calcula a partir de la siguiente ecuación, según recomendaciones de Crane [7]:

$$d = \sqrt{\frac{21220 \cdot \dot{m}_v \cdot \bar{V}}{v}} \quad (6.11)$$

$\dot{m}_v = 135$ [kg/h] Flujo másico de vapor

$\bar{V} = 1.145$ [m³/kg] Volumen específico a 1.52 bar. (22 psi)

$v = 3000$ [m/min] Velocidad del vapor, máxima recomendada

Luego $d = 33.1$ mm. Estandarizando se tiene que para un diámetro nominal de 1.5", cédula 40, el diámetro interno es de 40.894 mm y el diámetro externo es de 48.26 mm.

6.3.2 Cálculo del número mínimo de agujeros. Este se hace de acuerdo a la tubería de alimentación de vapor, lo que se busca es que el área total de las perforaciones por donde va a salir el vapor sea equivalente al área de la tubería. Esta condición se expresa en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{D^2}{d^2} \quad (6.12)$$

D = 26.645 mm. Diámetro interno de la tubería.

d = 4.7625 mm. Diámetro de la perforación.

N = 74

6.3.3 Cálculo del paso entre agujeros (p). Se hace a partir del número de perforaciones por tramo, N_t y la longitud activa de un tramo de tubería, L [mm].

$$N_t = N/4 \quad (6.13)$$

N = 19

Con una longitud activa por tramo es de 460 mm se calcula **p** como

$$p = \frac{L}{N_t + 1} \quad (6.14)$$

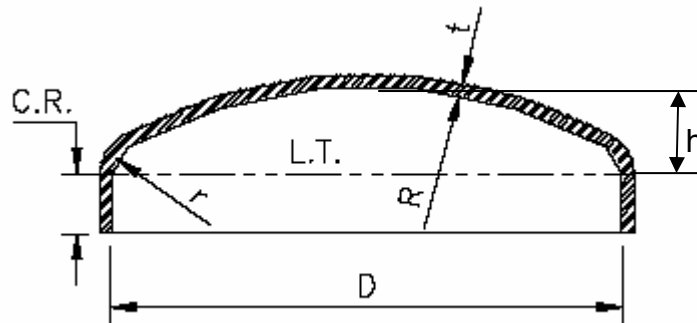
$p = 24$ mm por lo que $L = 480$ mm (valor corregido)

6.4 CABEZAL INFERIOR

El tipo de cabezal seleccionado es toroidal por ser una configuración comercial y ampliamente utilizada. En la figura 21 se puede ver las variables que influyen en el dimensionamiento del cabezal o tapa. La tapa inferior va soldada al cuerpo del destilador, mientras que la superior se puede remover

fácilmente para facilitar el cambio de cartucho cuando un proceso de extracción se ha llevado a cabo.

Figura 21. Cabeza toroidal tipo ASME



El cálculo del espesor del cabezal depende de la relación entre r y R . Cuando $r/R = 0.1$:

$$t = \frac{1.54PR}{2SE - 0.2P} \quad (6.15)$$

$P = 152$ [kPa] Presión de diseño

$R = 1219.2$ [mm] Radio de curvatura mayor

$S = 106924$ kPa (Esfuerzo permisible para el acero SAE 304)

$E = 0.7$ Eficiencia de la junta

$D = R$ [mm] Diámetro interior

$r = 121.92$ [mm] Radio de curvatura menor

Luego $t = 2.22$ mm. Se estandariza a 3 mm.

Como $C.R. \geq 3.5t$ se toma $C.R. = 4*t$ (6.16)

$C.R. = 12$ mm

$De = D + 2*t$ (6.17)

$$De = 1225.2$$

$$h = 0.1935 \cdot De - 0.455 \cdot t \quad (6.18)$$

$$h = 235.71 \text{ mm}$$

6.5 CABEZAL SUPERIOR

En el cabezal superior tiene las mismas dimensiones que el cabezal inferior pues la presión de diseño se toma de 152 kPa. El diseño de este cabezal comprende además el sistema de cierre, sello, soportes para los pernos de sujeción, bisagra y brazo de levantamiento del cabezal.

6.5.1 Sistema de cierre. Para la tapa superior se optó por usar tornillos de apriete con tuercas tipo mariposa como se puede ver en la figura 22. Este sistema permite abrir y cerrar fácilmente la tapa. Como se pudo ver en la Figura 19 son tres tornillos de apriete con una bisagra.

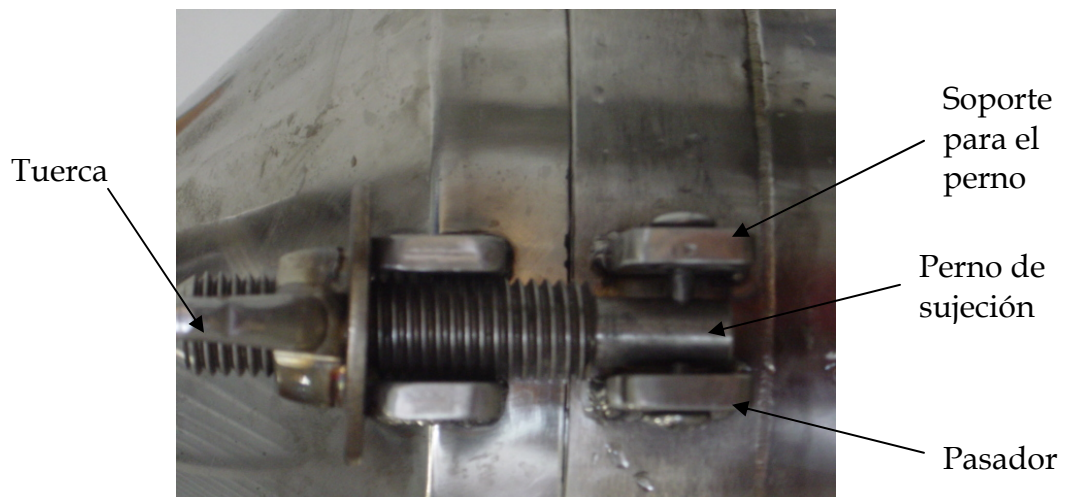


Figura 22. Sistema de cierre con tuerca tipo mariposa

6.5.2 Sello. Se usa un sello de Neopreno siliconado con un ancho físico, $N=13$ mm por lo que el diámetro medio del sello, $G = 1219.2 + 13 = 1232.2$ mm. El ancho básico se halla por la tabla 2.5.2 de la sección VIII del código ASME y depende de las condiciones de asentamiento. De esta tabla y tomando el caso (1a), se tiene que:

$$b_0 = \frac{N}{2} \quad (6.19)$$

$b_0 = 6.5$ mm. El ancho efectivo **b** es el que se introduce en la fórmula de fuerza de apriete y si $b_0 > 6.35$ mm (1/4") entonces

$$b = \frac{\sqrt{b_0}}{2} \quad (6.20)$$

$$b = 6.42 \text{ mm}$$

Para que un empaque funcione adecuadamente debe someterse a una presión de deformación que le permita adaptarse a la rugosidad de la cara donde esta apoyado el sello. En la condición de asentamiento, la carga de apriete máxima para el sello es:

$$Wm_2 = b\pi Gy \quad (6.21)$$

$y = 11.04$ Mpa. Esfuerzo permisible del sello.

Por lo que $Wm_2 = 274564$ N

Como la única carga que actúa sobre los pernos es la carga de apriete para el sello ya que en el cabezal superior no hay presión interna debido al vapor, se calcula el área de los pernos como:

$$A_b = \frac{Wm_2}{S_y} \quad (6.22)$$

$S_y = 172.4$ Mpa. SA-193 Grado B7. Esfuerzo permisible del perno a 20 °C.

$$A_b = 1593 \text{ mm}^2$$

Con esta área se determina el número de pernos a partir del área de raíz de un perno A_i . Para un perno de Diámetro Nominal de 1" (25.4 mm), se tiene que dicha área $A_i = 355.48 \text{ mm}^2$. El número de pernos es:

$$N_b = \frac{A_b}{A_i} \quad (6.23)$$

$$N_b = 4.5. \text{ Se toma } N_b = 5. \text{ Recalculando } A_b = 5 \times 355.48 = 1777.4$$

El ancho mínimo del sello se calcula a partir del área de los pernos A_b , de G y de la resistencia del perno y del sello. El ancho mínimo es entonces:

$$N_{\min} = \frac{A_b \cdot S_a}{2 \cdot \pi \cdot y \cdot G} \quad (6.24)$$

$N_{\min} = 3.3 \text{ mm}$. Luego el sello seleccionado cumple con los requerimientos.

6.5.3 Soporte para los pernos de sujeción. El soporte para los pernos de sujeción como se puede ver en la figura 23 es de forma rectangular, con agujero para el pasador. El soporte está sometido a un momento flector igual a $F_p \times L$.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

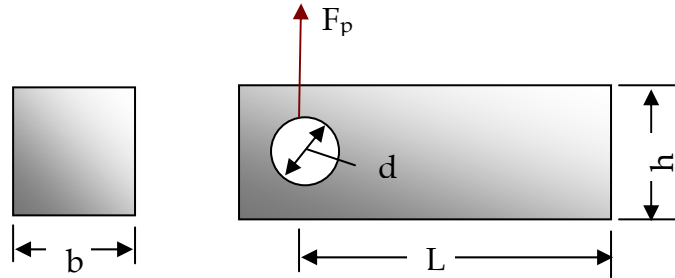
1) Se calcula la fuerza por cada perno, F_p [kN]:

$$F_p = \frac{Wm_2}{N_s} \quad (6.25)$$

$N_s = 5$. Número de pernos.

$F_p = 54.912$ kN

Figura 23. Soporte para los pernos de sujeción



2) Se calcula el momento flector, M [kN*mm]:

$$M = F_p \cdot L \quad (6.26)$$

$L = 19.05$ mm

$M = 1046.074$ kN*mm

3) Se calcula el espesor del soporte, b [mm]. Como hay dos soportes por cada perno, el momento que actúa sobre cada soporte es $M/2$ por lo que b es:

$$b = \frac{3 \cdot M}{h^2 S_y} \times 10^3 \quad (6.27)$$

$h = 50.8$ mm

$S_y = 130$ Mpa (SA-479 Grado 304)

$b = 9.35$ mm. Se estandariza a 10 mm.

4) Se calcula el diámetro del pasador, d [mm]:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{\pi \cdot S_y} \times 10^3} \quad (6.28)$$

$$A = \sqrt{R^2 - (R/2)^2} \quad (6.29)$$

$$B = \sqrt{R^2 - (R/2 + 1/16 + t)^2} \quad (6.30)$$

$$C = R + 2\frac{1}{2} - A \quad (6.31)$$

$$D = R + 2\frac{1}{2} - B \quad (6.32)$$

Se toma el diámetro del perno, d_p como $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) y el diámetro del agujero, d_a como $\frac{9}{16}$ " (14.3 mm) por lo que el valor de

$$r = 1.5 \cdot d_a \quad (6.33)$$

Tabla 10. Dimensiones de la bisagra

R	t	A	B	C	D	d_p	d_a	r
Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg	Plg
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
24.118	0.75	20.887	20.396	5.731	6.222	0.5	0.562	0.843
(612.6)	(19.05)	(530.53)	(518.06)	(145.57)	(158.04)	(12.7)	(14.3)	(21.4)

Fuente: Autores del proyecto

6.5.5 Brazo para el levantamiento. Con el fin de que el operario pueda abrir fácilmente el cabezal se usa un brazo (perfil \square) que sirve como palanca como se puede ver en la figura 25.

En la figura 26 se muestra las dimensiones del perfil que se construye a partir de lámina calibre 12 (de espesor 2.5 mm). Este perfil tiene en el borde un contrapeso de fundición gris que permite reducir la fuerza requerida por el operario para levantar el cabezal.

Figura 25. Cabezal superior del destilador

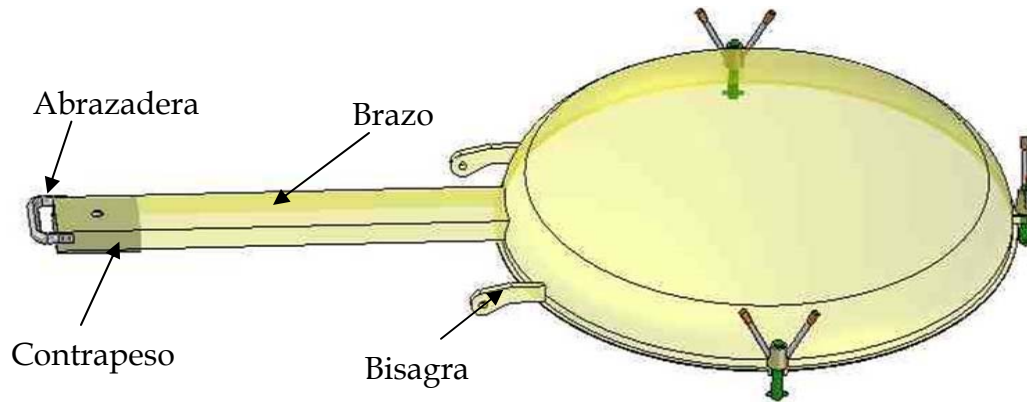
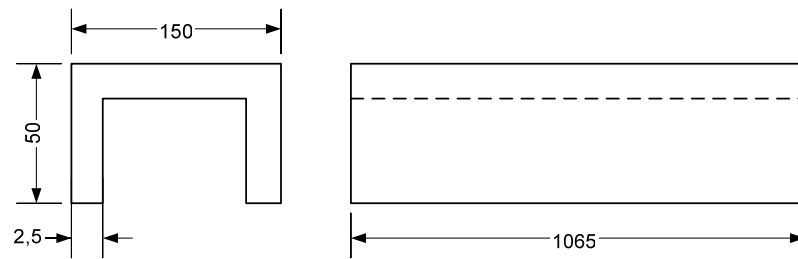
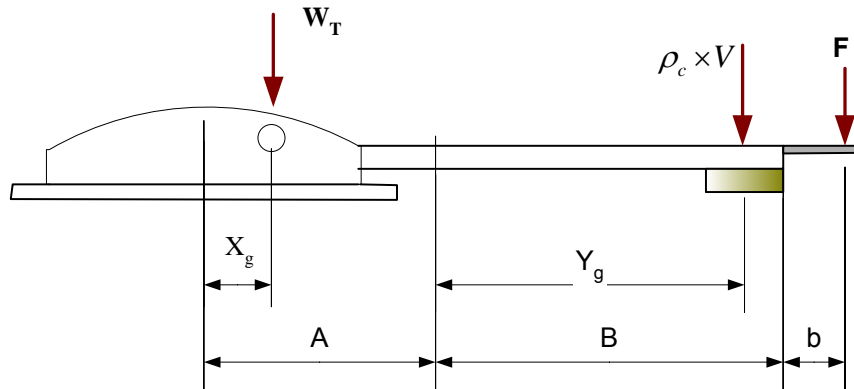


Figura 26. Brazo de la tapa superior



Haciendo sumatoria de momentos igual a cero en el pivote de la bisagra (agujero del pasador) se puede calcular el volumen del contrapeso, teniendo en cuenta las variables que se muestran en la figura 27.

Figura 27. Cargas sobre el cabezal superior del destilador



$$V = \frac{(W_T \cdot (A - X_g)) - F \cdot (B + b)}{\rho_c \cdot Y_g} \quad (6.34)$$

$W_T = 467.43$ N. Peso de la tapa más brazo (sin contrapeso)

$A = 676.1$ mm. Distancia del centro de la tapa al pivote.

$X_g = 179.46$ mm. Distancia del centro de la tapa al centro de gravedad.

$F = 98.1$ N. Fuerza del operario.

$B = 1000$ mm. Distancia del pivote hasta el final del brazo.

$b = 100$ mm. Distancia del final del brazo hasta el punto de carga del operario

$\rho_c = 0.07848$ N/cm³. Peso específico del contrapeso (fundición gris)

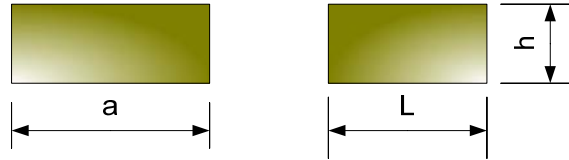
$Y_g = 850$ mm. Distancia del pivote al centro de gravedad del contrapeso.

Luego:

$$V = 1759 \text{ cm}^3$$

Con este volumen se dimensiona el contrapeso. Las dimensiones de este contrapeso se pueden ver en la figura 28.

Figura 28. Contrapeso



$$h = \frac{V}{a \cdot L} \quad (6.35)$$

$a = 30$ cm.

$L = 14.5$ cm.

$h = 4.3$ cm. Se toma $h = 4.5$ cm.

Ahora se comprueba que el perfil seleccionado pueda soportar la carga generada por el contrapeso. Como se puede ver en la figura 13 este contrapeso produce un momento flector M_f que se calcula como:

$$M_f = [(30 \times 14.5 \times 4.5) \times 0.07848] \times 91.5 = 14057 \text{ N-cm}$$

El Esfuerzo producido por este momento es igual a:

$$\sigma = \frac{M_f \cdot c}{I} \times 10^{-2} \quad (6.36)$$

$c = 4.03$ cm.

$I = 13.573$ cm⁴.

$\sigma = 41.74$ Mpa

El factor de seguridad del perfil, N , se calcula como:

$$N_s = \frac{S_y}{\sigma} \quad (6.37)$$

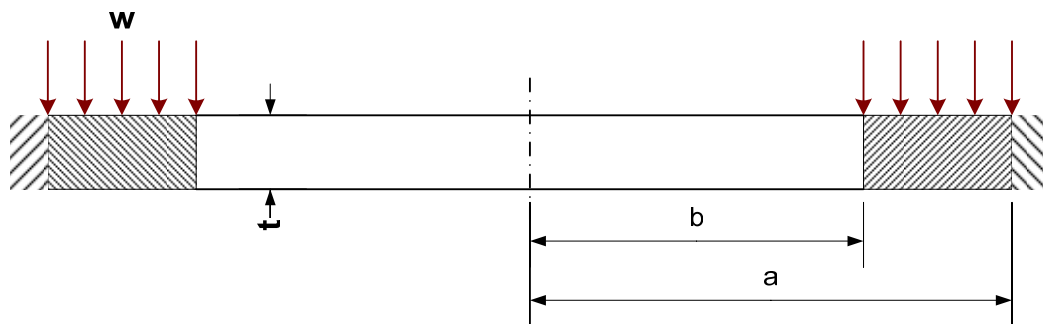
$S_y = 129.6 \text{ MPa}$ (SA-240 Grado 304 a 20°C)

$N_s = 3.1$

6.6 SOPORTE PARA EL CARTUCHO

El soporte consiste en un anillo circular de espesor t como se muestra en la figura 29 que está soldado a la pared interna del destilador. Sobre el borde externo del anillo se ejerce un momento M_r debido al peso del cartucho y del material vegetal.

Figura 29. Soporte para el cartucho



El momento [15] se calcula como:

$$M_r = w \cdot a^2 \cdot \left[k_1 - \left(\frac{k_2}{k_3} \right) \cdot k_4 \right] \quad (6.38)$$

Donde $w = \frac{W}{\pi \cdot (a^2 - b^2)}$ (6.39)

$$k_1 = \frac{1}{4} \cdot \left[1 - \left[\frac{(1-\mu)}{4} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^4 \right] - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \left[1 + (1+\mu) \cdot \text{Ln} \left(\frac{a}{b} \right) \right] \right] \quad (6.40)$$

$$k_2 = \left(\frac{1-\mu}{2} \right) \cdot \left[\left(\frac{a}{b} \right) - \left(\frac{b}{a} \right) \right] \quad (6.41)$$

$$k_3 = \frac{1}{2} \cdot \left[(1+\mu) \cdot \left(\frac{b}{a} \right) + (1-\mu) \cdot \left(\frac{a}{b} \right) \right] \quad (6.42)$$

$$k_4 = \frac{1}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^4 - 4 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \text{Ln} \left(\frac{a}{b} \right) \right] \quad (6.43)$$

W = 4905 N. Fuerza ejercida por el cartucho y el material vegetal.

a = 0.6092 m. Radio exterior del soporte (igual al radio interno del destilador)

b = 0.5696 m. Radio interior del soporte

μ = 0.3 Relación de Poisson

w = 32.98 kPa. Presión ejercida sobre el soporte.

M_r = 24.873 N*m

Con este momento se calcula el esfuerzo que se ejerce sobre el área anular del soporte tomando un espesor $t = 2.5$ mm (lámina calibre 12).

$$\sigma = \frac{6 \cdot M_r}{t^2} \quad (6.44)$$

$\sigma = 23.878$ MPa

Se comprueba si este espesor es suficiente calculando el factor de seguridad N_s usando la Ecuación 6.37 con $S_y = 106.9$ Mpa (SA-240 Grado 304 a 100°C) por lo que $N_s = 4.5$

6.7 SOPORTE PARA EL DESTILADOR

El soporte para todo el destilador consiste en cuatro perfiles como se muestra en la figura 30.

Estos fueron seleccionados a partir de las recomendaciones hechas por León [12]. El perfil seleccionado es de 3" x 3" x 3/8" donde la *longitud del cuerpo del recipiente* L , $L = 72"$, con lo que la *longitud del soporte* H , se toma como $H = 22"$. El material del perfil es Acero inoxidable SAE 304 así como el material de la placa de refuerzo.

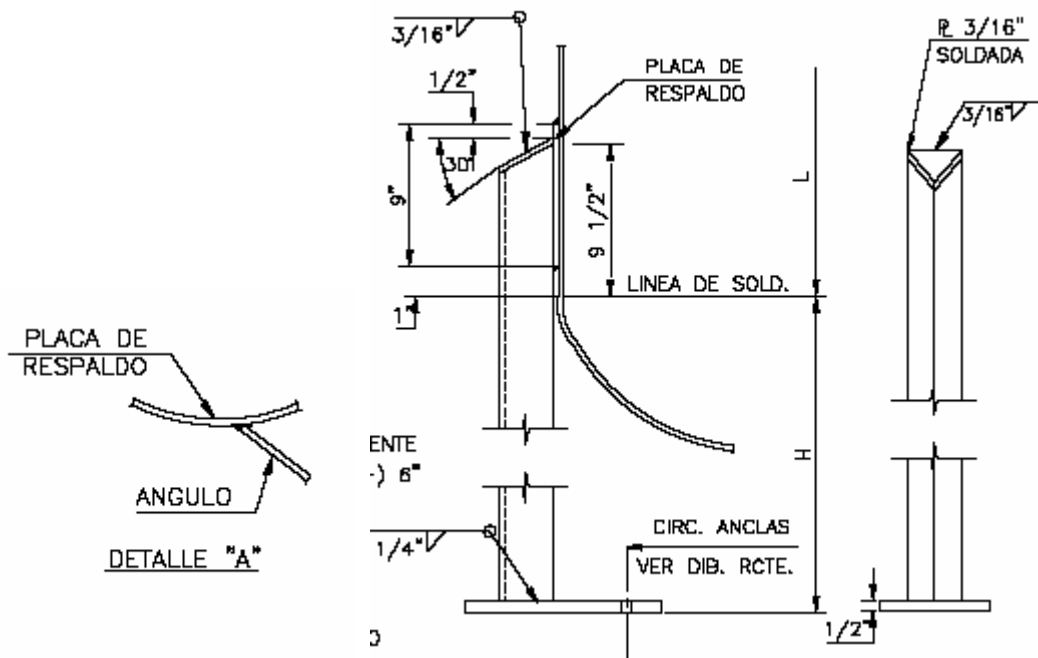
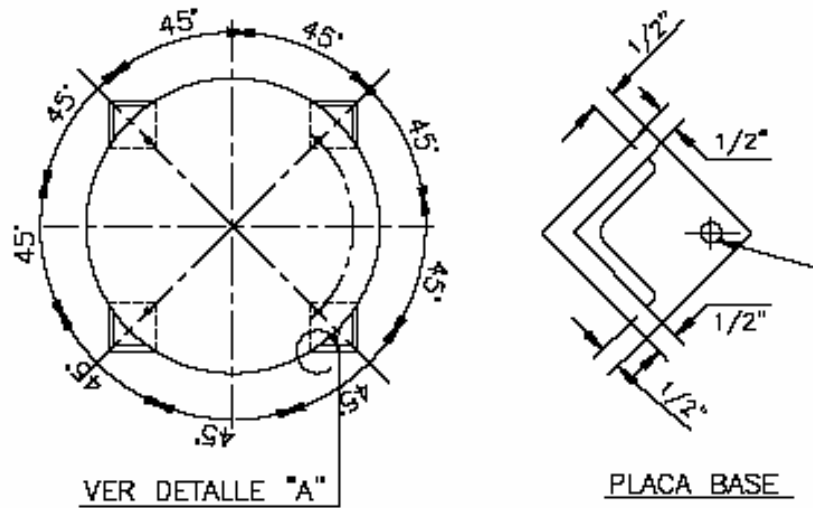
6.8 ABERTURAS PARA LAS TUBERÍAS

Como el destilador se diseña como un recipiente a presión éste contiene una entrada y una salida del producto, además de un drenaje para el condensado en la tapa inferior. El dimensionamiento de dichas aberturas se hizo de la siguiente manera:

6.8.1 Para la entrada

Como se tiene que la tubería de la caldera al destilador es de 1.5" de diámetro nominal cédula 40, el agujero para dicha tubería debe ser el diámetro externo de la tubería más 1/16" de tolerancia. El diámetro del agujero es entonces de $48.26 + 1.5875 = 49.85$ mm.

Figura 30. Soporte del Destilador



6.8.2 Para la salida

Se determinó primero el diámetro de la tubería que va del destilador al condensador y luego se calculó el diámetro del agujero. El diámetro de la tubería de salida se determinó como en el caso de la tubería de entrada con la ecuación 6.11 teniendo en cuenta los siguientes valores:

$$\dot{m}_v = 135 \text{ [kg/h]} \text{ Flujo másico de vapor}$$

$$\bar{V} = 1.673 \text{ [m}^3\text{/kg]} \text{ Volumen específico a presión atmosférica.}$$

$$v = 1800 \text{ [m/min]} \text{ Velocidad del vapor, máxima recomendada}$$

Luego $d = 51.6 \text{ mm}$. Estandarizando se tiene que para un diámetro nominal de 2", cédula 40, el diámetro interno es de 52.502 mm y el diámetro externo es de 60.325 mm. El diámetro del agujero es $60.325 + 1.5875 = 61.91 \text{ mm}$.

6.8.3 Para el drenaje. El drenaje se hace mediante un agujero en la parte inferior del destilador, es decir, sobre la tapa inferior como se mostró en la Figura 19. La tubería es de 1.5" cédula 40 como en la entrada por lo que el diámetro del agujero es de 49.85 mm.

6.9 IZAJES PARA LEVANTAR EL DESTILADOR

Los izajes a utilizar se muestran en la Figura 31. Se usan dos izajes con eslabón en U con una carga igual al peso del cuerpo del destilador, más tapas, distribuidor de vapor, soportes del cartucho y del destilador y cartucho vacío. Cada oreja debe soportar la carga total como forma de asegurar que el destilador nunca se caiga mientras se transporta [13]. El peso total se calculó

usando la aplicación de cálculo de volumen y masa que viene en el programa CAD (Diseño Asistido por Computador) de Solid Edge V12.

El dimensionamiento se hace a partir de los valores tabulados en el libro de referencia con una carga de 2000 lb. Estos valores se muestran en la Tabla 11 (dimensiones en mm).

Figura 31. Izaje para levantar el destilador

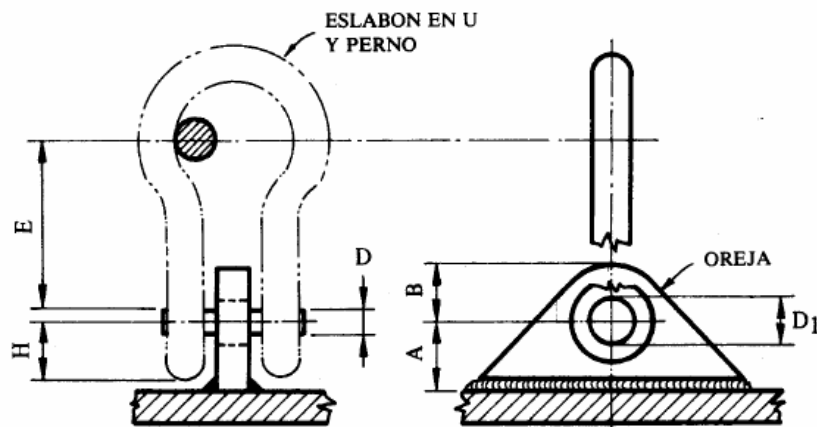


Tabla 11. Dimensiones del izaje del destilador.

Diám. del perno de grillete, D	Diám. del agujero de la oreja, D₁	H	A	Borde cortado a cizalla, B	Corte a gas rolado, B	Brazo del momento, E
12.7	15.875	17.526	22.86	28.575	22.225	36.576

Fuente: MEGYESY, Eugene. Manual de Recipientes a Presión.

Suponiendo que sólo hay esfuerzo cortante en la sección mínima, el espesor requerido **t** puede calcularse por la fórmula:

$$t = \frac{P}{2 \cdot S \cdot (R - D_1/2)} \quad (6.46)$$

P = 8918 N (carga)

S = 60.33 MPa. Esfuerzo cortante permitido (SA 515 Grado 70)

t = 3.58 mm. Con un factor de seguridad de 1.5 se tiene un espesor de 5.37 mm. Se toma un valor de 6 mm.

6.10 REFUERZOS

Sobre el borde superior del cuerpo del destilador hay un refuerzo (ver Figura 19) en forma de anillo de 100 mm de altura y 2.5 mm de espesor donde se ubican los izajes, la abertura para la tubería de salida, la bisagra soldada sobre el cuerpo y los soportes para los pernos de sujeción para la tapa superior.

7 DISEÑO TÉRMICO DEL CONDENSADOR

El tipo de condensador más conveniente para este diseño es un condensador de casco y tubos que actúa a su vez como subenfriador. Estos condensadores proporcionan una gran área de transferencia de calor con poco volumen del dispositivo, su forma cilíndrica y la facilidad de unir partes mediante bridas para soportar altas presiones y temperaturas. Frecuentemente estos condensadores subenfriadores se utilizan en la condensación de aceites esenciales a escala industrial, operando a contracorriente con un paso por la coraza y un paso por los tubos.

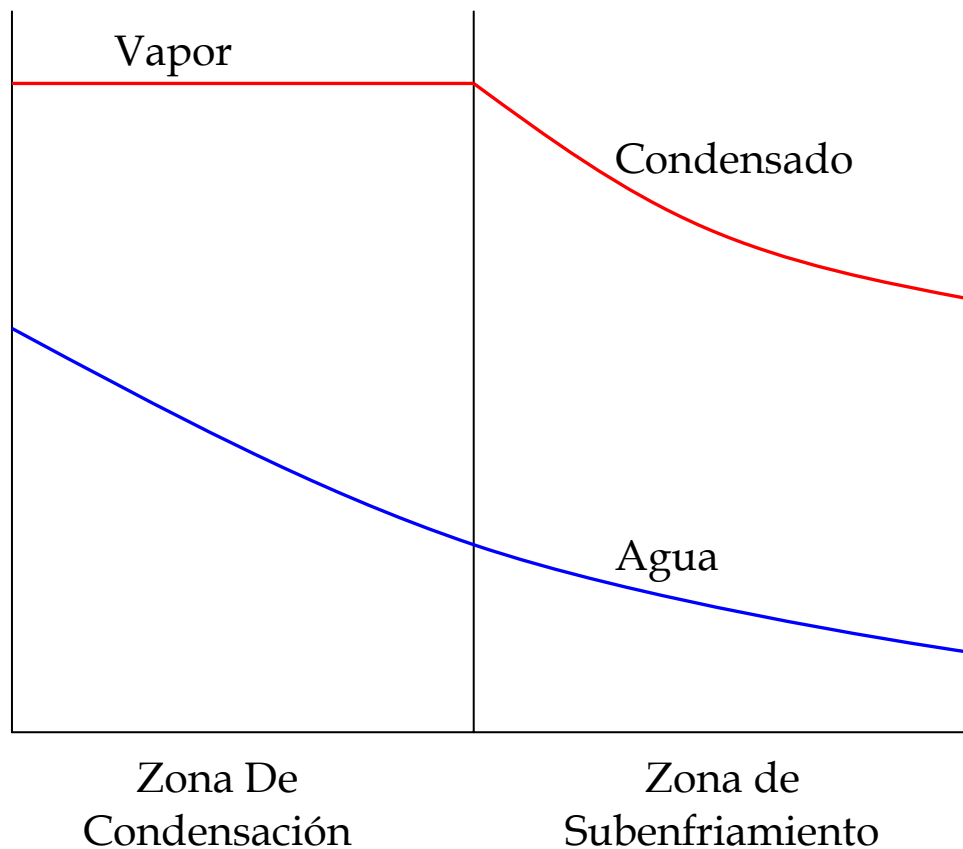
El diseño de intercambiadores de calor de casco y tubos se encuentra bastante estandarizado y es así como su construcción esta bien establecida de acuerdo con procedimientos y recomendaciones estándares de algunas instituciones especializadas y de los mismos fabricantes.

Dentro de este marco tenemos los siguientes:

- Diseño térmico y mecánico: HEDH capítulos 3 y 4;
- Diseño mecánico:
 - Normas ASME sección VIII (recipientes a presión)
 - Recomendaciones TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association).

El objetivo del diseño térmico es determinar el área de transferencia de calor requerida para cumplir con los requerimientos determinados por el proceso. Cuando el vapor que se va condensar entra a la temperatura de saturación y/o cuando el condensado debe subenfriarse antes de salir de la unidad, es necesario dividir el condensador en dos zonas, como se muestra en la figura 32, y tratar cada zona como un intercambiador diferente. A cada zona es necesario calcularle su propio coeficiente global de transferencia de calor, su diferencia media de temperatura y su área de transferencia, para finalmente sumar las áreas individuales obteniendo así el área total del intercambiador.

Figura 32. Zonificación del Condensador



7.1 DATOS DE PROCESO

El primer paso para realizar el diseño térmico de un intercambiador de casco y tubos consiste en realizar un esquema de la localización de los fluidos, como se muestra en la Figura 33, el proceso tiene un ingreso de agua refrigerante a 30°C la cual se incrementa hasta 44°C a la salida por el lado del casco, por otra parte, el vapor ingresa a los tubos a 100°C se condensa y sub enfría hasta una temperatura de 45°C , necesaria para obtener la velocidad de separación del aceite recomendada (ver Capítulo 9).

Realizando un balance de energía entre los fluidos que están interactuando, conociendo de secciones anteriores que el flujo de vapor es 135 kg/h , se determina el calor intercambiado, el flujo másico de agua refrigerante y las temperaturas intermedias de los fluidos en el proceso.

Figura 33. Esquema de localización de fluidos

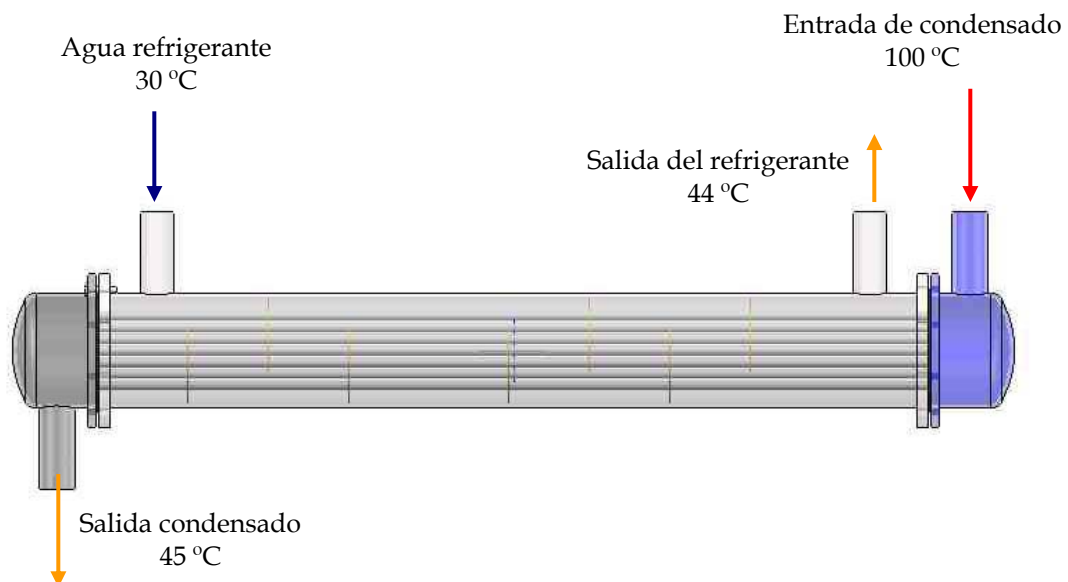


Tabla 12. Datos generales del proceso.

	Lado Tubos	Lado Casco
Fluido	Vapor	Agua
\dot{m}	135 kg/h	¿?
Temp. de Entrada	100 °C	30
Temp. de Salida	45 °C	44

Fuente: Autores del proyecto

Calor total del proceso (Q_{total}):

$$Q_{total} = Q_{condensación} + Q_{subenfriamiento} \quad (7.1)$$

$$Q_{condensación} = \dot{m}_v * h_{fg} \quad (7.2)$$

$$Q_{subenfriamiento} = \dot{m}_v * C_{pv} * \Delta T_{subenfriamiento} \quad (7.3)$$

El flujo de agua (\dot{m}_a) necesario para el proceso se despeja de la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = \dot{m}_a * C_p * \Delta T \quad (7.4)$$

7.2 CONDENSACIÓN

Para diseñar el intercambiador exclusivamente para la zona de condensación se tienen en cuenta los siguientes datos representados en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos para la zona de condensación

Flujo teórico de vapor (m_v)	: 135 kg/h
Temperatura de entrada de los tubos (T_1)	: 100°C
Temperatura de salida de los tubos (T_2)	: 100 °C
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento (t_1)	: Desconocido
Temperatura de salida del agua de enfriamiento (t_2)	: 44,3 °C
Flujo requerido de agua de enfriamiento (\dot{m}_a)	: 1,56 kg/s
Diámetro externo de los tubos (D_{et})	: 19,05 mm.
Diámetro interno de los tubos (D_{ti})	: 17,272 mm.
Diámetro interno del casco (D_c)	: 202,717 mm
Claro diametral casco haz (L_{bb})	: 15 mm.
Calor específico (C_p)	: 4217 J/kg °C

Fuente: Autores del proyecto

Se realiza un balance de energía para obtener la temperatura de entrada del refrigerante (lado casco) para el proceso de condensación, despejando t_1 de la siguiente ecuación:

$$Q_c = \dot{m}_a * C_{pa} (t_2 - t_1) \quad (7.5)$$

Donde,

t_2 = temperatura de salida del refrigerante en la zona de condensación.

t_1 = temperatura de entrada del refrigerante en la zona de condensación

Ahora con todos los datos de las temperaturas se calcula la diferencia media de temperatura ($LMTD_{cc}$):

$$\Delta T_c = LMTD_{cc} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}} \quad (7.6)$$

Se supone un valor para el coeficiente global de transferencia de calor ($U_{asumido}$) = 850 W/m² K, dentro del rango sugerido para la condensación, que iniciará un proceso de iteración para encontrar el valor del U real que tiene el proceso de transferencia.

Se calcula el área de transferencia de calor asumida ($A_{asumida}$):

$$A_{asumida} = \frac{q_c}{U_{asumido} * LMTD_{cc}} \quad (7.7)$$

Para determinar el número total de tubos (NTT) se sigue el procedimiento sugerido por T. Kuppan [11], que lo relaciona con el “tube pitch (L_{tp})”, el diámetro exterior de la distribución de los tubos, el diámetro al centro de los tubos exteriores a la distribución y el arreglo de la distribución.

El diámetro exterior de la distribución de los tubos ($Dotl$) depende del claro diametral casco-haz (Lbb) y el diámetro interno del casco (Dc).

$$D_{otl} = D_c - L_{bb} \quad (7.8)$$

El diámetro al centro de los tubos exteriores de la distribución (D_{ctl})

$$D_{ctl} = D_{otl} - D_{et} \quad (7.9)$$

La constante de distribución de los tubos ($K_{arreglo}$), para el caso de 30° , es 0,866 para un tube pitch de 25,4 mm.

Con lo anterior se calcula el número aproximado del total tubos:

$$NTT = \frac{0,78 * D_{ctl}^2}{K_{arreglo} * Ltp^2} = 40 \quad (7.10)$$

Calculo de la velocidad al interior de los tubos (V_t):

$$V_t = \frac{4 * NTP * m_v}{\pi * D_{ti}^2 * NTT * \rho_v} = 6,741 m/s \quad (7.11)$$

NTP = Numero de pasos por tubo

ρ_v = Densidad del vapor

ρ_l = Densidad del condensado

7.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por el lado de los tubos. Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección interno es necesario calcular Reynolds al interior de los tubos.

$$R_{ei} = \frac{\rho_v \cdot V_t \cdot D_{ti}}{\mu} \quad (7.12)$$

Donde,

μ = Viscosidad del vapor

ρ_v = Densidad del vapor

Las diferentes propiedades del fluido se calcularán a la temperatura media, utilizando la teoría de “**condensación en película en el interior de tubos horizontales**” se calcula el valor del número de Nusselt.

$$N_{UD} = 0,728K \left[\frac{g \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_v) D_{et}^3 \cdot h'_{fg}}{\mu_l \cdot \kappa_l \cdot (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4} \quad (7.13)$$

Donde,

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} C_p l (T_{sat} - T_s) \quad (7.14)$$

h_{fg} = Entalpía de condensación

T_{sat} = Temperatura de saturación del vapor

T_w = Temperatura de pared

g = Gravedad

κ_l = Conductividad térmica del agua

Se asume el valor de $K = 1$, calidad del vapor cercana a 1.

El coeficiente de Transferencia de calor por el lado de los tubos es:

$$h_i = \frac{N_{UD} \cdot \kappa_l}{D_{ti}} \quad (7.15)$$

7.2.2 Coeficiente de transferencia de calor por el lado del casco. En este punto del proceso debemos calcular el coeficiente de transferencia de calor real externo. Existe una gran cantidad de parámetros y situaciones que intervienen en este coeficiente y por ello harían inaceptable utilizar un valor ideal.

Cuando se calcula el coeficiente ideal se asume que el flujo es totalmente transversal al haz de tubos y que existe una única corriente de igual efectividad respecto de los tubos. En realidad, esto no ocurre así y se presentan diversos tipos de corrientes que afectan el desempeño y que se deben tener en cuenta, los diferentes tipos de corrientes son las siguientes:

- Corrientes de fuga {
 - Bafle - casco
 - Tubo - bafle
- Corrientes de Bypass
- Corrientes de ventana
- Corriente principal {
 - En los bafles principales
 - En los bafles extremos

Al determinar el coeficiente de transferencia externo a los tubos (h_{ex}), se utiliza el método desarrollado por la Universidad de Delaware, el cual consiste en calcular el valor ideal del coeficiente de transferencia de calor y luego corregirlo por una serie de factores que tengan en cuenta las diferentes zonas de flujo del lado del casco en donde la interacción térmica entre el fluido y la superficie exterior de los tubos es diferente, como son la zona de flujo en la ventana del bafle, las corrientes de fuga bafle-tubo y bafle-casco, las zonas extremas en donde las distancias entre bafles es diferente, etc.

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor iniciamos con la determinación del espaciamiento de baffles centrales (L_{bc}), utilizando las recomendaciones TEMA se tiene:

$$L_{bc} = 0,7 * D_c \quad (7.16)$$

Seguido se calcula el área transversal de flujo mínima (S_m)

$$S_m = L_{bc} \left[L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp,eff}} (L_{tp} - D_{et}) \right] \quad (7.17)$$

El flujo másico por unidad de área mínima de flujo que pasa por el exterior del banco de tubos (\dot{m}_s) se define de la siguiente forma:

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_a}{S_m} \quad (7.18)$$

Posteriormente se calcula el número de Reynolds:

$$R_{ei} = \frac{D_{et} \dot{m}_s}{\nu_s} \quad (7.19)$$

$$\text{Donde } \nu_s = 6,9e-4 \frac{kg}{ms} \quad (7.20)$$

Los coeficientes a del factor de Colburn de transferencia de calor (J_i) y b del factor de fricción (f_i) dependen del número de Reynolds, son los siguientes:

$a_1 = 0,321$	$b_1 = 0,486$
$a_2 = -0,388$	$b_2 = -0,152$
$a_3 = 1,45$	$b_3 = 7,000$
$a_4 = 0,519$	$b_4 = 0,500$

Se calcula el factor de Colburn de transferencia de calor y el factor de fricción:

$$J_i = (a_1) \left(\frac{1,33}{L_{tp} / D_{et}} \right)^a (R_{es})^{a_2} \quad (7.21)$$

$$\text{Donde } a = \frac{a_3}{1 + 0,14(R_{es})^{a_4}} \quad (7.22)$$

$$J_i = 0,011445$$

$$f_i = b_1 \left(\frac{1,33}{L_{tp} / D_{et}} \right)^b (R_{es})^{b_2} \quad (7.23)$$

$$\text{Donde } b = \frac{b_3}{1 + 0,14(R_{es})^{b_4}} \quad (7.24)$$

De la siguiente ecuación se despeja el valor del coeficiente de convección ideal:

$$J_i = \frac{h_i}{(C_p)_s \dot{m}_s} (P_{rs})^{2/3} (\phi_s)^{-r} \quad (7.25)$$

P_{rs} = Numero de Prandtl del fluido del casco

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

Realizando los cálculos pertinentes se obtienen los siguientes factores de corrección para hallar el coeficiente de convección real:

J_c : Factor de corrección del segmento de la ventana del baffle.

$$J_c = 1,11$$

J_l : Factor de corrección para la transferencia de calor por fuga en el baffle

$$J_l = 0,74$$

J_r : Factor de corrección para la transferencia de calor por gradiente de temperatura adverso al flujo laminar

$$J_r = 1$$

J_b : Factor de corrección para la transferencia de calor por bypass en el haz

$$J_b = 0,97$$

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

$$J_s = 0,98$$

Basado en el coeficiente ideal calculado anteriormente ahora se determina el coeficiente real usando los diferentes factores de corrección:

$$J = J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s \quad (7.26)$$

$$h = h_i \cdot (J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s) \quad (7.27)$$

De donde tenemos que el U calculado es:

$$U_{\text{calculado}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{casco}}} + R_{f_o} + R_{f_i} + \frac{1}{h_{\text{tubo}}} * \frac{A_o}{A_i}} \quad (7.28)$$

Donde, $R_{f_o} = 0,0003 \frac{m^2 K}{W}$ (7.29) Factor de suciedad externo a los tubos

$R_{f_i} = 0,0003 \frac{m^2 K}{W}$ (7.30) Factor de suciedad en los tubos interno

A_o = Área de transferencia externa de los tubos

A_i = Área de transferencia interna de los tubos

Debido a que el proceso para calcular el área de transferencia de calor del intercambiador es iterativo en las Tablas 14 y 15 se muestran la primera iteración y la solución del proceso respectivamente.

En la Tabla 15 se observa que el $U_{\text{calculado}}$ y el U_{supuesto} son aproximadamente iguales, lo que indica que el valor de $U_{\text{calculado}}$ se puede tomar como el U_{real} .

Tabla 14. Área de T.C para la etapa de condensación (primera iteración)

DISEÑO TERMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSACIÓN)						
DATOS DE PROCESO						
Temp. Entr. Lado Casco (°C)	31,4	hfg (J/kg-K)	4188	Presión Entr (kPa)	101.3	
Temp. Salida del Casco (°C)	44	Mc (kg/s)	1,56			
Calor Transferido (W)	84637,5					
Temp. Entr. Lado Tubos (°C)	100	Cp (J/kg-K)	2257000	Presión Entr (kPa)	101.3	
Temp. Salida Lado Tubos(°C)	100	Mt (kg/s)	0,0375			
U (W/m ² -K) Asumido		850				
DATOS GEOMÉTRICOS						
Lado de los tubos	Di (mm)	17,272	Lado del casco	Di (mm)	202,717	Arreglo
	De (mm)	19,05		De (mm)	219,175	30°
Lbb (m)	0,015		NTT	40	Lbc	0,14
Dotl (m)	0,188		Lts (m)	0,0254	Lbi	0,15
Dctl (m)	0,169		Lto (m)	0,727	Lbo	0,15
Karreglo	0,866		BC (%)	30		
Lpt (m)	0,0254		Lbc_i	0,1419		
PROPIEDADES						
Lado de los tubos	ρ (kg/m ³)	0,5975	Lado del casco	ρ (kg/m ³)	958,4	Temper. de Pared (°C) (supuesta)
	μ (kg/m-s)	1,227E-05		μ (kg/m-s)	2,82E-04	
	Pr			Pr	4,48	
	K (W/m-K)			K (W/m-K)	0,6651	
RESULTADOS						
Qtotal	84637,5	(W/m ² -K)	LMTD	61,94	μ_Tw (kg/m-s)	3,735E-04
Asupuesta	1,2265	m ²				
Número de tubos totales	40			Número de Re en el casco	5388	
Longitud de los tubos	0,73			Factor de Corrección prop		
Velocidad en los tubos (m/s)	6,74111			Ji (Factor de Colburn)	0,0114	
Número de Re en los tubos	5670			hi (W/m ² -K) del casco	6067,76	
Factor de Corrección prop.	1,847			Factor total corrección hc	0,780	
Numero de Nusselt	306,51			h (W/m ² -K) del casco	4733	
h (W/m ² -K) de los tubos	11803			Temp de la pared	82	
Area (m ²) interna tubos	1,5670			Area (m ²) externa tubos	1,6075	
U (W/m ² -K) Calculado		1113				

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 15. Área de T.C para la etapa de condensación. (Solución)

DISEÑO TERMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSACIÓN)						
DATOS DE PROCESO						
Temp. Entrada del Casco (°C)	31,4	hfg (J/kg-K)	4188	Presión Entr (kPa)	101.3	
Temp. Salida lado Casco (°C)	44,266	Mc (kg/s)	1,56			
Calor Transferido (W)	84637,5					
Temp. Entr. de los Tubos (°C)	100	Cp (J/kg-K)	2257000	Presión Entr (kPa)	101.3	
Temp. Salida lado Tubos (°C)	100	Mt (kg/s)	0,0375			
U (W/m ² -K) Asumido		1114				
DATOS GEOMÉTRICOS						
Lado de los tubos	Di (mm)	17,272	Lado del casco	Di (mm)	202,717	Arreglo
	De (mm)	19,05		De (mm)	219,175	
Lbb (m)	0,015		NTT	40	Lbc	0,14
Dotl (m)	0,187717		Lts (m)	0,0254	Lbi	0,15
Dctl (m)	0,168667		Lto (m)	0,567	Lbo	0,15
Karreglo	0,866		BC (%)	30		
Lpt (m)	0,0254		Lbc_i	0,1419		
PROPIEDADES						
Lado de los tubos	ρ (kg/m ³)	0,5975	Lado del casco	ρ (kg/m ³)	958,4	Temperat de Pared (°C) (supuesta)
	μ (kg/m-s)	1,227E-05		μ (kg/m-s)	2,82E-04	
	Pr			Pr	4,48	
	K (W/m-K)			K (W/m-K)	0,6651	
RESULTADOS						
Qtotal	84637,5	(W/m ² -K)	LMTD	61,94	μ_Tw (kg/m-s)	3,735E-04
Asupuesta	1,2265	m ²				
Número de tubos totales	40			Número de Re en el casco	5388	
Longitud de los tubos	0,57			Factor de Corrección prop		
Velocidad en los tubos (m/s)	6,74111			Ji (Factor de Colburn)	0,0114	
Número de Re en los tubos	5670			hi (W/m ² -K) del casco	6067,76	
Factor de Corrección prop	1,847			Factor total corrección hc	0,776	
Numero de Nusselt	306,51			h (W/m ² -K) del casco	4.708	
h (W/m ² -K) de los tubos	11803			Temperatura de la pared	82	
Area (m ²) interna tubos	1,2216			Area (m ²) externa a los tubos	1,2265	
U (W/m ² -K) Calculado		1114				

Fuente: Autores del proyecto

7.3 SUBENFRIAMIENTO

En el proceso de **subenfriamiento** el procedimiento de cálculo es similar al de la condensación, por lo tanto se observan los datos relevantes representados en la tabla 16.

El resultado de las áreas de cada proceso (condensación y subenfriamiento) permite determinar la longitud total de los tubos necesarios para garantizar el buen funcionamiento del condensador subenfriador, como se observa a continuación:

$$A_{\text{condensación}} + A_{\text{subenfriamiento}} = A_{\text{TOTAL}} \quad (7.31)$$

$$1.227 \text{ m}^2 + 2.13 \text{ m}^2 = 3.357 \text{ m}^2$$

Teniendo en cuenta que el diámetro de los tubos es 19,05 mm, determinamos la longitud de los tubos:

$$L = \frac{A_{\text{TOTAL}}}{\pi \cdot D_{et} \cdot NTT} \quad (7.32)$$

$$L = 1.411 \text{ m}$$

Para el diseño se adopta el valor de 1,5 m para la longitud de los tubos.

Tabla 16. Área de T.C para el proceso de subenfriamiento.

DATOS DE PROCESO					
Temp. de Entrada del Casco (°C)	30	C_p (J/Kg.-K)	3990	Presión Entr. (kPa)	152
Temp. de Salida del Casco (°C)	31,4	m_s (Kg./s)	1,56		

Temp. Entr. de los Tubos (°C)	100	C_p (J/Kg.-K)	4188	Presión Entr. (kPa)	152
Temp. de Sal. de los Tubos(°C)	45	m_t (Kg./s)	0,0375		

U (W/m ² -K) Asumido	115
---------------------------------	-----

DATOS GEOMÉTRICOS						
Lado de los tubos	Di (mm)	17,272	Lado del casco	Di (mm)	202,717	Arreglo
	De (mm)	19,05		De (mm)	219,175	

PROPIEDADES						
Lado de los tubos	ρ (kg/m ³)	976,3	Lado del casco	ρ (kg/m ³)	1036	Temperatura de Pared (°C) (supuesta)
	μ (kg/m-s)	3,906E-04		μ (kg/m-s)	7,91E-04	
	Pr	2,411		Pr	4,881	
	K (W/m-K)	0,6513		K (W/m-K)	0,6465	34

RESULTADOS

Q_{total}	8637,75	W/m ² *K	LMTD	35,26	$\mu_{@Tw}$ (kg/ m-s)	7,341E-04
$A_{supuesta}$	2,1301	M ²				
Número de tubos totales	40			Número de Re en el casco	4699	
Longitud de los tubos	0,95			Factor de Corrección prop	1,01	
Velocidad en los tubos (m/s)	0,00413			J_i (Factor de Colburn)	0,0121	
Número de Re en los tubos	178			h_i (W/m ² -K) del casco	3298,56	
Factor de Corrección prop.	0,532			Factor total corrección h_c	0,776	
Numero de Nusselt	3,81			h (W/m ² -K) del casco	2559	
h (W/m ² -K) de los tubos	144			Temperatura de la pared	34	
Area (m ²) interna tubos	1,9313			Área (m ²) externa de tubos	2,1301	

U (W/m ² -K) Calculado	115
-----------------------------------	------------

Fuente: Autores del proyecto

8 DISEÑO MECÁNICO DEL CONDENSADOR

En el presente, se diseñaran cada uno de los elementos mecánicos que constituyen el intercambiador de calor de casco y tubo (condensador), para ello se tendrán en cuenta principalmente las recomendaciones TEMA y el estudio térmico del proceso realizado en la sección anterior.

El diseño mecánico consta de los siguientes elementos constituyentes del condensador:

- Cálculo del diámetro de las Boquillas
- Espesor del casco
- Tapas
- Placas porta tubos
- Bridas

8.1 BOQUILLAS

8.1.1 Lado del casco. El diámetro de las boquillas se calcula con el fin de evitar que la corriente del fluido al chocar con el haz de tubos los dañe por efectos erosivos, además de permitir una adecuada velocidad del fluido a través del casco.

Para determinar el diámetro de la boquilla se necesitan los datos del flujo másico en la coraza (\dot{m}_s), la gravedad específica (SG) del fluido refrigerante y la densidad del agua (ρ_{agua}).

$$\dot{m}_s = 1,56 \text{ kg/s;}$$

SG = 1, fluido refrigerante es agua

$$\rho_{\text{agua}} = 1095 \text{ kg/m}^3$$

Se hace la conversión del flujo másico (Kg. /s) a caudal (m³/s)

$$Q = \dot{m}_s \cdot \frac{1}{\rho_{\text{agua}} \cdot SG} \quad (8.1)$$

Dependiendo del fluido entrante a la coraza, se iguala el producto ρv^2 al valor correspondiente para fluidos no corrosivos y de una sola fase

$$\rho v^2 = 1,500 \text{ Lb}/(\text{pie s}^2) \text{ ó } (2,250 \text{ Kg}/\text{m s}^2)].$$

De la ecuación anterior, se podrá despejarse la variable "V" para obtener el valor de la velocidad del fluido en la boquilla alimentadora.

Se sabe que $Q = V \times A$ por lo que:

$$A = Q / V \quad (8.2)$$

Sabiéndose que el área de un círculo es:

$$A = 0.785 D^2 \quad (8.3)$$

Se despeja finalmente el diámetro interior de la boquilla "D" requerido para evitar la erosión del haz de tubos

$$D = (A / 0.785)^{1/2} \quad (8.4)$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Diámetro de las boquillas del lado del casco.

Q	1,56e-3	m ³ /s	Caudal de agua
V	1,433	m/s	Velocidad del fluido en la boquilla
D	35,573	mm	Diámetro de la boquilla
D_{nom}	38,1	mm	Diámetro nominal de la tubería

Fuente: Autores del proyecto

8.1.2 Lado de los tubos. El diámetro de la entrada es el mismo que el diámetro de salida del destilador, calculado en la sección 6.8.2 como un tubo de 2" de diámetro nominal.

El diámetro de salida se toma de 1" de diámetro nominal, ya que sólo van a salir condensados de aceite y agua.

8.2 ESPESOR DEL CASCO

Se denomina con el nombre de casco al elemento generalmente cilíndrico, que constituye esencialmente el cuerpo de un intercambiador de calor, el cual aloja en su interior al haz de tubos.

Desde el punto de vista estructural, el casco es un cascarón cilíndrico, el cual se comporta como una membrana. El Código ASME, Div. 1, especifica las fórmulas adecuadas para el diseño de este elemento. El condensador está sometido a presión interna debido a la presión ejercida por la bomba de suministro de agua.

El espesor mínimo requerido por presión interna para un elemento cilíndrico, podrá determinarse por medio de las siguientes ecuaciones:

a) En función del radio interior.

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (8.5)$$

b) En función del radio exterior.

$$t = \frac{PR_0}{SE - 0,4P} \quad (8.6)$$

Siendo:

t = Espesor mínimo requerido por presión, sin corrosión plg.

P = Presión interna de diseño, lb/plg².

R = Radio interior del casco en condiciones corroídas plg.

R₀ = Radio exterior del casco, plg.

S = Esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño, lb/plg².

E = Eficiencia de la junta soldada, %

C = Corrosión permisible, plg.

Las condiciones de operación en algunos equipos, resultan en ocasiones no ser críticas por las dimensiones de los mismos o por la baja presión a que operan, por lo que el espesor de pared requerido por presión para la construcción de la coraza será muy reducido, sin embargo tal espesor de pared pudiera resultar insuficiente para resistir otro tipo de cargas, como son por ejemplo las producidas por el peso propio del equipo en los puntos de contacto de la coraza con los soportes de apoyo, o bien los esfuerzos debidos a la distancia comprendida entre apoyos y el mismo peso del equipo que tenderá a crear una flexión en la coraza.

Debido a lo anterior, la norma TEMA, hace referencia a los espesores requeridos. Estos fueron fijados en base a la experiencia de los usuarios en cuanto al manejo de equipos en plantas. Esto repercute en el hecho de que ninguna coraza deberá tener un espesor inferior al mínimo permitido por TEMA indicado en función del diámetro del equipo (ver Tabla 18).

Tabla 18. Espesor mínimo de casco.

Diámetro nominal del casco Plg (mm)	Espesor mínimo				
	Acero al carbón			Aleación	
	Tubo	Placa			
6 (152)	Ced. 40	-			1/8 (3.2)
8 - 12 (203-305)	Ced. 30	-			1/8 (3.2)
13 - 29 (330-737)	Ced. Norm				3/16 (4.8)
30 - 39 (762-991)	-	3/8 (9,5)			1/4 (6.4)
40 - 60 (1016-1524)	-	7/16 (11,1)			5/16 (7.9)
61 - 80 (1549-2032)	-	1/2 (12,7)			5/16 (7.9)
		1/2 (12,7)			

Fuente: norma TEMA

Siguiendo las recomendaciones de la TEMA, el diámetro nominal del casco es de 8 pulgadas y el espesor corresponde a una **cédula 30**, debido a que utilizando las formulas sugeridas por la ASME el espesor del casco es inferior al recomendado por TEMA. Para el diseño se elige una tubería de 8 plg **cédula 40**, ya que es más distribuida en el mercado y su espesor es mayor al de la **cédula 30**.

8.3 CABEZALES

Las tapas o cabezales son los elementos utilizados tanto en la entrada como en el retorno (o salida), a fin de proporcionar el cierre en los extremos del cambiador de calor, pueden ser de dos tipos; tapas abombadas y tapas

planas, las cuales se han de seleccionar en función de las características propias de cada una de ellas o bien de acuerdo al tipo de tapa requerida por el cambiador que se esté diseñando, tomando en consideración las condiciones de servicio.

En este caso se utilizan tapas abombadas del tipo toriesféricas, este tipo de tapas son las que tienen más aceptación en la industria debido a que su costo es bajo, soportando altas presiones manométricas.

El espesor requerido por este tipo de tapas debe determinarse por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{0,885PL}{SE - 0,1P} \quad (8.7)$$

Siendo:

t = Espesor mínimo requerido por presión, sin corrosión plg.

P = Presión interna de diseño, 70 Lb/plg².

L = Radio interior del casquete, 8 plg.

S = Esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño, 12700 lb/plg².

E = Eficiencia de la junta soldada, 70 %

TEMA hace referencia a los espesores requeridos, ellos fueron fijados en base a la experiencia de los usuarios en cuanto al manejo de equipos en plantas. Esto repercute el hecho de que ninguna tapa deberá tener un espesor de pared menor al de la coraza a la cual va a unirse.

Tabla 19. Espesor mínimo de cabezal según recomendaciones.

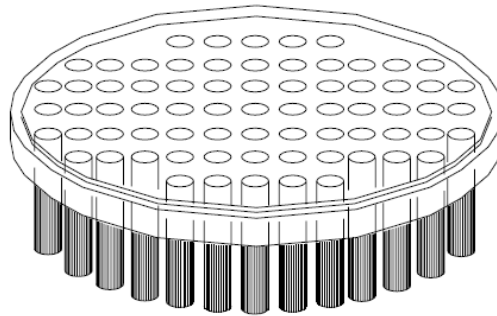
	ASME	TEMA
Espesor	0,02138 plg (0,543 mm)	0,322 plg (8,18 mm)

Fuente: Norma ASME Y TEMA

8.4 PLACA PORTATUBOS

Las placas porta tubos empleadas en intercambiadores de calor son placas planas circulares de espesor constante, perforadas con agujeros circulares (Figura 34), en los cuales habrán de insertarse los tubos de transferencia para ser rolados y/o soldados, de acuerdo a las necesidades del diseño, para formar un sello hermético en esta junta y evitar la contaminación de los fluidos de proceso.

Figura 34. Placa porta tubos



Las placas porta tubos cumplen tres funciones principales; primero como elementos divisores entre los flujos del lado coraza y el del lado tubos, impidiendo el contacto directo entre ellos, segundo, como elemento estructural para soportar las presiones tanto del lado coraza como del lado tubos y tercero como elemento de sujeción de los tubos.

Para calcular el espesor requerido por la placa porta tubos, se necesitan hacer cálculos por flexión y cortante, y compararlos con las recomendaciones TEMA.

Cálculo por Flexión:

$$T = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{S}} \quad (8.8)$$

Donde:

Tabla 20. Espesor de la placa porta tubos por flexión

T	4,5 mm	Espesor efectivo para el espejo
S	120,66 MPa	Esfuerzo permisible del material a la temperatura de diseño
P	276 MPa	Presión de diseño
F	0,86	Constante que depende del tipo de espejo
G	217 mm	Diámetro medio del empaque

Fuente: Autores del proyecto

Cálculos por cortante:

$$T = \frac{0.31DL}{\left(1 - \frac{D_t}{p}\right)} * \left(\frac{P}{S}\right) \quad (8.9)$$

Tabla 21. Espesor de la placa porta tubos por cortante

T	= 1,7 mm	
C	= 0,1877 m	Perímetro de la plantilla tomada a partir de centro a centro de los tubos periféricos
A	= $(\pi * C^{0.5}) / 4$ = 0,0276756 m ²	Área total encerrada por el perímetro "C"
D _L	= 4A/C = 0,59 m	Diámetro equivalente del perímetro límite centro a centro de los tubos
D _t	19,05 mm	Diámetro exterior de los tubos.
P	276 kPa	Presión de diseño
S	120,66 MPa	Esfuerzo de tensión permisible a la temperatura de la pared.
P	25,4 mm	Paso entre tubos, centro a centro.

Fuente: Autores del proyecto

Según las recomendaciones TEMA el espesor mínimo para la placa porta tubos no debe ser menor que el diámetro exterior de los tubos en un 75%. Re

$$T = 0.75 * D_{et} \quad (8.10)$$

$$T = 14.3 \text{ mm}$$

De los espesores calculados para la placa portatubos se escoge el mayor, donde el recomendado por las normas TEMA es el mayor. Se aproxima al entero superior y se tiene que el espesor de la placa portatubos es 15 mm.

8.5 BRIDAS

Parte esencial en recipientes a presión, intercambiadores de calor y tanques de almacenamiento pues permiten el desarme y remoción o limpieza de partes internas. Estas también son utilizadas para hacer uniones entre tuberías y otras conexiones. Las bridas son frecuentemente empleadas para

conectar dos secciones mediante pernos que se puedan ensamblar y desarmar fácilmente. En intercambiadores de calor. Las juntas bridadas son usadas para conectar los siguientes componentes:

1. Canal y cubierta de canal
2. Cabezal o canales con la placa portatubos
3. Boquillas de entrada y salida con las tuberías que transportan los fluidos
4. Para cerrar varias aberturas tales como compuertas, mirillas y sus tapas

Las juntas bridadas juegan un papel importante en el punto de vista de la integridad y confiabilidad de los intercambiadores de calor. Diseños inadecuados de bridas causan perdidas de fluidos de transferencia de calor. Sin embargo, impedir perdidas de líquidos o gas es uno de las consideraciones más importantes mientras se diseñan juntas bridadas.

Normas sobre bridas:

- ANSI B16.5, Bridas para tuberías de acero y conexiones bridadas.
- MSS SP-44, Bridas empleadas en líneas de alta presión de 26" a 36".
- API 605, Bridas en acero al carbono de gran diámetro para presiones de 75, 150 y 300psi.
- AWWA 207-55, Bridas de tamaños de 6" a 96".

Las condiciones de diseño para el cálculo de la brida están contenidas en la tabla 22.

Tabla 22. Condiciones de diseño para la brida.

Presión de diseño [Kpa]	276,00		
Temperatura de diseño [°C]	45		
Material de la Brida	SAE-304		
Material de los tornillos	SA-193_B7		
Tolerancia a la corrosión [mm]	3,00		
ESFUERZO PERMISIBLE			
BRIDA		TORNILLOS	
S_{fo} a Temp. de Diseño [Mpa]	120,66	S_b a Temp. de Diseño [Mpa]	158,60
S_{fa} a Temp. ambiente [Mpa]	120,66	S_a a Temp. ambiente [Mpa]	158,60

Fuente: Autores del proyecto

Para el diseño de la brida se utiliza una tipo suelto, esta brida no requiere una unión directa con el recipiente o tubo.

1) Al determinar las cargas de apriete se debe tener en cuenta:

- Las dimensiones del empaque y el material. Ver tabla 23.
- La condición de operación:

Tabla 23. Características del empaque del condensador

Ancho del empaque	N [mm]	13,00
Ancho de asentamiento efectivo	b [mm]	6,40
Diámetro donde se localiza la carga del sello	G [mm]	217,00
Esfuerzo de asentamiento del sello	y [Mpa]	11,03
Factor de sello	m	2,00
Material de sello	Neopreno siliconado	

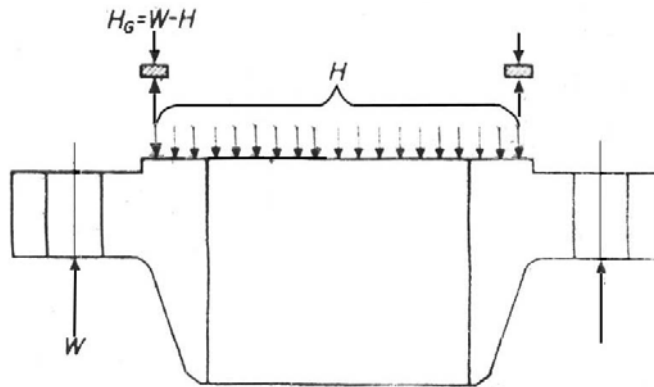
Fuente: Autores del proyecto.

La carga requerida en el perno (W_{m1}) deberá ser tal que después de aplicar la presión hidrostática (P), el empaque quede sometido a una presión remanente mínima (2 MP).

$$W_{m1} = H + H_p = \frac{\pi}{4} G^2 P + 2b \pi G m P \quad (8.11)$$

$$W_{m1} = 15024,24 \text{ N}$$

Figura 35. Condición de operación

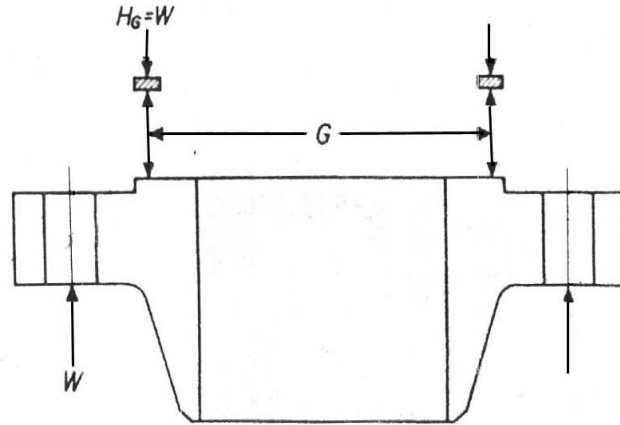


- La Condición de Asentamiento: Para que un empaque funcione adecuadamente debe someterse a una presión de deformación mínima “ y ” [psi] que le permita adaptarse a la rugosidad de la cara de la brida.

$$W_{m2} = b \pi G y \quad (8.12)$$

$$W_{m2} = 48124,37 \text{ N}$$

Figura 36. Condición de asentamiento.



2) Se determina el área de sección transversal requerida por los pernos (A_m):

A_m : la mayor entre W_{m2}/S_a ó W_{m1}/S_b .

$$A_m = 303,43 \text{ mm}^2$$

Se utilizan 8 tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada para asegurar la brida, teniendo en cuenta el área de sección transversal de los tornillos, para calcular el área de sección transversal de los pernos (A_b).

$$A_b = 8 \times 81,29 \text{ mm}^2 = 650,32 \text{ mm}^2$$

3) Se calcula la carga de diseño de la brida debido al asentamiento del empaque (W):

$$W = 0,5(A_m + A_b)S_a \quad (8.13)$$

$$W = 75632,56 \text{ N}$$

4) En el paso siguiente se comprueba que el ancho del empaque este dentro de las recomendaciones TEMA, $N \geq 12,7$ mm.

$$N_{\min} = \frac{A_b \cdot S_a}{2\pi y G} \quad (8.14)$$

$$N_{\min} = 7 \text{ mm}$$

El ancho mínimo del empaque requerido por cargas es de 7 mm según las recomendaciones TEMA, el ancho debe ser mayor de 12,7 mm. La suposición de 13mm realizada para ejecutar los cálculos es apropiada.

5) El paso siguiente para determinar el espesor de la brida es dimensionar los diámetros de la brida y calcular los momentos ejercidos.

Se determina el diámetro del círculo de pernos (C) y el diámetro exterior de la brida (A).

$$C = B + g_0 + R \quad (8.15)$$

$$A = C + E \quad (8.16)$$

Donde:

B = Diámetro interior del casco.

g_0 = Espesor de pared del casco.

R = Distancia radial mínima para herramienta.

E = Distancia mínima al borde.

Se determina los brazos de momentos en las bridas, ver tabla 24.

Tabla 24. Brazos de momentos de las bridas.

CONDICIÓN DE OPERACIÓN					
$H_D = \pi B^2 P / 4$	8950,50 [N]	$h_D = 0.5(C - B)$	32,23 [mm]	$M_D = H_D \times h_D$ [Nm]	288,43
$H_G = W_{m1} - H$	4816,74 [N]	$h_G = 0.5(C - G)$	25,33 [mm]	$M_G = H_G \times h_G$ [Nm]	121,98
$H_T = H - H_D$	1257,00 [N]	$h_T = 0.5(h_D + h_G)$	28,78 [mm]	$M_T = H_T \times h_T$ [Nm]	36,17
$M_o = M_D + M_G + M_T$ [Nm]			446,58		
CONDICIÓN DE ASENTAMIENTO					
$H_G = W$	75632,56 [N]	$h_G = 0.5(C - G)$	25,33 [mm]	$M_a = H_G \times h_g$ [Nm]	1915,77

Fuente: Autores del proyecto

Los esfuerzos en la brida deben ser determinados para la condición de operación y asentamiento; En los cálculos se utiliza un momento modificado M_{FA} o M_{FO} para tener en cuenta un mayor valor de la separación mínima entre pernos. El momento modificado que se introduce en las fórmulas de esfuerzos se halla con las siguientes relaciones:

$$\text{Para la condición de operación: } M_{FO} = \frac{M_o * C_f}{B} \quad (8.17)$$

$$M_{FO} = 2758,1616 \text{ N-m}$$

$$\text{Para condición de asentamiento: } M_{FA} = \frac{M_a * C_f}{B} \quad (8.18)$$

$$M_{FA} = 643,0752 \text{ N-m}$$

$$C_f = \sqrt{\frac{\text{Espacio real entre pernos}}{\text{Espacio normal entre pernos}}} \quad (8.19)$$

$$C_f = 1,44$$

$$\text{Espacio normal entre pernos} = 2d + t \quad (8.20)$$

Factores geométricos involucrados en cálculo de esfuerzos sobre la brida:

$$K = \frac{A}{B} \quad (8.21)$$

$$K = 1.47$$

$$Y = 4,15 \text{ (ASME Fig. UA - 51.1)}$$

6) El espesor de la brida se calcula teniendo en cuenta el momento modificado mayor entre la condición de operación y el asentamiento.

$$t = \sqrt{\frac{YM_{FA} * 1000}{S_{fa}B}} \text{ [mm]} \quad (8.22)$$

$$t = 21,6 \text{ mm}$$

9 DISEÑO DEL SEPARADOR PARA AEs

El recipiente separador es el elemento, como su nombre lo dice, que permite la separación de los aceites esenciales y el agua después de que la hidrosolución se ha condensado y enfriado.

9.1 LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS

El diseño del recipiente separador de aceites esenciales depende del tipo de aceite a extraer, en nuestro caso los aceites a extraer son menos densos que el agua. Ver sección 3.2.4.

Los factores importantes en el diseño del separador son:

- La diferencia de densidades
- La viscosidad del agua

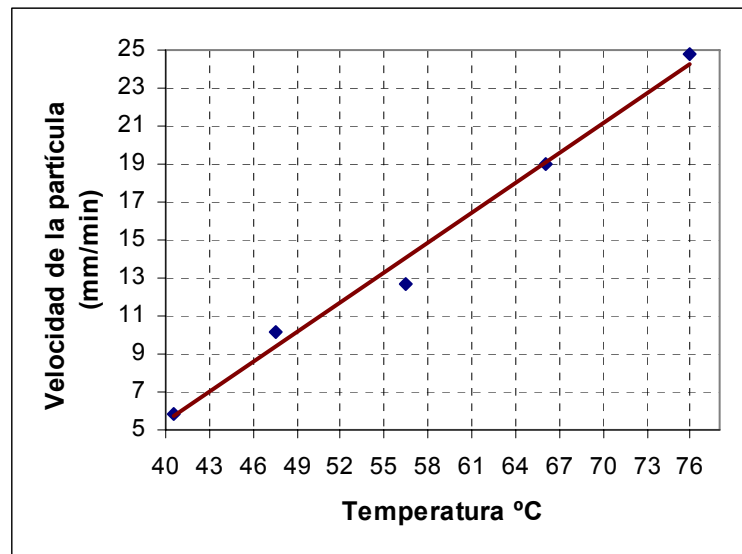
La diferencia de densidades es el principio que permite que una partícula de aceite suba o baje a través del agua, y la viscosidad del agua es la fuerza que se opone al movimiento de las partículas de aceite, la viscosidad del agua disminuye rápidamente a medida que se incrementa la temperatura de esta, lo que hace la separación más fácil al incrementar la temperatura.

Estos dos factores constituyen la variable más importante en el proceso de separación que es la velocidad de las partículas a través del agua.

9.2 LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS DE ACEITE A TRAVÉS DEL AGUA EN UN PROCESO DE SEPARACIÓN

Partiendo de los descubrimientos del profesor A. D. Hughes y sus colaboradores, Tim Denny [8] llevó a cabo pruebas con aceites de lavanda para calcular la velocidad de las partículas a diferentes temperaturas, debido a que las partículas más grandes son las que primero se forman dentro de la solución agua-aceite y por tanto son las primeras que se separan. El estudio se centró en las partículas más pequeñas (visibles al ojo humano) que son las últimas que se forman y las que más lento se desplazan a través del agua. Los resultados de dichas pruebas se resumen en la siguiente Figura.

Figura 37. Velocidad de ascenso de las partículas de aceite de lavanda a través del agua



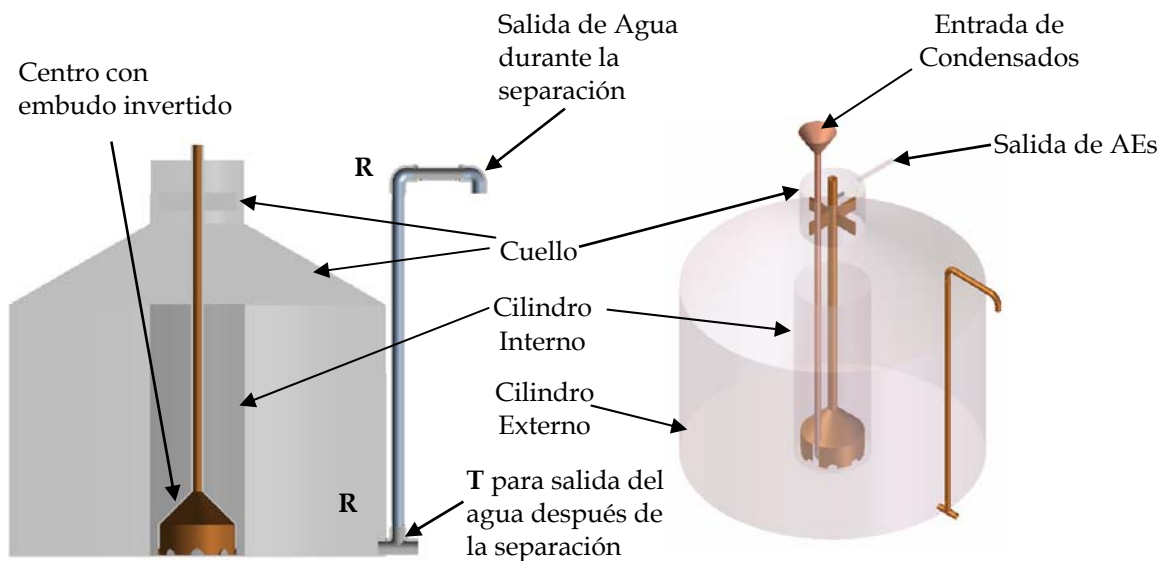
En conclusión a los experimentos realizados por Tim Denny [8] se observa que la velocidad de separación de las partículas de aceite es proporcional a la temperatura del agua y el aceite en el separador. Para muchos aceites más

ligeros que el agua se ha encontrado que la temperatura óptima de separación es 45° C [8]. En la Figura 37 se muestra que para la temperatura de 45° C la velocidad de las partículas de aceite es aproximadamente igual a 9 mm/min

9.3 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL SEPARADOR

La planta extractora de aceites esenciales requiere un recipiente separador para AEs ligeros como se muestra en la Figura 38, debido a que los arbustos con los que se trabajará producen aceites superficiales menos densos que el agua.

Figura 38. Recipiente separador para AEs Ligeros



Las dimensiones del separador deben asegurar que la velocidad del nivel de condensados en el cilindro externo del separador (ver Figura 38) sea menor que 9 mm/min a cualquier flujo másico de la solución agua-aceite

proveniente del condensador, ya que las partículas de aceite suben a través del agua a 9 mm/min, como se pudo ver en la sección anterior.

El flujo de condensado es de 135 litros por hora ó 2.25 litros por minuto. Con este flujo de condensado y con la velocidad del nivel de condensado menor de 9 mm/min se dimensionan: los cilindros interno y externo, el cuello y el centro.

9.3.1 Cilindro interno. El cilindro interno es el elemento que recibe el condensado entrante y lo mantiene durante 3 minutos, mientras se lleva a cabo la separación inicial por medio del centro. Durante la separación inicial se recoge la mayoría del aceite que se deposita dentro del centro hasta que éste se llena, cayendo aceite al cilindro externo donde se lleva a cabo la separación restante.

Dentro de este cilindro se encuentra la entrada de condensado que consiste en un embudo y un tubo con un codo en la parte inferior. Además hay un elemento denominado *centro* en forma de embudo invertido cuya función y dimensionamiento se explica más adelante.

Este cilindro tiene el mismo diámetro que el cuello del recipiente principal, (**D**), el cual se toma de 15cm, para facilitar su limpieza manual. Calculando el área base del cilindro interior (**A_{ci}**) tenemos:

$$A_{ci} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (9.1)$$

$$A_{ci} = 177 \text{ cm}^2$$

Se calcula la altura del cilindro como:

$$H_{ci} = \frac{\dot{V} \cdot t}{A_{ci}} \quad (9.2)$$

$\dot{V} = 2250 \text{ cm}^3/\text{min}$ (flujo volumétrico del condensado)

$t = 3 \text{ min}$ (tiempo de llenado del cilindro interno)

Luego $H_{ci} = 40 \text{ cm}$

9.3.2 Cilindro externo. El cilindro externo es el elemento que permite retener la mayor cantidad de condensado. Al tener un volumen mucho mayor que el cilindro interno hace que la temperatura en todo el recipiente llegue a ser prácticamente la misma. Esto es importante porque como se señaló al inicio de la sección 9.2, en pruebas hechas por el profesor Huges y mostradas por Denny [8], después de un tiempo de estar recogiendo condensado en el recipiente separador se comprobó que la temperatura dentro del mismo aumentaba, por lo que el condensado que entraba al separador era más frío que el que se encontraba dentro del recipiente. Como consecuencia de esta diferencia de temperaturas el condensado entrante, por ser más denso, salía directamente por el orificio para el desagüe de agua llevándose consigo los AEs.

El cilindro externo se dimensiona de acuerdo al siguiente procedimiento:

1) Se calcula el área transversal del cilindro externo, (A_{ce}), que tiene la forma de un anillo como:

$$A_{ce} = \frac{\dot{V}}{V_n} \quad (9.3)$$

$V_n = 0.9 \text{ cm./min.}$ Se toma la máxima para calcular el área A_{ce} mínima.

$$\text{Luego } A_{ce} = 2500 \text{ cm}^2$$

2) Se calcula el diámetro de la base del recipiente separador. Se tiene que el cilindro interno ocupa un área de 177 cm^2 y el anillo exterior debe tener el área mayor de 2500 cm^2 , el área de la base (A_b) del separador entero debe exceder los 2677 cm^2 . Por lo tanto el diámetro de la base del recipiente, D_b , es:

$$D_b = \left(\frac{4 * A_b}{\pi} \right)^{1/2} \quad (9.4)$$

$$D_b = 58.38 \text{ cm}$$

Se toma $D_b = 60 \text{ cm}$, esto con el fin de proporcionar un área con un margen de seguridad aceptable.

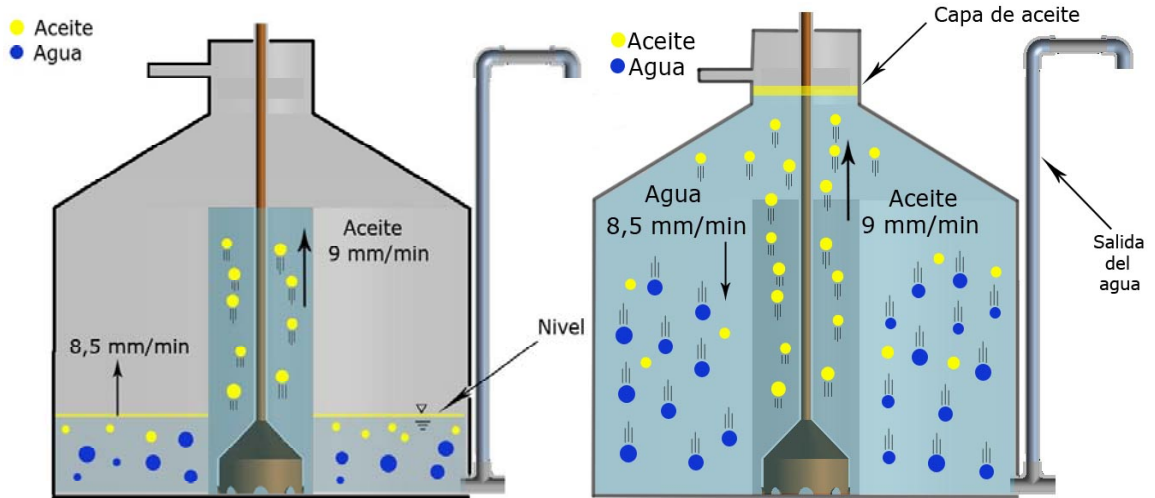
3) Se calcula la velocidad del nivel a partir de un diámetro de base mayor al calculado. Con un área total ahora de 2830 cm^2 , el anillo exterior tendrá el área transversal (A_{ce}) de $2830 - 177 = 2653 \text{ cm}^2$. A un flujo volumétrico del condensado de $2250 \text{ cm}^3/\text{min}$, se calcula la velocidad del nivel como:

$$V_n = \frac{\dot{V}}{A_{ce}} \quad (9.5)$$

$$V_n = 8.5 \text{ mm/min}$$

Esta velocidad es menor que la velocidad de las partículas de aceite que ascienden dentro del condensado (agua-aceite), por lo tanto se garantiza que el aceite llegue a la superficie del condensado y se mantenga allí por la diferencia de densidades (ver Figura 39).

Figura 39. Velocidad de las partículas de agua y aceite



9.3.3 Cuello. La función del cuello del separador es recoger los AEs después de haberse separado del agua y conducirlos (mediante una salida lateral sobre la sección cilíndrica de éste), hacia otro recipiente recolector donde se conservarán y transportarán los AEs.

El cuello está conformado por una sección cónica (reducción) y una sección cilíndrica. La sección cónica está sobre el cilindro externo y tiene un ángulo de inclinación θ . La sección cilíndrica tiene un diámetro D . La altura de la sección cónica, H_{con} , es:

$$H_{con} = \frac{(D_b - D) \cdot \tan(\theta)}{2} \quad (9.6)$$

$$D_b = 60\text{cm}$$

$$D = 15\text{cm}$$

$$\theta = 30^\circ$$

Luego $H_{con} = 12.99\text{cm}$.

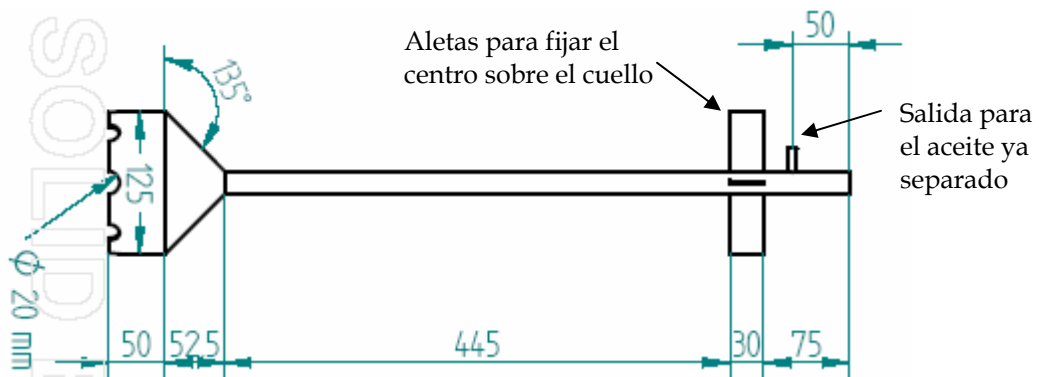
Si se toma la densidad relativa de agua y el aceite como 1.0 y 0.85 respectivamente a la temperatura de separación, entonces una columna de aceite de $1/0.85 = 1.18\text{cm}$ de alto equilibrará a una columna de agua de 1.0cm de alto. Por cada centímetro de aceite que queramos retener en el cuello del separador tenemos que hacer la salida de aceite 0.18cm por encima de la salida de agua, es decir para retener 5cm de aceite en la sección cilíndrica del cuello, la salida de aceite es $5 \times 0.18 = 0.9\text{cm}$ sobre la salida de agua.

La altura de la sección cilíndrica se toma de 10cm, de los cuales 5cm corresponden a la altura de la capa de aceite, dejando 5cm de tolerancia.

En la práctica, hay una cantidad de agua en la parte horizontal (superior) de la tubería de salida de agua (ver Figura 38) que agrega una cantidad variable a la altura de la columna de agua debido a las variaciones en las ratas de flujo de la caldera y la tubería. En general se diseña basándose en la teoría (como se hizo en las secciones anteriores y en ésta) y se tiene en cuenta estas fluctuaciones dejando las juntas finales en la línea de agua (marcado 'R' en la Figura 38) simplemente roscadas y selladas con cinta de Teflón. Entonces la salida de agua puede ajustarse por encima o por debajo dando una o más vueltas a las roscas para satisfacer las condiciones reales. Una vez se han encontrado los ajustes en la práctica, es improbable necesitar ajustes futuros.

9.3.4 Centro. El centro del separador se inserta por el cuello para descansar sobre el fondo en forma de embudo invertido y cercano a la tubería de entrada del condensado. Este dispositivo aumenta la velocidad de separación entre aceite y agua pues ayuda a reducir la turbulencia (causante de la reducción de la velocidad de las partículas de aceite).

Figura 40. Centro del separador



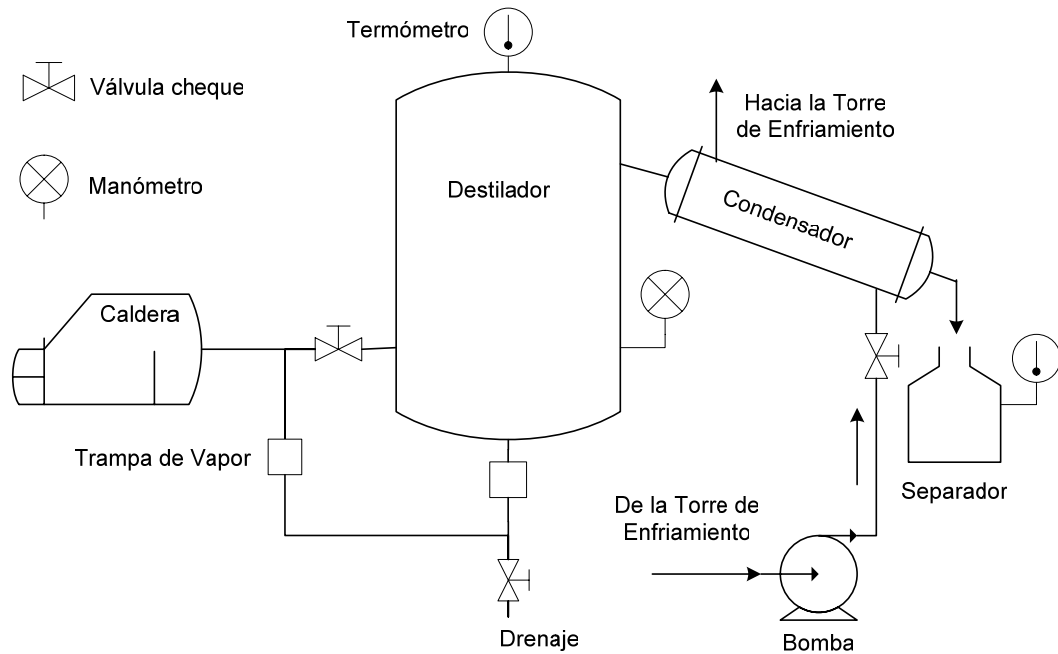
Las dimensiones adoptadas para este centro se pueden ver en la Figura 40. La parte inferior del centro tiene unas ranuras en forma de semicírculos para permitir: primero la entrada de condensado y segundo la salida del agua hacia el cilindro exterior cuando esta se haya separado del aceite.

10 ACCESORIOS

La planta extractora diseñada requiere de una serie de accesorios, como se puede ver en la figura 41, para:

- Conectar los elementos principales que la componen (caldera, destilador, condensador y recipiente separador) mediante tuberías.
- Controlar el sistema para que trabaje a las condiciones de operación (presión y temperatura) mediante válvulas, termómetros, manómetros y trampas de vapor.
- Suministrar agua de enfriamiento al condensador por el lado del casco.

Figura 41. Esquema de la planta extractora



10.1 TUBERÍAS

10.1.1 Caldera-destilador. Como se pudo ver en la sección **6.3.1**, el diámetro del tubo para el distribuidor de vapor fue de 1.5", Cédula 40. Este mismo diámetro se usa para la tubería que conecta la caldera con el destilador. Su longitud depende de la distribución de la planta. Como no se suministró información por parte del CENIVAM acerca del espacio disponible, no se pudo determinar la longitud de la tubería.

Se debe adicionar una T cerca de la entrada al destilador y conectar en la parte inferior de ésta un tubo de mínimo 250 mm de longitud y del mismo diámetro de la tubería principal (1.5" Cédula 40) para la trampa de vapor [28] como se muestra en la Figura 39.

10.1.2 Destilador-condensador. El diámetro nominal de ésta tubería es de 2", Cédula 40, calculado en la sección **6.8.2**. Esta tubería está inclinada 3° con respecto al plano horizontal, para permitir que la pequeña fracción de condensado que llegue a producirse en éste tramo hacia el condensador, pueda desplazarse fácilmente.

10.1.3 Drenaje. El diámetro nominal es de 1.5", igual que la tubería de entrada; esto debido a que se asume que se tiene la mismas condiciones de presión que en la tubería comprendida entre la caldera y el destilador. Tiene una longitud de 6" (152.4 mm) hasta la trampa de vapor (Ver Figura 39). Esta longitud es la recomendada para boquillas con diámetros menores o iguales a 3" (76.2 mm).

El condensado producido dentro del destilador cae por gravedad, pasa luego por la trampa de vapor y finalmente se drena hacia el exterior.

10.2 VÁLVULAS

En la planta extractora se requieren dos válvulas de cheque (ver Figura 39) de 1 ½", la primera para controlar el flujo de vapor proveniente de la caldera y se coloca a la entrada del destilador; y la segunda válvula se ubica en el drenaje del destilador después de la trampa de vapor, sirve para retirar el condensado producido en la tubería comprendida entre caldera -destilador y al interior del destilador durante el proceso.

Figura 42. Válvula de cheque



Fuente: <http://keyhanvalve.20un.com>

10.3 MANÓMETROS

Se utiliza un manómetro en el destilador para que los operarios observen cuales son las condiciones de presión presentadas en el interior y ajustarla a la presión optima de desempeño de la planta extractora en el momento de

realizar las pruebas recomendadas para un eficiente uso de la planta. El tipo de manómetro requerido se muestra en la figura 41.

Figura 43. Manómetro



Fuente: www.bourdon-haenni.com

10.4 TERMÓMETROS

Tienen como función medir las temperaturas de los vapores agua - aceite en el destilador y la temperatura del condensado que se encuentra en el separador. La temperatura del condensado en el separador es de gran importancia porque de ella depende la velocidad de separación de las partículas de aceite dentro del agua, con el termómetro ubicado en el separador se controla que la temperatura del condensado se mantenga a 45° C siendo esta la temperatura de diseño y la recomendada para obtener una optima separación. Se utilizan termómetros de carátula de 1 ½'' con un rango de 0 - 120 °C como se observa en la Figura 44.

Figura 44. Termómetro



Fuente: www.termometal.com

10.5 TRAMPAS DE VAPOR

10.5.1 Función. El trabajo de una trampa de vapor es el sacar aire, condensado y CO₂ del sistema tan rápido como se empiezan a acumular. Asimismo, para una mayor eficiencia y economía, una trampa debe ofrecer además:

- 1) Pérdida mínima de vapor
- 2) Larga vida y servicio seguro
- 3) Resistencia a la corrosión
- 4) Venteo del aire
- 5) Venteo del CO₂
- 6) Funcionamiento con contrapresión
- 7) Libre de problemas por suciedad

10.5.2 Selección. Las trampas se deben seleccionar para que descarguen el condensado producido por pérdidas de radiación durante la operación normal del equipo. Si se seleccionan basados en la carga de arranque se tendrán trampas demasiado grandes que se desgastarán prematuramente.

Las cargas de condensado en una tubería aislada térmicamente se pueden obtener de la Tabla 25. Todos los valores en esta tabla presuponen una eficiencia del aislamiento del 75%.

Para las trampas que se instalan entre la caldera y el final de la tubería se debe aplicar un factor de seguridad de 2. Se aplica un factor de seguridad de 3 para trampas instaladas al final de las tuberías, o antes de las válvulas reguladoras y de cierre que están cerradas por ciertos períodos de tiempo.

Tabla 25. Condensación en tuberías aisladas que llevan vapor saturado en aire sin mover a 21°C

Tamaño de Tubo (in)	Presión, bar(g)								
	1	2	4	8	12	16	32	40	60
	Kilos de Condensado por Hora por Metro								
0.5	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.17	0.19	0.25
0.75	0.05	0.06	0.08	0.11	0.13	0.14	0.21	0.23	0.30
1	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.25	0.29	0.37
1.25	0.08	0.09	0.12	0.16	0.19	0.22	0.31	0.35	0.45
1.5	0.09	0.11	0.13	0.18	0.21	0.24	0.35	0.40	0.51
2	0.11	0.13	0.16	0.22	0.26	0.30	0.43	0.48	0.63
2.5	0.13	0.15	0.19	0.26	0.31	0.35	0.50	0.57	0.75
3	0.15	0.18	0.23	0.30	0.37	0.42	0.60	0.69	0.89

Fuente: Con base en el programa "3Eplus", versión 2.11, de la Asociación de Fabricantes de Aislamiento en Norteamérica (NAIMS), siguiendo el método descrito en ASTM C680

Para una presión de 1.52 Bar, con un tubo de 1.5", se tiene que la pérdida por metro de tubería es de 0.1 kg/hr. Aplicando un factor de seguridad de 3 la pérdida real de condensado sería de 0.3 kg/hr por metro de tubería. Como la cantidad de condensado que se produce es muy poco, las trampas más recomendadas son las termostáticas. Los Parámetros de diseño para Trampas Termostáticas de la marca Armstrong se puede ver en la Tabla 26.

Tabla 26. Parámetros de Diseño para Trampas Termostáticas

	Fuelle de Presión Balanceada		Wafer de Presión Balanceada		
	Acero Inoxidable	Bronce	Acero Inoxidable	Acero al Carbono	Bronce
Material del Cuerpo y la Tapa	Acero Inoxidable	Bronce	Acero Inoxidable	Acero al Carbono	Bronce
Conexiones	1/2", 3/4" 15, 20 mm	1/2", 3/4" 15, 20 mm	1/4" a 3/4" 6 a 20 mm	1/2", 3/4" 15, 20mm	1/2", 3/4", 1" 15, 20, 25 mm
Tipo de Conexiones	Roscadas, Soldadas a Tope	NPT Recta, En Ángulo	Roscadas, Soldadas a Tope	Roscadas, Soldadas a Tope	NPT Recta, En Ángulo
Presión de Operación(bar)	0-20.5	0-3.5	0-28	0-41	0-4.5
Capacidad (kg/hr)	Hasta 1,568	Hasta 726	Hasta 31.8	Hasta 34.9	Hasta 436

Fuente: Catálogo Armstrong.

10.6 BOMBA DE SUMINISTRO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

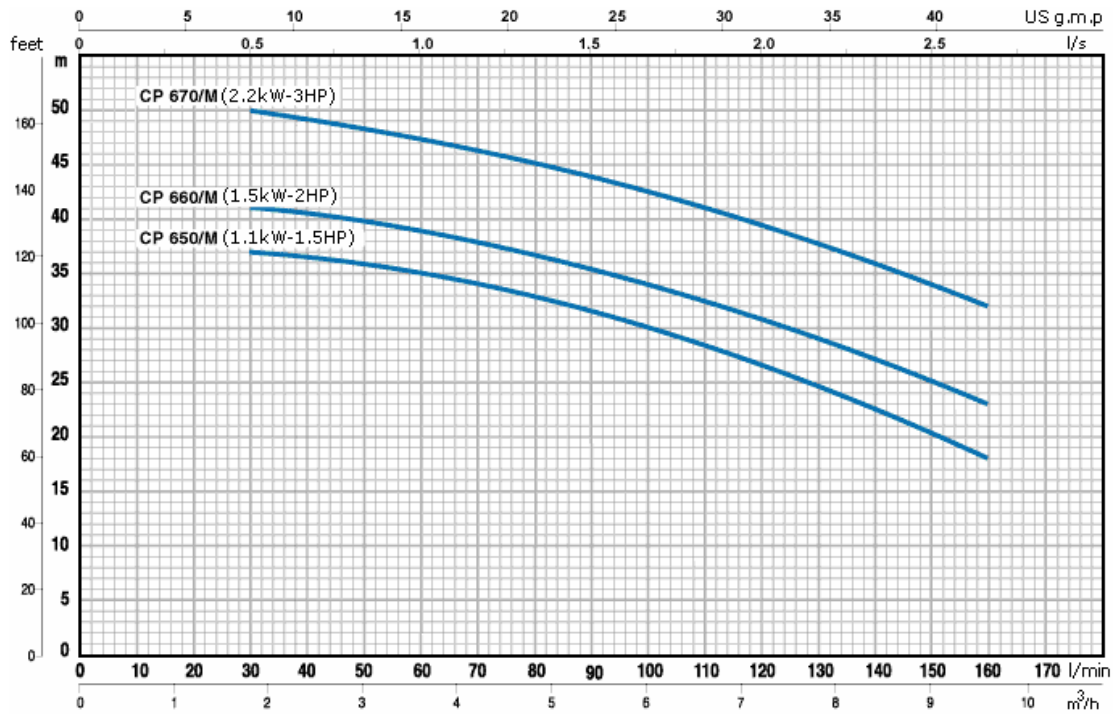
Figura 45. Bomba de suministro de agua



Fuente: <http://www.pedrollo.com>

El flujo de agua requerido para el proceso de condensación es de 1.56 l/s ó 93.6 l/min. Por tanto la bomba seleccionada es una bomba que suministre un caudal mayor a este valor. Teniendo en cuenta estos parámetros y los costos se seleccionó una bomba marca *Pedrollo* modelo CPM 650 que suministra 100 l/min a una cabeza de 30m (ver figuras 45 y 46).

Figura 46. Curva de funcionamiento de la bomba



Fuente: <http://www.pedrollo.com>

11 ANÁLISIS FINANCIERO

11.1 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN

Los valores de los equipos y elementos necesarios para la construcción de la planta extractora de aceite esencial para una capacidad de 300 kg se puede ver en la Tabla 27. Se debe notar en este punto que los costos son a la fecha de realización de este trabajo.

11.2 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.

Dentro de los parámetros establecidos para el desarrollo de la contabilidad, partimos en primera instancia con los costos de producción durante 5 días con 8 horas normales de trabajo a la semana, sabiendo que en un ciclo de 70 minutos se destilan 300 kg de material vegetal.

Los servicios industriales correspondientes al consumo de energía, agua y gas para la caldera, la torre de enfriamiento y la bomba de suministro de agua de enfriamiento del condensador se muestran en la Tabla 28.

En la tabla 29 se muestran los costos de producción de aceite por mes, tomando un estimativo de \$14.67/kg de biomasa fresca de limonaria [10], con un tiempo de vida económico de 36 meses y con un rendimiento en peso de 0.33%; además la planta opera con dos (2) operarios y un supervisor.

Para calcular el costo de la materia prima por mes (biomasa de limonaria), se debe calcular la biomasa requerida por mes, **brm** [kg] de la siguiente manera:

$$brm = \frac{(bc \cdot 60 \cdot tod \cdot ndm)}{tc} \quad (11.1)$$

bc = 300 kg. Biomasa por ciclo.

tod = 8 horas. Tiempo de operación diaria.

ndm = 20 días. Número de días de operación por mes.

tc = 70 minutos. Tiempo de cada ciclo.

brm = 41.142,857 kg.

Tabla 27. Presupuesto de construcción

Nº	Descripción	Cant.	V. unidad	Valor total
1	Caldera de 10 BHP horizontal	1	22'800.000	22'800.000
2	Equipo auxiliar de alimentación de agua	1	4'200.000	4'200.000
3	Tanque suavizador de agua	1	7'430.000	7'430.000
4	Torre de enfriamiento marca PROTON	1	5'200.000	5'200.000
5	Tanque destilador diámetro 1250 mm x 1700 mm en acero inoxidable de 3 mm, apoyos al piso en ángulo de ¼ x 3'' x 80 cm, un distribuidor de vapor en tubería de 1'' SCH 40, apoyos, mariposas, pernos y ganchos para tapa	1	8'787.000	8'787.000
6	Cartucho interior en acero inoxidable φ1143 x 1500 mm calibre 16 con soportes en ángulos de 3/16 x 3'' x 110cm, malla de fondo con soporte y bridas inferior de ¼ x 1080 x 1210 mm y varillas de izaje de 3/8 x 1 m de long.	2	4'480.000	8'960.000
7	Tapa superior abombada fabricada en acero inoxidable de 3 mm diámetro 1250 x 236 mm con brazo auxiliar en perfil en C de 50 x 150 x 1080 mm manijas de anclaje, ganchos y refuerzo lateral	1	3'275.000	3'275.000
8	Tapa inferior abombada fabricada en acero inoxidable de 3 mm diámetro 1219 mm x 230 mm con drenaje de 60 mm y refuerzo en el borde - montaje soldado	1	1'874.000	1'874.000
9	Condensador de tubería de cobre de 42 unidades de ¾ x 1500 mm con bridas de ¾ x 292 mm y carcasa en tubería inoxidable de 8'' SCH 10, caps de 8'' bridados en 5/8'' niples de conexión en 2'' x 157 mm, 9 separadores en acero inoxidable de 2 mm y soportes soldados de ¼ x 76 x 154 mm según planos	1	9'890.000	9'890.000
10	Vaso recolector en acero inoxidable espesor 1mm diámetro 400 mm y altura 478 mm salida en cono, con vaso interno de 132 mm x 300 mm y tubería de ½'' con codos según planos	1	1'390.000	1'390.000
PRESUPUESTO				73'806.000
IMPREVISTOS				7'380.600
IMPUESTOS				11'808.960
PRESUPUESTO TOTAL				92'995.560

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 28. Servicios industriales de la planta extractora

CALDERA			COSTOS
consumo de gas	11	m ³ /h	\$ 1.045.440,00
Consumo de agua	0,141	m ³ /h	\$ 23.579,71
Consumo de Energía	1,34	kW/h	\$ 68.595,14
BOMBA			
Consumo de energía	1,1	kW/h	\$ 56.309,44
TORRE DE ENFRIAMIENTO			
Consumo de energía	0,5	kW/h	\$ 25.595,20
TOTAL COSTOS POR MES			\$ 1.219.519,49

Fuente: Autores del proyecto

El costo de la materia prima por mes, **cmp** [\$], se calcula con la siguiente ecuación:

$$cmp = \frac{brm \cdot cb}{vub} \quad (11.2)$$

cb = 14.67 pesos. Costo de la biomasa por kg.

vub = 36 meses. Vida útil de la biomasa.

$$cmp = \$16.761,90$$

Se calcula ahora el aceite que se puede llegar a producir con base en el rendimiento anteriormente mencionado de 0.33% en peso. Como se tiene que la biomasa requerida por mes es de 41.142,857 kg, entonces el aceite esencial de limonaria producido por mes, **aem** [kg], será de:

$$aem = brm \times rp \quad (11.3)$$

rp = 0.0033. Rendimiento en peso [kg de AE/kg de biomasa] para la limonaria.

$$aem = 135.771 \text{ kg}$$

Tabla 29. Costo total del producto por mes

COSTO TOTAL DE PRODUCTO (POR MES)		
COSTOS DE PRODUCCIÓN	Pesos colombianos	
Materia prima	\$16.791,90	
Mano de obra	\$ 2.000.000,00	
Servicios Industriales	\$ 1.219.519,49	
Mantenimiento	\$ 100.000,00	
Otros	\$ 200.000,00	
TOTAL DE COSTOS DE PRODUCCIÓN		\$ 3.536.311,39
Kg de producto/mes	135,77	
Costo de unidad producida (CUP)		\$ 26.046,34

Fuente: Autores del proyecto

Tomando como referencia el valor del kilo de aceite esencial de limonaria como USD 65.5 (\$144.100,00) [16], las utilidades brutas son de \$118.053,66 pesos por kilogramo de producto; con una producción de 135.77 kg de aceite esencial de limonaria mensual la inversión de los costos de fabricación se recupera en un tiempo de seis meses. El precio del kilogramo de aceite esencial puede ser vendido en \$120.000,00 pesos con el fin de ser una oferta llamativa en el mercado y de atraer más clientes.

11.3 ANÁLISIS COMPARATIVO CONTRUCCIÓN LOCAL VS. IMPORTACIÓN

El costo de importación del equipo se hizo con base en una cotización hecha por la empresa *Newhouse Manufacturing Co.* cuyo costo en EEUU se puede ver en la siguiente tabla. Adicionalmente se muestra el costo de importación y traslado hasta la ciudad de Bucaramanga.

Figura 47. Equipo de extracción de AEs comercial



Fuente: Newhouse Manufacturing Co.

Tabla 30. Costo de importación de una planta de destilación de AEs.

Nº	Descripción	Cant.	Valor unidad	Valor total
1	Caldera de 10 BHP horizontal	1	19'435.000	19'435.000
2	Equipo de destilación con capacidad para procesar 150 GALONES de material vegetal, con condensador y recipiente separador. Tanque y Bomba para alimentación de agua.	3	24'150.000	72'450.000
COSTO EN EE.UU.				91'885.000
COSTO DE IMPORTACIÓN Y TRASPORTE (35%)				32'159.750
COSTO TOTAL				124'044.750

Fuente: Autores del proyecto

Como se puede ver, el costo de importación es mayor que el de fabricación solo en el precio base, es decir, el precio en EE.UU. El costo de construcción (sin el tanque de condensados, el suavizador y la torre de enfriamiento) es de \$72'724.760, mientras que un equipo de similares características con la misma capacidad importado cuesta \$124'044.750. El ahorro que representa para un potencial comprador de la planta extractora es por lo tanto de \$51'319.990

CONCLUSIONES

- Con la realización del presente trabajo de grado se logró diseñar una planta para la extracción de aceites esenciales que cumple con las normas internacionales para la fabricación.
- El diseño y construcción de la planta extractora de AEs es más económica que la importación directa del equipo.
- La producción de aceites esenciales tiene un alto margen de ganancias, por lo cual la inversión inicial de la planta se recupera en corto tiempo haciendo el negocio de los aceites esenciales muy atractivo para pequeños y medianos inversionistas.
- El diseño de esta planta de extracción de aceites es pilar importante en la naciente industria de aceites que se esta promoviendo actualmente en Colombia por parte del centro de excelencia CENIVAM, porque permite la fácil construcción en cualquier taller de metalmecánica del país.

RECOMENDACIONES

- Realizar el diseño del sistema de carga y descarga del cartucho.
- Antes de iniciar la producción de AEs para su comercialización, se recomienda llevar a cabo pruebas con los 3 tipos de herbáceas para calcular los parámetros que influyen en el tiempo de extracción mejorando la eficiencia del proceso.
- Realizar un programa de mantenimiento para la planta de extracción que permita el correcto funcionamiento del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ARMSTRONG.** Guía para la Conservación de Vapor en el Drenado de Condensados. 1998 Armstrong International, Inc. Pág. 18-20
2. **Análisis del Mercado Internacional de Aceites Esenciales y Aceites Vegetales.** Instituto von Humboldt. Colombia. 2002
3. **BANDONI, A. L.** Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, CYTED, Editorial de la universidad de la plata. 2000.
4. **Biocomercio Sostenible.** Estudio del mercado nacional de aceites esenciales. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogota, Colombia. 2003. Pág. 12,13.
5. **BROWN, E.** Stills for essential oils. Colonial Products Advisory Bureau (Plant and Animal). London. 1954
6. **Código A.S.M.E.** Sección VIII División 1. Edición 2001.
7. **CRANE.** Flujo de Fluidos. En válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill. México. 1998
8. **DENNY, Tim.** Field distillation for herbaceous oils. Denny, McKenzie Associates. Australia. 2001. Pág. 31-72, 105, 163-167, 207-244.

9. **DURÁN GARCÍA, Diego Camilo.** Estudio del Aceite Esencial de Lippia Alba (fam verbenaceae) y de los aspectos Fisiológicos en diferentes etapas de su crecimiento bajo tres niveles de luz. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Química. Tesis (pregrado). 2005.
10. **GREEN, Clinton.** Export development of essential oils and spices by Cambodia. C. L. Green Consultancy Services. United Kingdom. 2002.
11. **KUPPAN, T.** Heat Exchanger Design Handbook. 2000. Pág. 263
12. **LEÓN Estrada, Juan Manuel.** Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión. Editorial Inglesa. México. 2001. Figura 81 y Figura 83.
13. **MEGYESY, Eugene.** Manual de Recipientes a Presión. Editorial Limusa. 1992. México. Pág. 213, 306.
14. **Normas T.E.M.A.** Edición 2001.
15. **YOUNG, Warren.** Roark's Formulas for Stress and Strain. Sixth Edition. McGraw-Hill. 1989. Pág. 406
16. <http://www.essentiallyoils.com>

ANEXOS

ANEXO A. TIEMPO DE EXTRACCIÓN EN ACEITES SUPERFICIALES

A.1 HERBÁCEAS MUY ABSORBENTES CON ACEITE SUPERFICIAL

En herbáceas con aceites esenciales muy absorbentes el tiempo de extracción⁶ depende de dos parámetros, cuyo valor numérico es específico de cada herbácea. Estos son:

- El *tiempo básico* designado como t , requerido para destilar un parche⁷ típico de aceite natural formado por una glándula reventada como si no hubiese incremento en su área (del parche) debido a la altura de la carga.
- El Parámetro s , designado como la relación entre el área de un parche de aceite y el incremento de dicha área por unidad de altura de la carga; matemáticamente se define como: $s = a / \delta a$, donde $a = \pi \cdot r^2$, ver figura A.1.

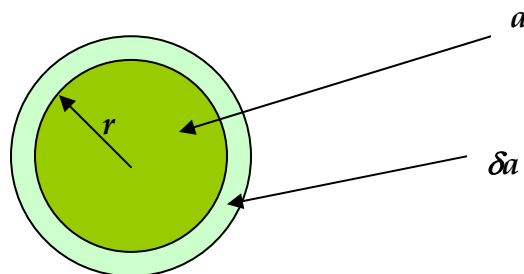


Figura A.1. Parche de aceite y su incremento

⁶ Es el tiempo comprendido después que ocurre el calentamiento hasta el momento en que termina la destilación o un punto final escogido en el cual el flujo de aceite es muy bajo y el proceso deja de ser rentable.

⁷ El parche es una glándula de aceite que se revienta debido al calor suministrado por el vapor y se deposita sobre la superficie de la herbácea.

Este parche de aceite líquido empieza a reducirse por la evaporación del aceite. Un flujo estable de vapor de agua dado, reducirá este radio a cero en t minutos, donde:

$$t = E^{-1} * r \quad \text{Siendo } E^{-1} \text{ la constante de proporcionalidad.}$$

Reemplazando r por a tenemos:

$$t = E^{-1} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{A.1}$$

Durante el calentamiento, un incremento promedio δa es adicionado al área básica a por cada unidad de altura de la carga, luego el área total a una altura de H es:

$$A = a + H \delta a \quad \text{A.2}$$

El tiempo de extracción, T al mismo flujo de vapor es dado por:

$$T = E^{-1} \left(\frac{a + H \cdot \delta a}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{A.3}$$

El factor de incremento en el tiempo de extracción de T a T' , debido al incremento de la altura de carga de H a H' es dado por:

$$\frac{T'}{T} = \left(\frac{a + H' \delta a}{a + H \delta a} \right)^{1/2} \quad \text{A.4}$$

Para dos cargas de prueba observadas con densidades de empaqueo similares y alturas diferentes, podemos evaluar el área básica a en términos del

parámetro s , es decir reemplazando en la anterior ecuación el valor de a por $s \cdot \delta a$.

Con similar razonamiento y usando $s \cdot \delta a$ para a , obtenemos una fórmula de la cual el otro parámetro necesario, el tiempo básico t , puede ser determinado de los resultados de cada una de las cargas de prueba tal que:

$$t = T \left(\frac{s}{s + H} \right)^{1/2} \quad \text{A.5}$$

A.2 HERBÁCEAS LIGERAMENTE ABSORBENTES

La ecuación A.4 es válida para herbáceas muy absorbentes con aceites superficiales, como el aceite de lavanda; en el caso de aceites ligeramente absorbentes la relación entre el tiempo de extracción y la altura de la carga es lineal. Usando menta como un ejemplo típico, Tim Denny mostró que la destilación de sus aceites ocurre en dos fases debido a que los vapores de agua y aceite logran un equilibrio en su composición cuando estos han viajado solo una parte del recorrido total que deben hacer hacia la parte superior de la carga. Las pruebas llevadas a cabo muestran diferentes cantidades de agua requerida para extraer el aceite de cada una de las partes de la carga, es decir, por debajo y por encima del nivel de equilibrio. En la figura Y se muestra las curvas de aceite producido por agua condensada para dos cargas con diferentes alturas y áreas. El gradiente de temperatura y el equilibrio en la composición del vapor ocurre durante el calentamiento inicial, a un nivel por debajo del tope de la carga.

La razón entre aceite y agua destilada para recuperar aceite por encima del nivel de equilibrio se calcula a partir de la parte recta de la grafica. El área de la sección transversal del destilador y la parte curvada revelan la cantidad de agua por m² requerida para extraer el aceite por debajo del nivel de equilibrio.

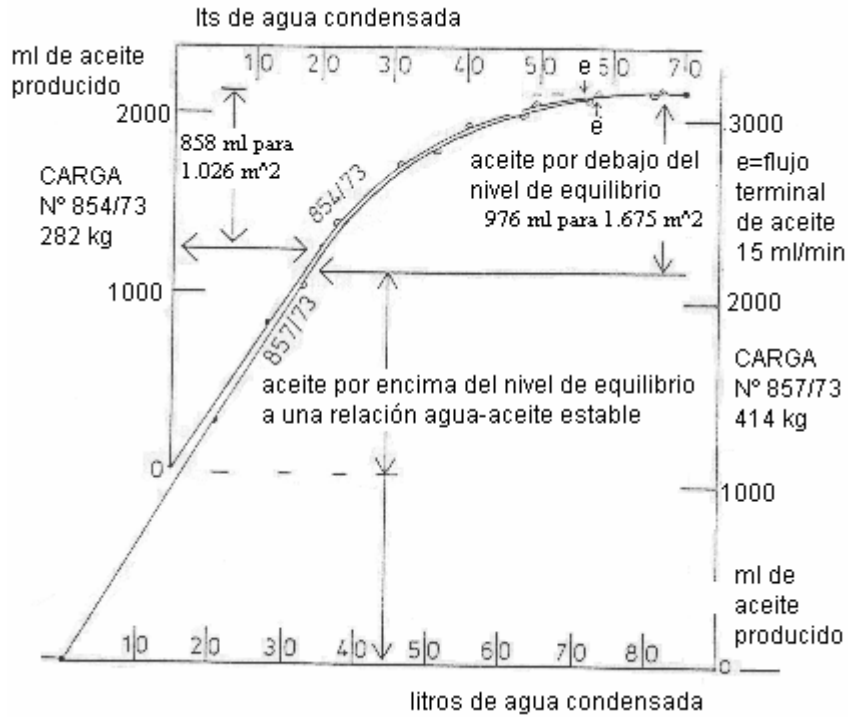


Figura A.2 Destilaciones de dos cargas de menta

Si las dos cantidades de agua que se requieren para recuperar el aceite por encima y por debajo del nivel de equilibrio son calculadas y son sumadas, el resultado puede dividirse por la rata de agua destilada para obtener el tiempo de extracción de un aceite ligeramente absorbente.

El tiempo de extracción se puede calcular a partir de la siguiente relación:

$$T = \frac{(K_1 \cdot A + K_2 \cdot W)}{\dot{m}_v} \quad [\text{min}]$$

Donde $K_1 = m_v - (v_{ar} / v_{av})$

m_v : masa de agua condensada por debajo del nivel de equilibrio [Kg./m²]

v_{ar} : volumen de aceite que se recupera [ml/m²]

v_{av} : pendiente de la parte recta en la figura X [ml/lit]

A : área de la sección transversal del destilador [m²]

$K_2 = 1/v_{av}$

$W = V_a \cdot M_h$: aceite recuperado [ml]

V_a : contenido de aceite por Kg. de hierba o rendimiento [ml/Kg.]

M_h : masa de la herbácea [Kg.]

\dot{m}_v : Flujo másico del vapor [Kg. /min]

ANEXO B. ANALISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE SOFTWARE CAE

Al realizar los diseños de los elementos constitutivos de la planta para la extracción de aceites, se observó que varias secciones necesitaban un análisis detallado, debido a su complejidad geométrica y situaciones de carga poco comunes, se utilizó el programa de ingeniería asistido por computadora ANSYS WORKBENCH 10.0 que realiza simulaciones basados en el método de elementos finitos para optimizar el diseño de dichos elementos.

B.1. BASE DEL CARTUCHO

En la figura B.1 se observa las condiciones a las cuales esta sometida la base del cartucho, para generar la simulación se asume:

- El peso del material vegetal (3000 N) se ejerce completamente sobre la base y sus refuerzos.
- El apoyo del cartucho es un soporte fijo con el fin de generar un mayor esfuerzo que el producido bajo las condiciones reales en la cual el cartucho esta simplemente apoyado y se localiza en la cara circunferencial de la lámina inferior.

Los resultados de esfuerzos generados por las condiciones de carga se muestran en la figura B.2, Donde observamos que el máximo esfuerzo resultante tiene un valor de $2,811 \cdot 10^7 Pa$ el cual está por debajo del máximo esfuerzo permisible del material a la temperatura de operación y se localiza en la zona central de la base del cartucho como se muestra en la figura; para generar estos esfuerzos se tuvo como parámetro el criterio de Von mises.

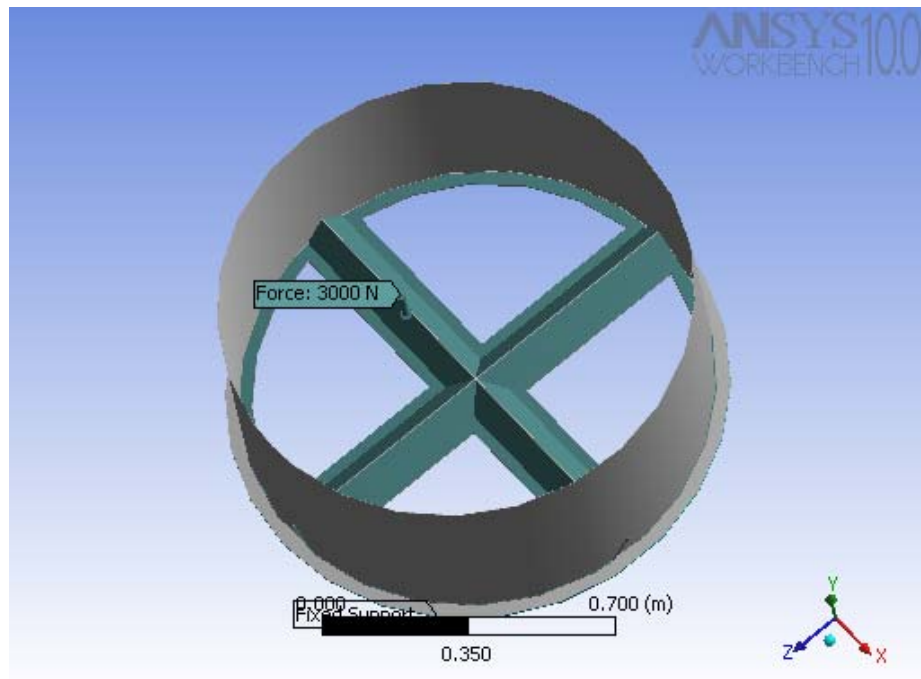


Figura B.1. Condiciones de carga de la base del cartucho

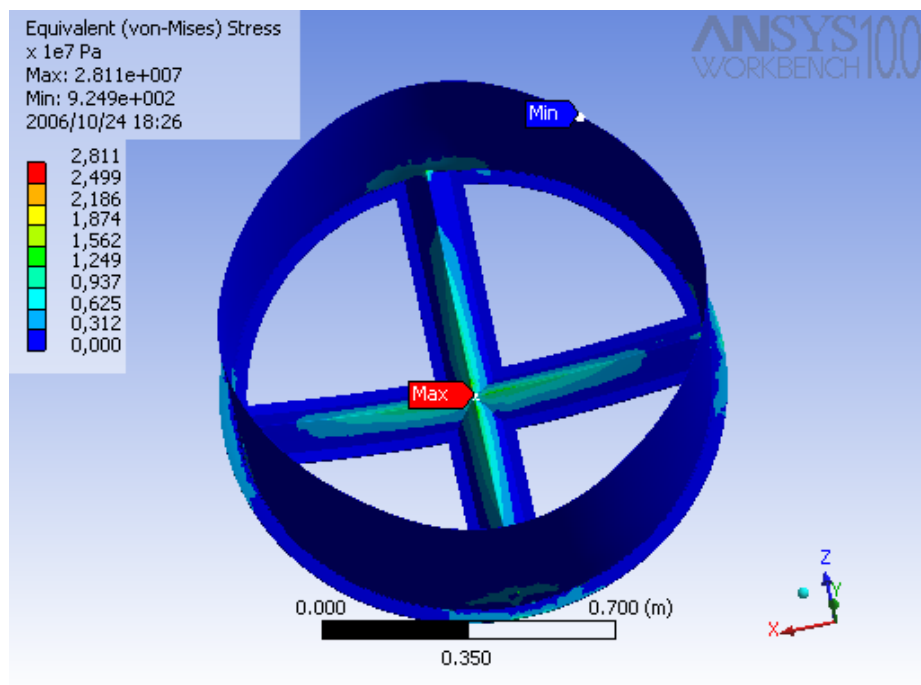


Figura B.2. Esfuerzos generados en la base del cartucho

La figura B.3 muestra la deformación sufrida por la base del cartucho, la máxima deformación ocurre en el centro del cartucho como se puede observar según el mapa de colores utilizado y tiene un valor igual a 0.1579 mm .

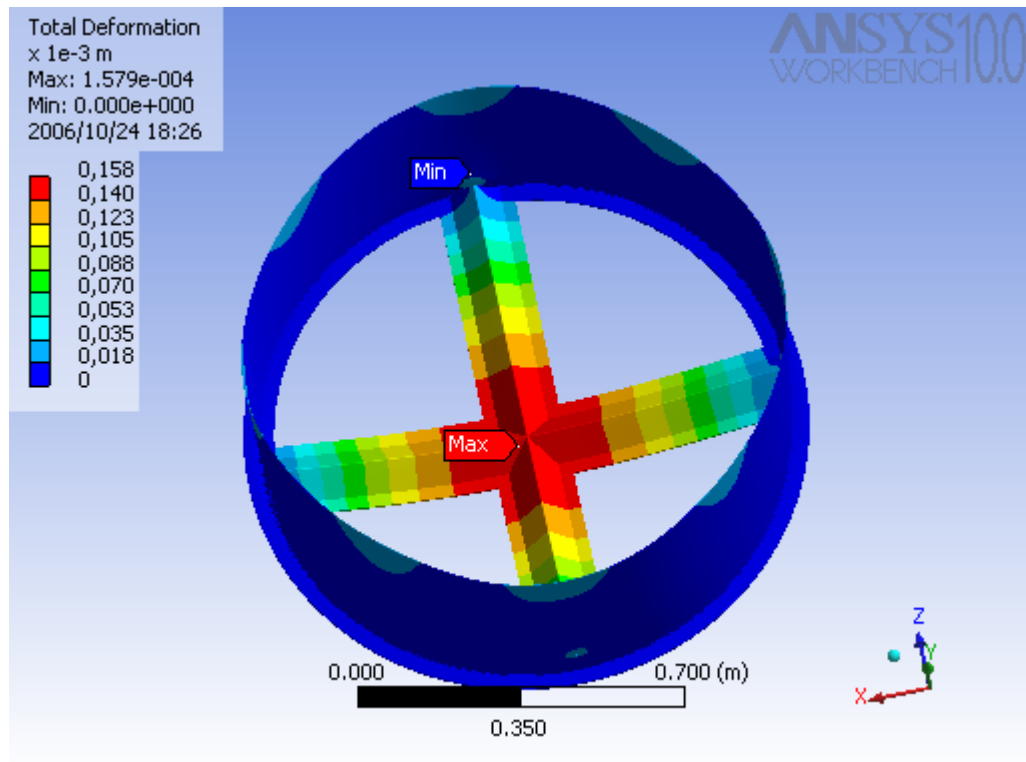


Figura B.3 Deformación de la base del cartucho

En la figura B.4 esta representado del factor de seguridad de la base del cartucho generando un factor de seguridad mínimo de 7.364 localizado en la zona crítica de la pieza (la zona con mayor esfuerzo).

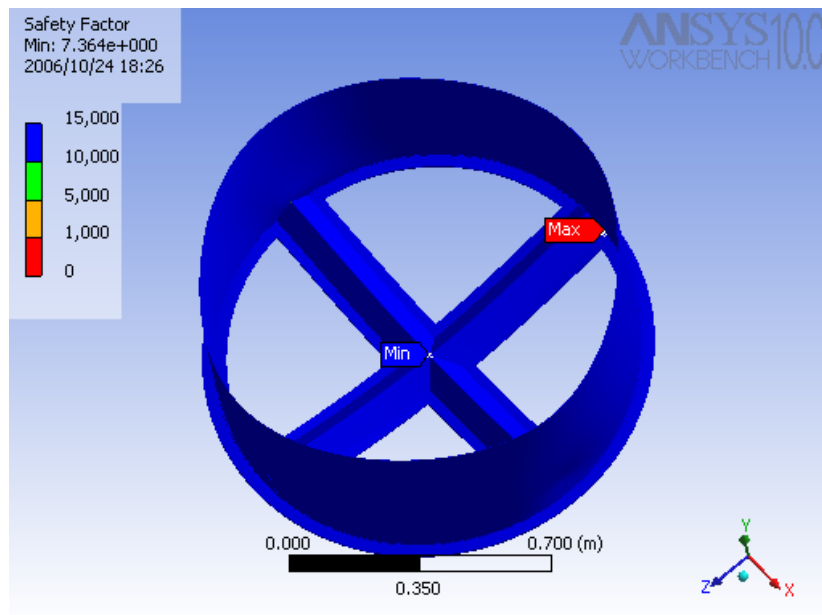


Figura B.4. Factor de seguridad de la base del cartucho

B.2 SOPORTE DEL CARTUCHO

En las figuras B.5 a B.8 se observan las condiciones de simulación, esfuerzos equivalentes generados según el criterio de Von Mises, la deformación total y el factor de seguridad respectivamente para el soporte del cartucho.

La simulación está ajustada a un análisis estático de la estructura, donde las cargas estructurales se deben al peso del material vegetal y el peso del cartucho que sumadas dan en total una fuerza de 5000N. Los soportes estructurales están determinados por un soporte fijo en la cara circunferencial externa del soporte debido a que esta soldada a la pared del destilador (ver figura B.5).

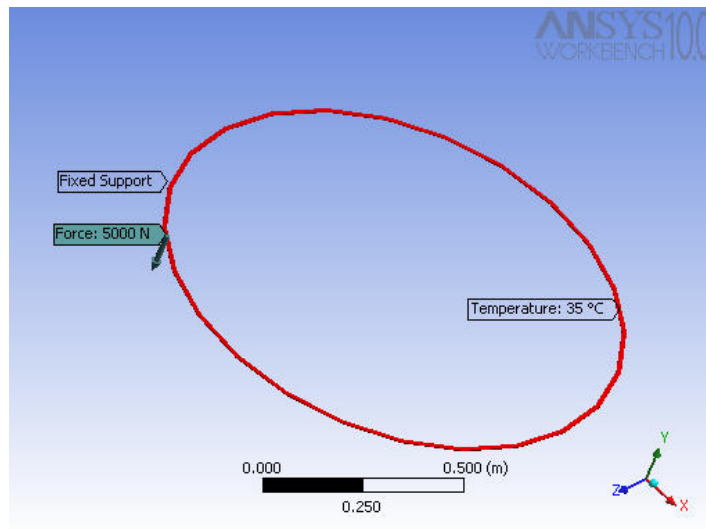


Figura B.5. Condiciones de carga para el soporte del cartucho

Los resultados del análisis realizado revelan un esfuerzo equivalente máximo igual a $2.81 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ que se encuentra por debajo del esfuerzo máximo permisible del material bajo condiciones de operación (ver figura B.6). La deformación total del soporte se muestra en la figura J.7 con un valor máximo de 0,158 mm.

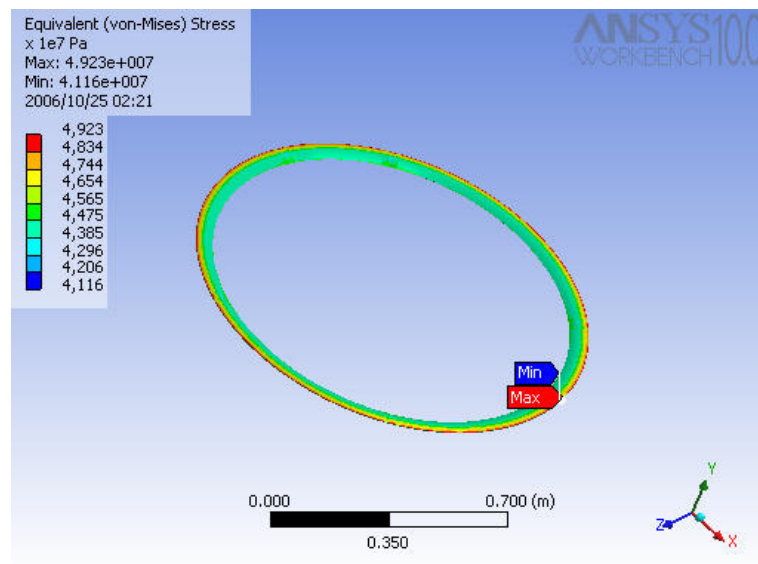


Figura B.6. Esfuerzos equivalentes generados para el soporte del cartucho

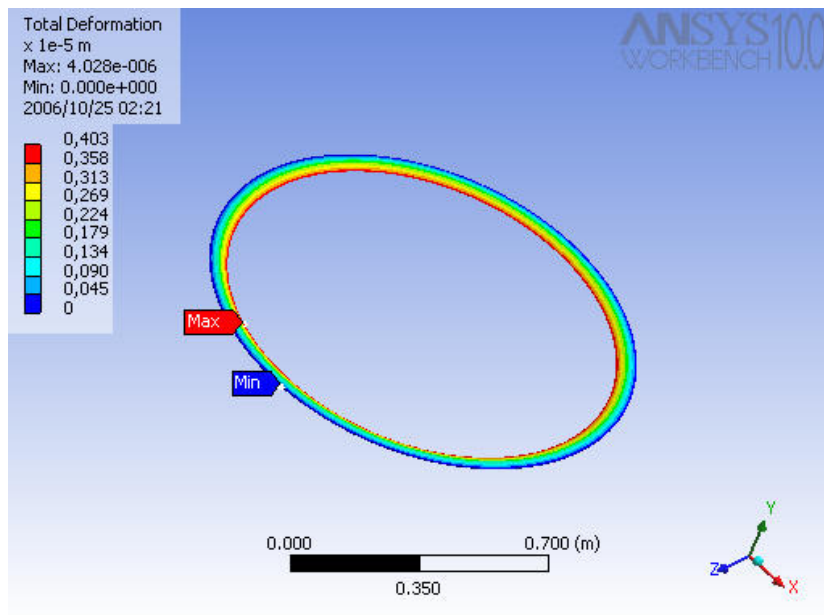


Figura B.7. Deformación total del soporte del cartucho

El factor de seguridad de este elemento basado en el esfuerzo del limite elástico del material en las condiciones de trabajo es 4.362 lo que asegura un buen funcionamiento del elemento ver figura B.8.

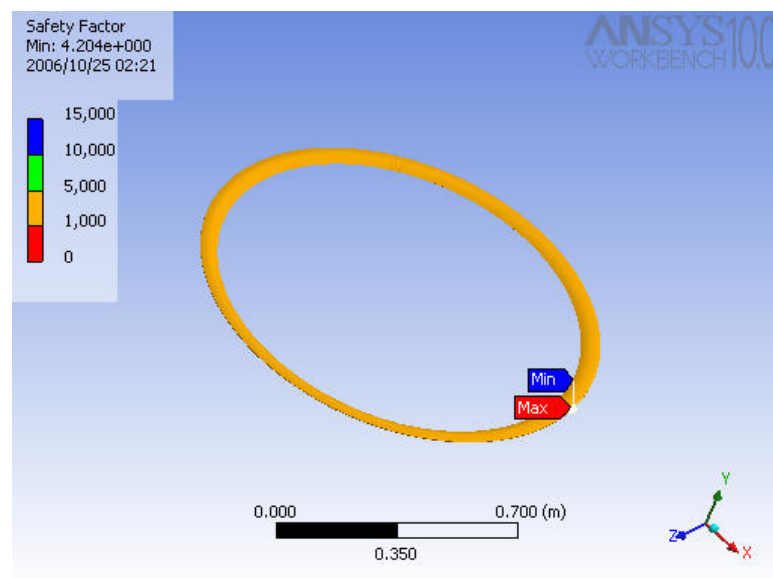


Figura B.8. Factor de seguridad del soporte del cartucho

B.3. DESTILADOR

La simulando recrea la situación en la cual el destilador es izado para ser colocado en su lugar de operación, Tomando el peso del destilador igual a media tonelada (500 Kg.) sugerimos la elevación del destilador mediante un cable o cadena formando un Angulo de 30° con la vertical unida a los elementos de izado. Como resultado de la simulación se obtuvo mayores esfuerzos en las zonas circundantes de los elementos de elevación, al igual que la mayor deformación.

En las figuras B.9, B.10, B.11 y B.12 se observan las condiciones de simulación, esfuerzos equivalentes generados según el criterio de von mises, la deformación total y el factor de seguridad respectivamente para el destilador.

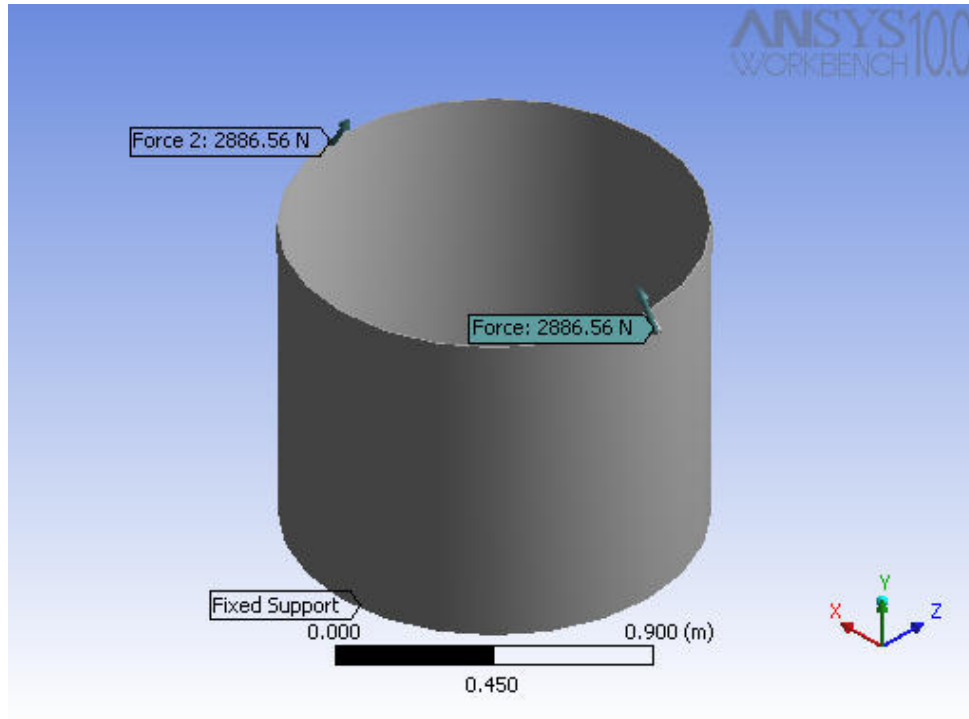


Figura B.9 condiciones de carga del destilador

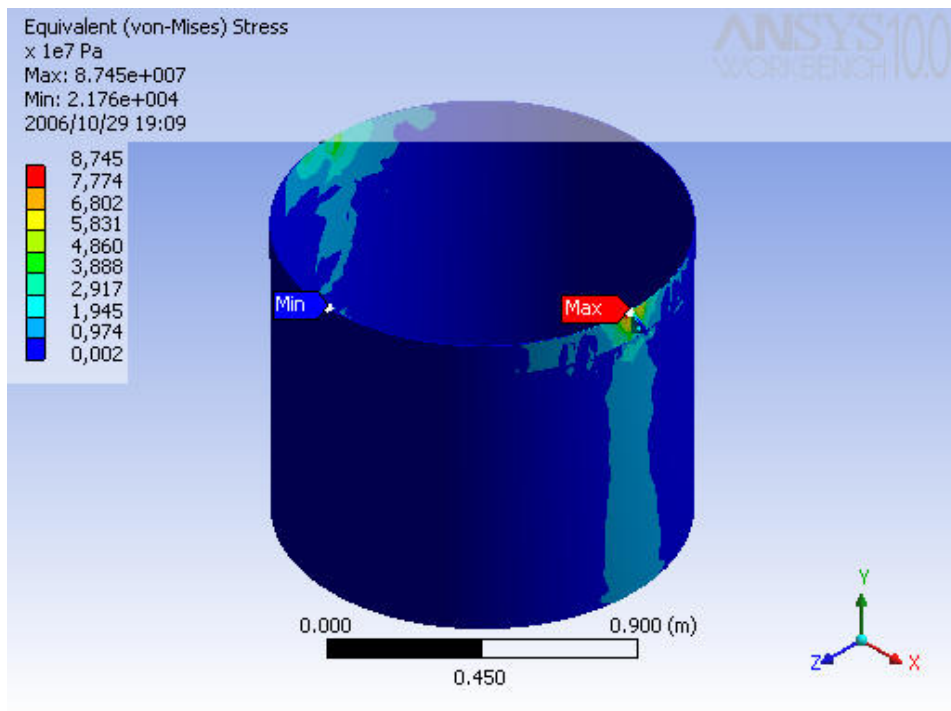


Figura B.10 Esfuerzos equivalentes en el destilador

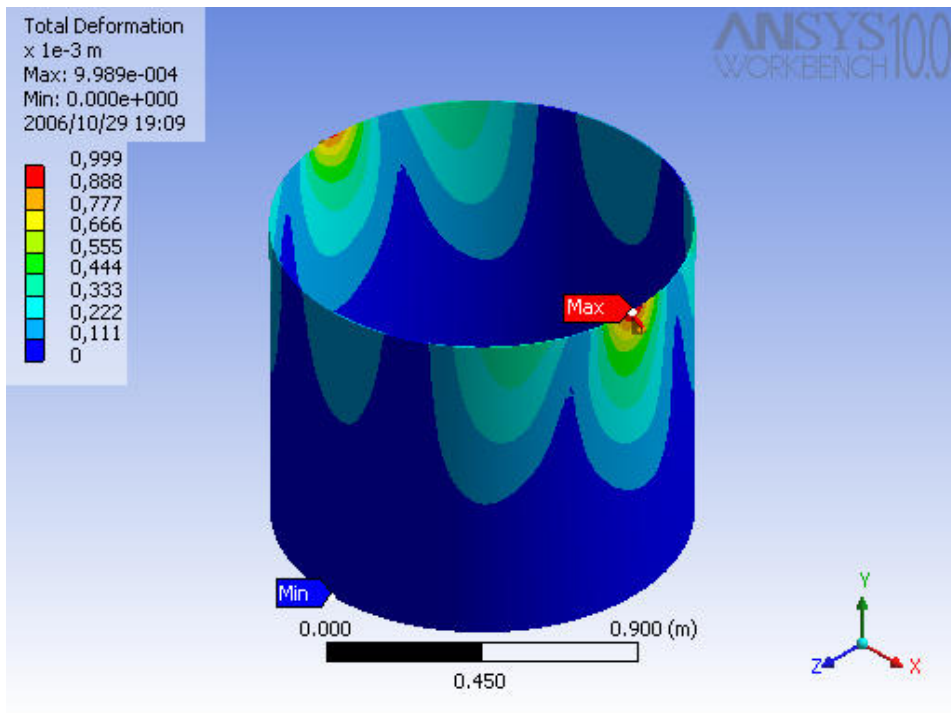


Figura B.11 Deformación en el destilador

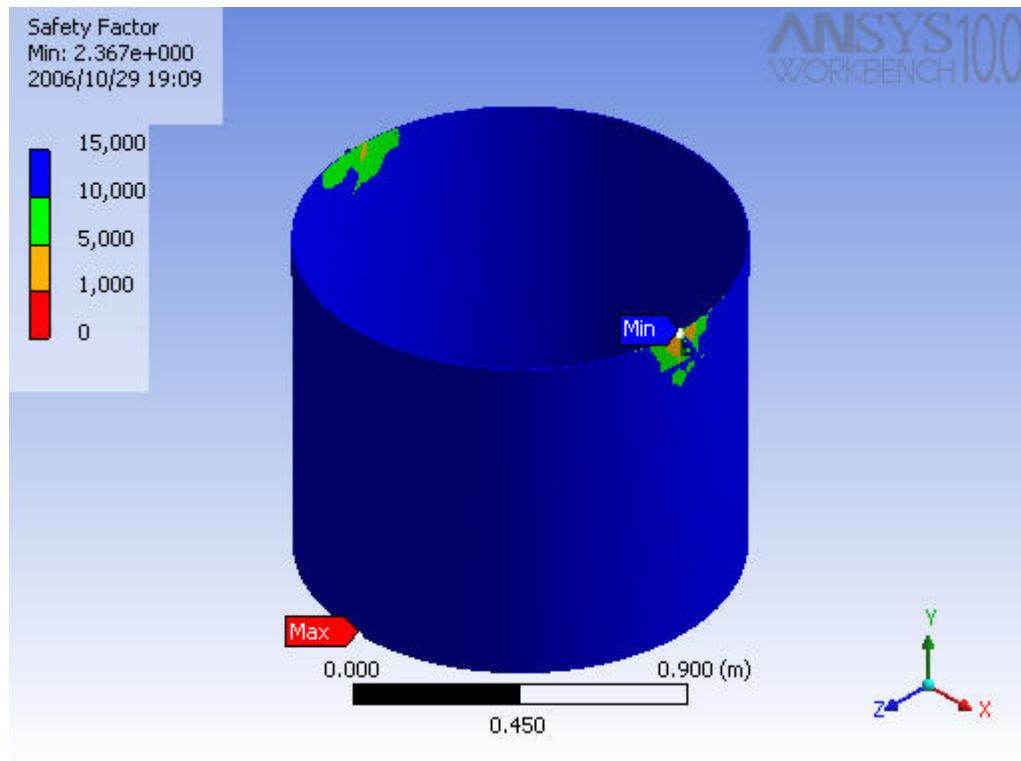


Figura B.12 Factor de seguridad en el destilador

ANEXO C. SELECCIÓN DE LA CALDERA Y SU EQUIPO AUXILIAR

Para el suministro de vapor se seleccionó una caldera pirotubular de 10 BHP que entrega 310 lb. /hora (141 kg/hora), marca **Continental** cuya cotización se puede ver a continuación. Esta caldera tiene una presión de operación máxima de 120 psig. Aunque en el mercado colombiano existen calderas de baja presión (hasta 15 psig), el costo de estas calderas es el mismo que una caldera de 120 psig por lo que se optó por esta última.

La caldera es horizontal ya que esta disposición permite mayor facilidad en el mantenimiento, y como no hay restricciones de espacio que hicieran pensar en el uso de una caldera vertical.

En la cotización se incluye además el tanque de condensados y el equipo externo de tratamiento del agua de caldera que consiste en un suavizador.

Bogotá, Septiembre 8 de 2.006

C-592



COTIZACIÓN No. 164

Señores

CENIVAM UIS

Att. Qco. Diego Camilo Duran García / Ing. Wilmer Alberto Arias

Carrera 27 Calle 9 Ciudad universitaria

Edificio Camilo Torres, Oficina 233

Tel. 6344000 Ext. 2786 Fax 6454104

E mail: diegocamilo24@yahoo.com

Bucaramanga

Estimados Señores

En atención a su solicitud, gustosamente nos permitimos cotizar los siguientes equipos en los cuales se encuentran interesados:

1. CALDERA DE 10 BHP HORIZONTAL

Una caldera horizontal

Modelo

Operación

Capacidad

Generación a 212 °F

Presión de trabajo máxima

Presión de prueba hidrostática

Combustible

Para operar a

Marca "CONTINENTAL"

F10C-G

On-Off con arranque a fuego bajo

10 BHP

345 Libras/hora

150Psig

225 Psig

Gas natural

La altura de Bucaramanga

PRECIO FOB PLANTA BOGOTÁ

\$ 22.800.000

ALTERNATIVA

Caldera horizontal de características similares a la anterior pero provista de quemador para trabajar con ACPM como combustible.

PRECIO FOB PLANTA BOGOTÁ \$ 19.300.000

2. CALDERA DE 10 BHP VERTICAL

Una caldera vertical	Marca "COLUMBIA"
Modelo	CT10C-G
Operación	On-Off
Capacidad	10 BHP
Generación a 212 °F	345 Libras/hora
Presión de trabajo máxima	150 Psig
Presión de prueba hidrostática	225 Psig
Combustible	Gas natural
Para operar a	La altura de Bucaramanga

PRECIO FOB PLANTA BOGOTÁ \$ 17.900.000

ALTERNATIVA

Caldera vertical de características similares a la anterior pero provista de quemador para trabajar con ACPM como combustible.

PRECIO FOB PLANTA BOGOTÁ \$ 16.800.000

3. EQUIPO AUXILIAR DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

Tanque de retorno de condensados, capacidad	30 Galones
Una motobomba de alimentación de agua	4 GPM

PRECIO FOB PLANTA BOGOTÁ \$ 4.200.000

IVA NO INCLUIDO. SE LIQUIDARÁ A LA TASA VIGENTE EN EL MOMENTO DE FACTURAR.

NOTA: La caldera se construye y esta dotada de conformidad con el Código ASME vigente.

El vaso de presión esta fabricado con materiales de Calidad Certificada. Una copia de estos certificados se entregará al Comprador con el equipo.

CALDERAS CONTINENTAL LTDA. entregará con el equipo un Manual de Instrucciones sobre su Operación y Mantenimiento y un Manual de Control de Calidad que incluye los siguientes documentos:

- **Copia de los Certificados de Calidad de la lámina y de la tubería utilizadas en la fabricación del vaso de presión.**
- **Copia de los análisis radiográficos de las soldaduras sometidas a tensión**
- **Copia del registro del tratamiento térmico de alivio de tensiones**
- **Copia del registro de prueba hidrostática al vaso de presión de la caldera**

NOTA: La presente oferta no incluye ninguna obra civil ni de instalaciones mecánicas ni eléctricas.


La presente oferta incluye la puesta en marcha de la caldera cuando el Comprador nos notifique que se encuentran listas las instalaciones a su cargo, o a cargo de otros contratistas, así como los servicios necesarios para tal efecto.

PLAZO DE ENTREGA 60/70 días después de recibir el anticipo

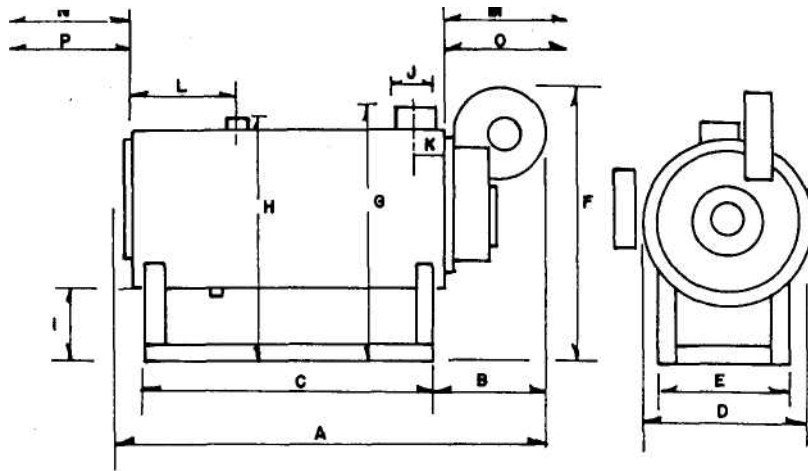
FORMA DE PAGO 50% Anticipo
40% más el valor total del IVA a la entrega de los equipos FOB Planta, previo al despacho.
10% a la puesta en marcha o a los sesenta (60) días después de la entrega física de los equipos, lo que se cumpla primero.

VALIDEZ DE LA OFERTA 30 días

Cordialmente,


DIANA BARBOSA RAMIREZ
Gerente General

RMZ



NUMERO DE MODELO

F10C-2

F18C-2

CABALLOS DE VAPOR		10	16	
LONGITUD	TOTAL	A	1.77	2.10
	BASE A FRENTE	B	0.47	0.48
	BASE	C	1.16	1.47
ANCHO	EN CAMISA	D	0.65	0.83
	BASE	E	0.4»	0.49
ALTURA	TOTAL	F	1.265	1.265
	PISO A CHIMENEA	G	1.2»	1.29
	PISO A UNION SALIDA VAPOR	H	1.16	1.16
	PISO A CAMISA	I	0.82	0.22
CHIMENEA	DIÁMETRO (NOMINAL)	J	0.20	0.20
	LOCALIZACIÓN	K	0.11°	0.11°
	LOCALIZACIÓN	L	0.38	0.42
SALIDA DE VAPOR	TAMAÑO 150 P.S.I. 300**		1"	1"
	RECORRIDO PUERTA DELANTERA	M	0.92	0.92
LUZ	RECORRIDO PUERTA TRASERA	N	0.60	0.60
	CAMBIO FRONTAL DE TUBOS	O	0.92	1.07
	CAMBIO TRASERO DE TUBOS	P	0.78	1.06
	LONGITUD MINIMA DEL CUARTO DE CALDERAS PARA CAMBIO O LIMPIEZA DE TUBOS			
CONEXIONES	PARTE DELANTERA		3.28	3.77
	PARTE TRASERA		3.43	4.06
	AGUA DE ALIMENTACIÓN		3/4"	3/4"
CONEXIONES	PURGA (100 A 200 P.S.I.)		1"	1"
	ORIFICIOS DE INSPECCIÓN		3	3
	ENTRADA Y SALIDA DE COMBUSTIBLE		3/8"	3/8"
SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO FT2 (LADO DE FUESO		40	63	
VAPOR LIBRAS/HORA A 212° F		346	618	
BTU SALIDA (1000 BTU/HR)		336	602	
CONTENIDO DE AGUA (NIVEL NORMAL) Lbs			657	
COMBUSTIBLE LIVIANO (ACPM) G.P.H.		3	4.6	
PESO APROX. DE EMBARQUE KGS		600	800	
CONSUMO GAS NATURAL M³/HR		11.8	17.7	

Bogotá, D.C. Marzo 08 de 2006

Señores:

cotización # S-118-06

CENIVAM U.I.S.

Fax. (076) 6454104

E-mail: cenivam@tucan.uis.edu.co

Bucaramanga - Santander.

Atención : Dra. ELENA E. STASHENKO

Referencia : **COTIZACION TANQUE SUAVIZADOR DE AGUA**

Apreciados Señores:

*Atendiendo su amable solicitud, a continuación encontrarán la oferta para el suministro del siguiente equipo **F.O.B.** nuestra Planta de Bogotá:*

1. **UN TANQUE DE TRATAMIENTO DE AGUA SUAVIZADOR DE INTERCAMBIO IONICO-CATIONICO CAPACIDAD 10 G.P.M. Ref. D14" x 60" L, diseñado para Calderas de (20 a 100 B.H.P), completo con tanque vertical, 5 válvulas para servicio, retrolavado, regeneración y enjuague, 1 válvula-registro para desairear, 1 eyector para la línea de salmuera, 1 manómetro, resina 2.5 ft3 de zeolita y tanque plástico para solución de salmuera capacidad 250 lts. Se incluye la sal para el tanque y manual de manejo y operación.**

Por valor de

:\$ 7.430.000

Tiempo de Entrega

:15 a 30 días.

Notas para envío equipos a otras ciudades:

- ☆ El sitio de entrega de los equipos cotizados es **F.OB.** nuestra planta Bogotá
- ☆ El transporte y gastos de envío a otra ciudad serán por cuenta del comprador.
- ☆ En caso que los equipos cotizados sean transportados en camión con otros paquetes o mercancías deberán ser enguacalados y tendrán un costo adicional.

Tiempos de entrega sujetos a verificación en fábrica en el momento de su pedido.

Condiciones Comerciales.

- ◆ I.V.A. : 16 % Adicional.
- ◆ Validez Oferta : 30 días.
- ◆ Forma de Pago : 50% al pedido, Saldo equipos antes de despacho .
- ◆ Garantía : 1 Año contra defectos de fabricación.

Cordialmente,

ESPERANZA CÁRDENAS B.

INGENIERIA Y PROYECTOS.

Tels. 2 227811 - 2 223395

Fax. 2 220656

E-mail: tecnik@telecom.com.co

ANEXO D. SELECCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La selección de la torre de enfriamiento se hizo teniendo en cuenta el rango de temperaturas en la entrada y salida del condensador y el flujo de agua de enfriamiento requerido para el proceso de condensación. A continuación se muestra una cotización de una torre de enfriamiento marca PROTON de tiro inducido.



Tel . (571) 564 30 66 - 260 47 06 Fax: (571) 261 33 78
 Cra 53A No 9-42 Bogotá, O.C. -Colombia
 E-mail: info@proton-colombia.com
www.proton-colombia.com
 A.A. 12597

COTIZACIÓN No. 264245
BOGOTÁ, D.C.
11 de Agosto de 2006

Señores.

CENIVAM UNION TEMPORAL

Atn. Ing. **RONALD GRANADOS/WILMER ARIAS**

Tel.: (7) 645 41 04 / 645 39 83

Fax.: (7)

EMAIL: cenivam@tucan.uis.edu.co

BUCARAMANGA

Respetados Señores:

De acuerdo a su amable solicitud, tenemos el agrado de cotizar una torre de enfriamiento para agua limpia de tiro inducido y contraflujo para operar en la ciudad de Bucaramanga, la cual va a manejar un caudal máximo de 30 GPM. Las características del equipo se describen a continuación.

CONDICIONES DE OPERACIÓN:

Caudal de Agua:	6.8 m ³ /h	(30 GPM)
Temperatura de entrada de agua:	45 °C	(113 °F)
Temperatura de salida de agua:	30 °C	(86 °F)
Temperatura de bulbo húmedo:	25 °C	(77 °F)
Enfriamiento:	15 °C	(27 °F)
Aproximación:	5°C	(9°F)
Potencia Térmica efectiva:	102.000 Kcal/h	(405.000 Btu/h; 33.7TR)

CARACTERÍSTICAS DE LA TORRE

MODELO DESCRIPCIÓN PP40N

GENERAL

Torre de tiro inducido en contraflujo, marca PROTON, en poliéster reforzado con fibra de vidrio, relleno tipo filmico multicelda, diseñadas bajo los parámetros del CTI (COOLING TOWER INSTITUTE) según corrida del programa anexa

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MAQUINARIA

Filtros Prensa, Rotativos, de Bolsa y de Cartucho, Lonas Filtrantes, Torres de enfriamiento, Sistemas de Vacío, Calderas de Aceite Térmico, Calderas de Vapor Clayton, Molinos Laminadores, Electro Imanes, Hornos, Secadores, Transportadores, Mezcladores, Plantas de Tratamiento de Agua, Bodegas Metálicas

CONSTRUCCIÓN:	Estructura en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) según normas ASTM C-582 e ICONTEC NTC-2888. Los diferentes cuerpos de la torre poseen recubrimiento exterior en gelcoat poliser azul con protección UV.
FORMA:	Prismática, con ventilador en la parte superior.
DIMENSIONES:	Largo: 750 mm Ancho: 750 mm Alto: 2,400 mm
RELLENO: ELIMINADOR	Plástico multicelda de C.P.V.C. Modular, fácilmente desmontable para mantenimiento, auto-extinguible, origen USA.
DE GOTA:	En CPVC para alta temperatura, tipo celular de tres (3) pasos, modular, fácilmente desmontable para mantenimiento y limpieza, auto-extinguible, origen USA.
VENTILADOR:	Uno axial de 600 mm de diámetro, balanceado dinámicamente, con bajo nivel de ruido, acoplado directamente al motor.
MOTOR:	Uno de 1 HP a 1200 RPM 3x220/440V. 60 Hz, con aislamiento especial de bobinados, rodamientos tipo 2RS, sello entre los escudos y la carcasa así como entre la caja de conexiones y el motor, adecuado para operar en ambientes húmedos. Protección IP-65. El motor está previsto para operación continua.
DISTRIBUCIÓN DE AGUA:	Por boquillas centrífugas en polipropileno, de orificio amplio, modelo B-4000-P.
PRESIÓN REQUERIDA EN LAS BOQUILLAS:	0.7 bar. (10psi.)
TANQUE:	Incluido de 85 It de capacidad útiles en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

VALOR DE UNA TORRE PP 40 N
E.X.W. BOGOTÁ

\$ 5'200.000.00 + IVA

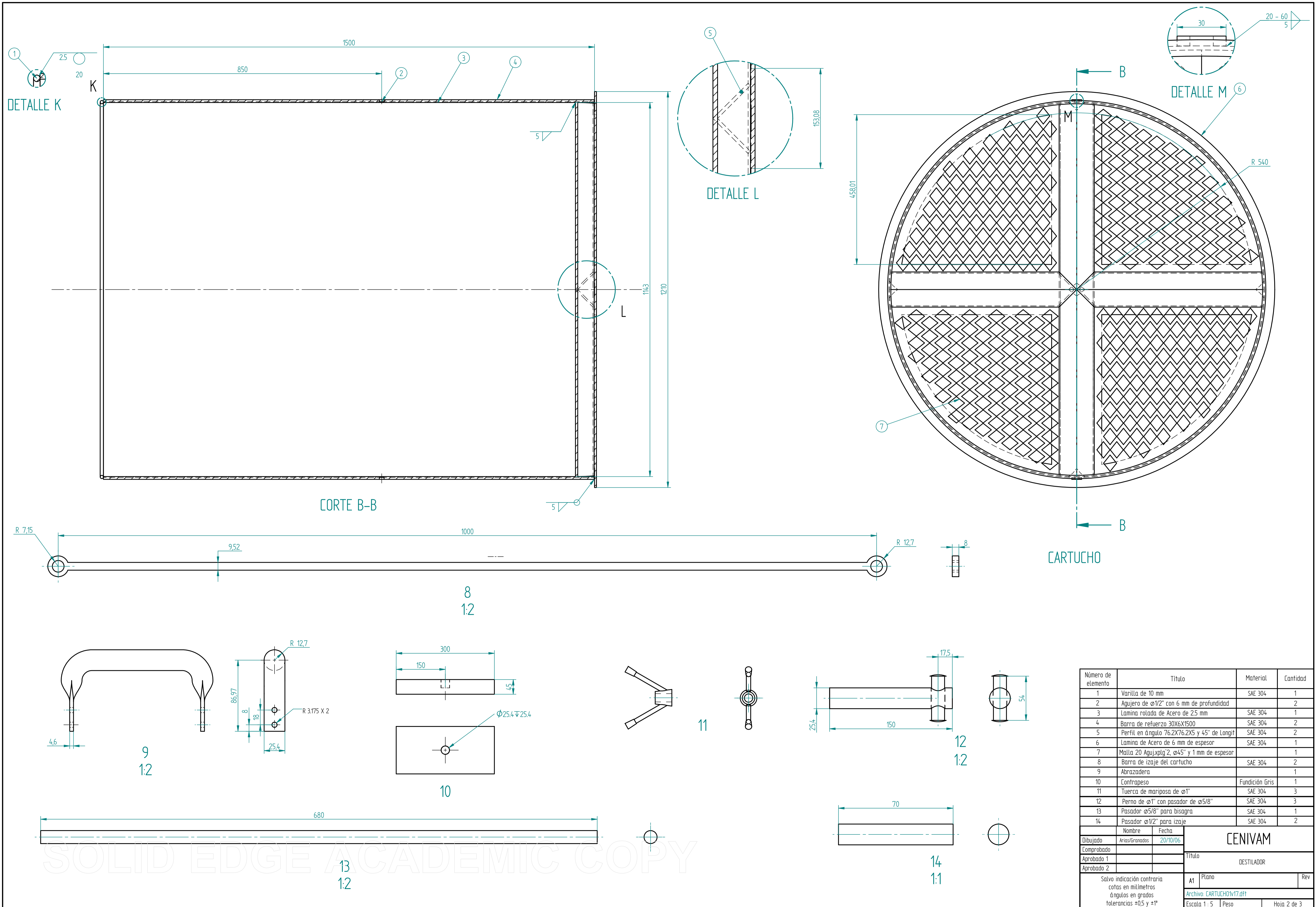
ANEXO E. INSTRUCCIONES PARA OPERAR LA PLANTA DE DESTILACIÓN

Como se trabaja con vapor de agua a 100° C, es necesario tener precauciones como usar guantes aislantes y gafas de protección durante la operación de la planta. Se deben tener en cuenta además las siguientes instrucciones:

- Primero que todo revise el manual de operación de la caldera, tenga en cuenta que durante la etapa de precalentamiento de ésta, se debe mantener cerrada la válvula de cheque para que se genere presión en la caldera. La caldera se programa para que opere a una presión máxima de 40 psi y una presión mínima de de 20 psi.
- Mientras la caldera llega a la presión de operación se debe llenar uno de los cartuchos con el material vegetal y colocarlo dentro del destilador.
- Abra la válvula de cheque de la bomba para suministro de agua de enfriamiento y encienda la bomba. El volumen externo a los tubos e interno al casco del condensador debe estar inundado de agua antes de dar paso al vapor en el destilador.
- Cuando se alcance la presión de operación de la caldera, abra lentamente la válvula de cheque que se encuentra en la entrada del destilador. La apertura de ésta debe ser completa.

- Para la primera extracción de aceites esenciales se debe suministrar vapor de agua al proceso hasta que se observe que no se produce aceite en la salida superior de recipiente separador. Este tiempo de proceso debe medirse desde que empieza a producirse condensado, a fin de determinar si en una hora (tiempo de diseño) se extrajo la mayoría del aceite o si después de este período se sigue produciendo una cantidad considerable de aceite y corregir el tiempo de proceso con base en la experiencia.
- Después de haber hecho la extracción, lo primero que se debe hacer es cerrar la válvula de cheque que se encuentra a la entrada del destilador, esperar durante 1 minuto para que se condense la mayor cantidad de vapor que encuentra en el destilador y empezar a soltar los pernos para el cierre de la tapa superior del destilador.
- Una vez soltados los pernos que sujetan la tapa, uno de los operarios procede a sacar la tapa usando la manija del brazo y rotándola hasta que la manija toque el cuerpo de destilador.
- Se procede a sacar el cartucho con el material ya procesado para cambiarlo por otro cartucho con material fresco. El llenado del segundo cartucho lo realiza uno de los operarios, mientras el otro vigila el proceso de extracción, de tal manera que no se pierda tiempo mientras se desocupa y se vuelve a llenar un solo cartucho. El uso de dos cartuchos además es muy útil cuando se esta trabajando en la extracción de los AEs de dos herbáceas diferentes.
- Simultáneamente durante el tiempo de cambio del cartucho, el segundo operario debe sacar el agua que queda en el separador usando la salida inferior para el agua removiendo el tapón de la "T".

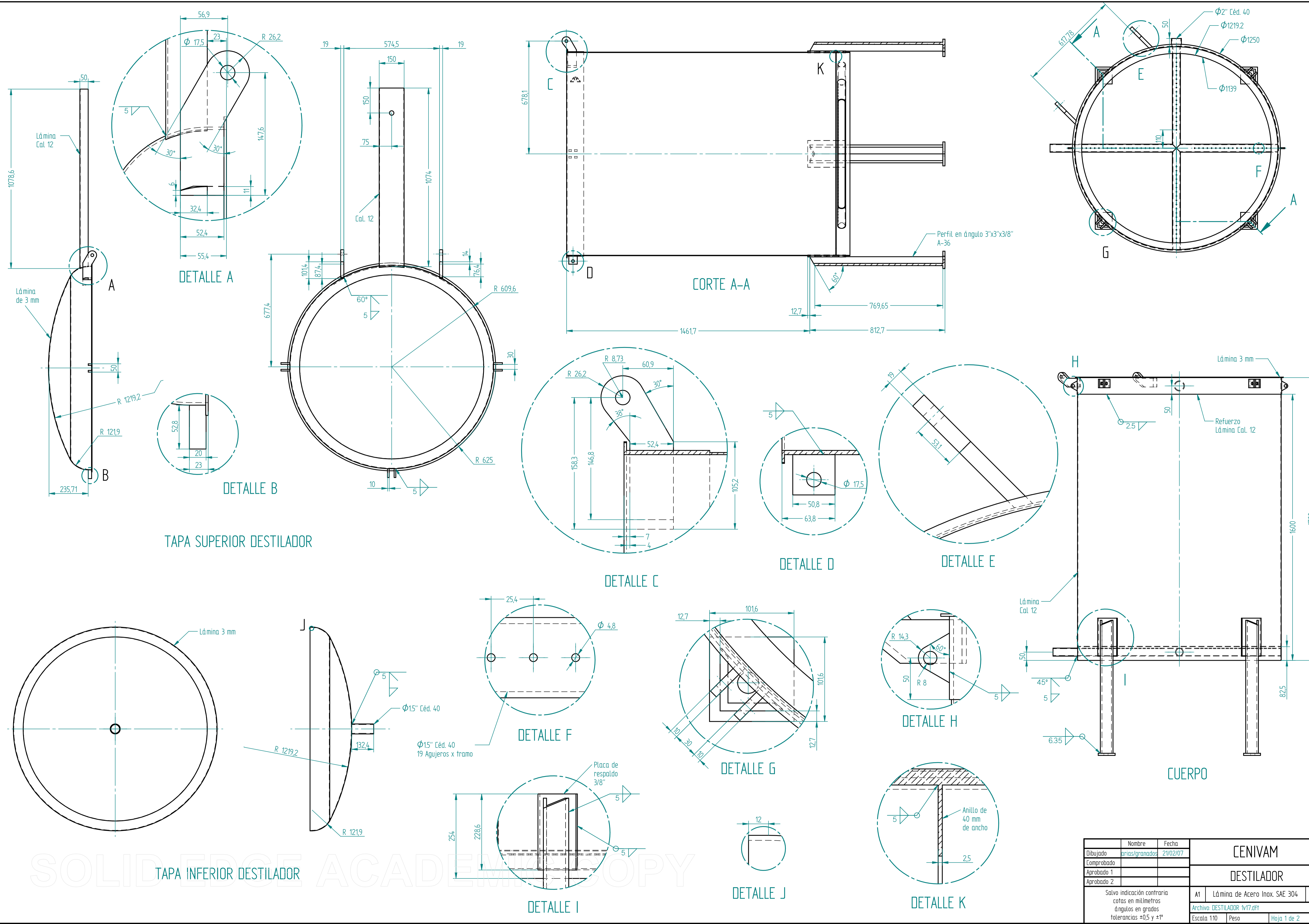
ANEXO F. PLANOS DE CONSTRUCCIÓN



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1	Varilla de 10 mm	SAE 304	1
2	Agujero de $\phi 1/2"$ con 6 mm de profundidad	SAE 304	2
3	Lamina rotada de Acero de 2.5 mm	SAE 304	1
4	Barra de refuerzo 30X6X1500	SAE 304	2
5	Perfil en ángulo 76.2X76.2X5 y 45° de Longit	SAE 304	2
6	Lamina de Acero de 6 mm de espesor	SAE 304	1
7	Malta 20 Agujxplg 2, $\phi 45"$ y 1 mm de espesor	SAE 304	1
8	Barra de izaje del cartucho	SAE 304	2
9	Abrazadera		1
10	Contrapeso	Fundición Gris	1
11	Tuerca de mariposa de $\phi 1"$	SAE 304	3
12	Perno de $\phi 1"$ con pasador de $\phi 5/8"$	SAE 304	3
13	Pasador $\phi 5/8"$ para bisagra	SAE 304	1
14	Pasador $\phi 1/2"$ para izaje	SAE 304	2

Nombre	Fecha	CENIVAM	
Dibujado: Arias/Granados	20/10/06		
Comprobado:			
Aprobado 1:		Título: DESTILADOR	
Aprobado 2:			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		A1	Plano
		Archivo: CARTUCHOv17.dft	
		Escala 1:5	Peso
		Hoja 2 de 3	



TAPA SUPERIOR DESTILADOR

TAPA INFERIOR DESTILADOR

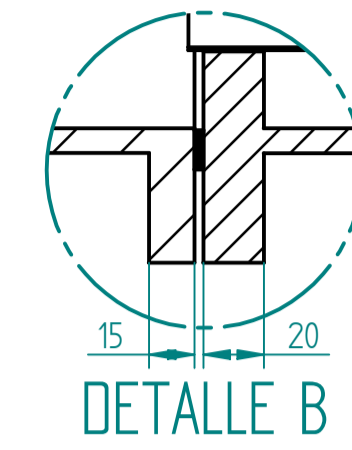
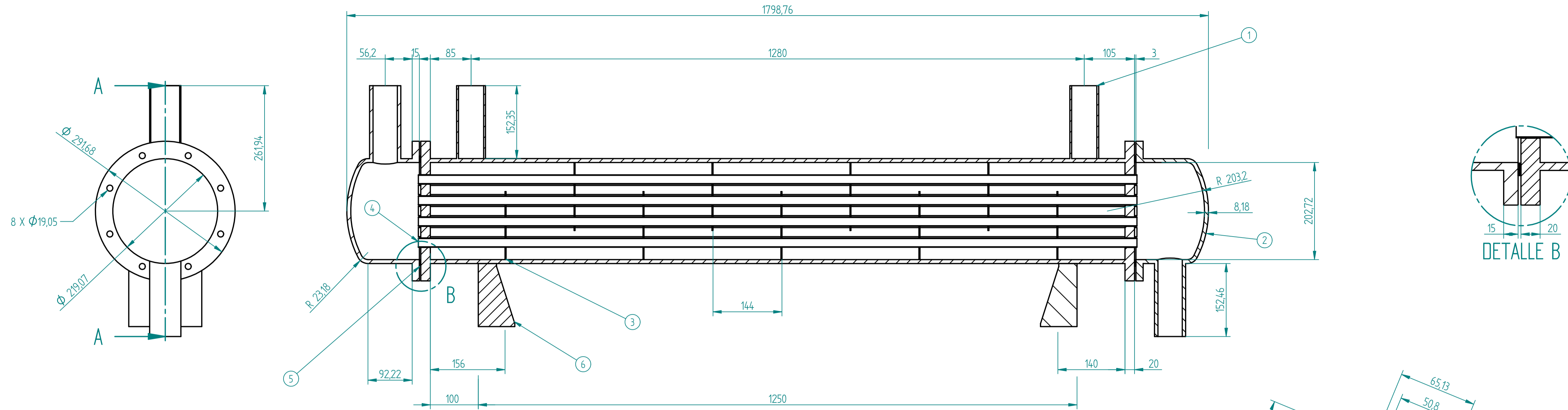
CORTE A-A

CUERPO

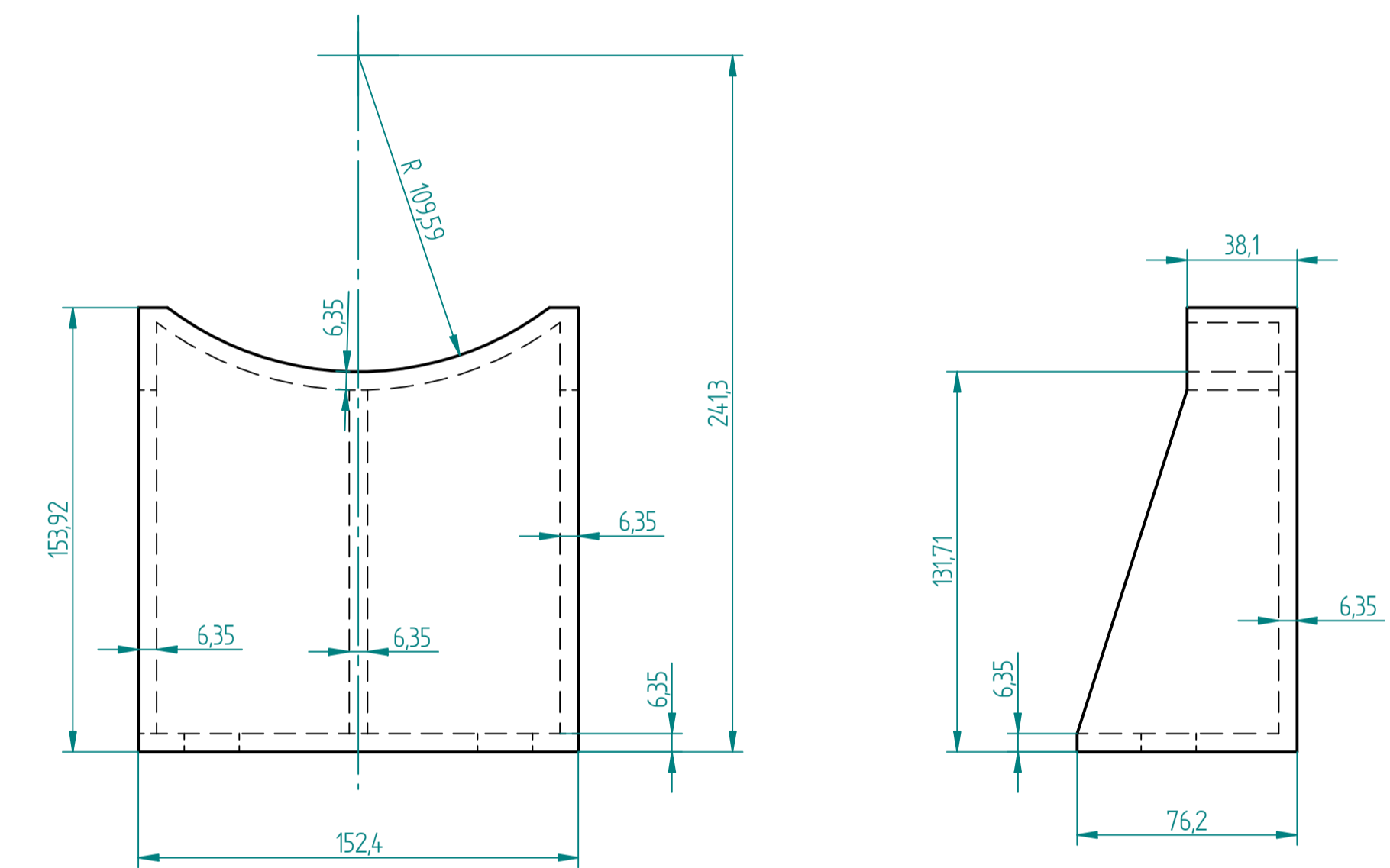
Dibujado	Nombre	Fecha	CENIVAM	
Comprobado	arias/granados	21/02/07	DESTILADOR	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A1	Lámina de Acero Inox. SAE 304
			Escala 1:10	Peso
			Hoja 1 de 2	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

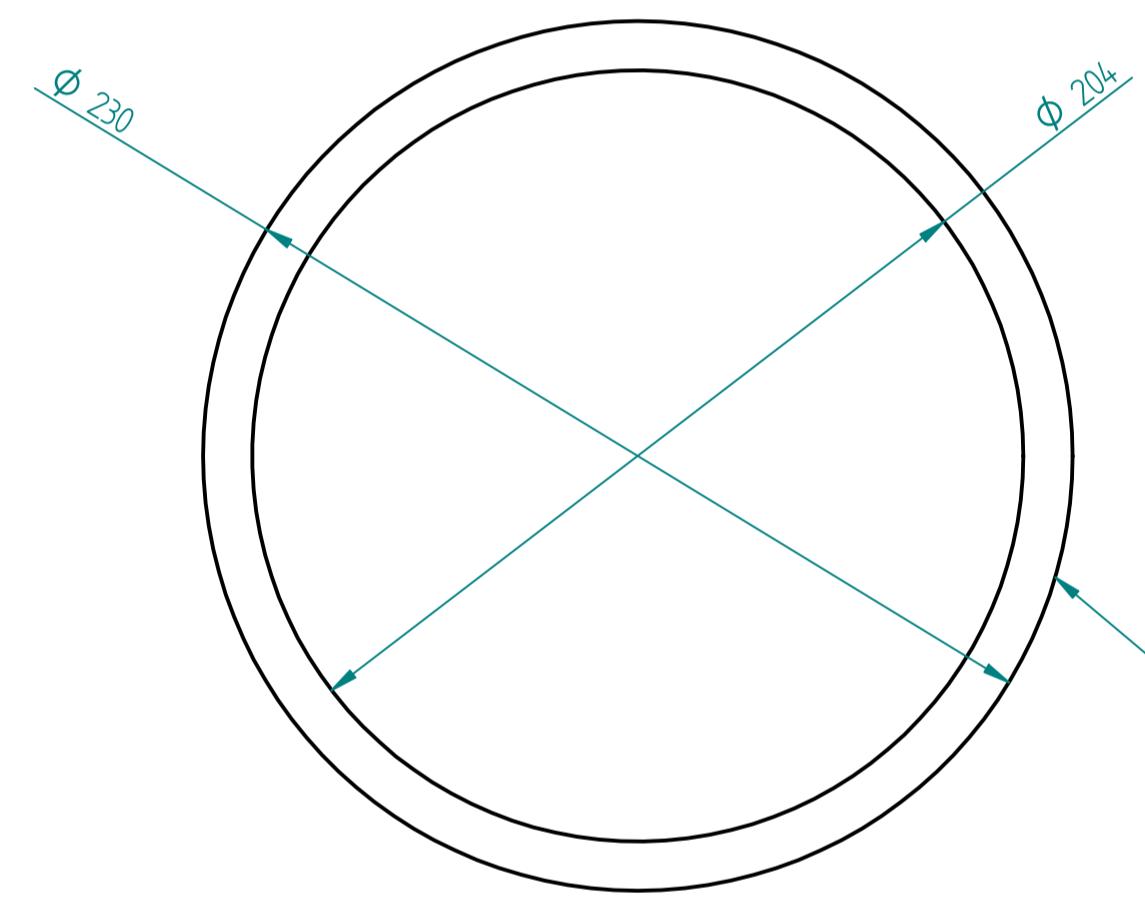
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



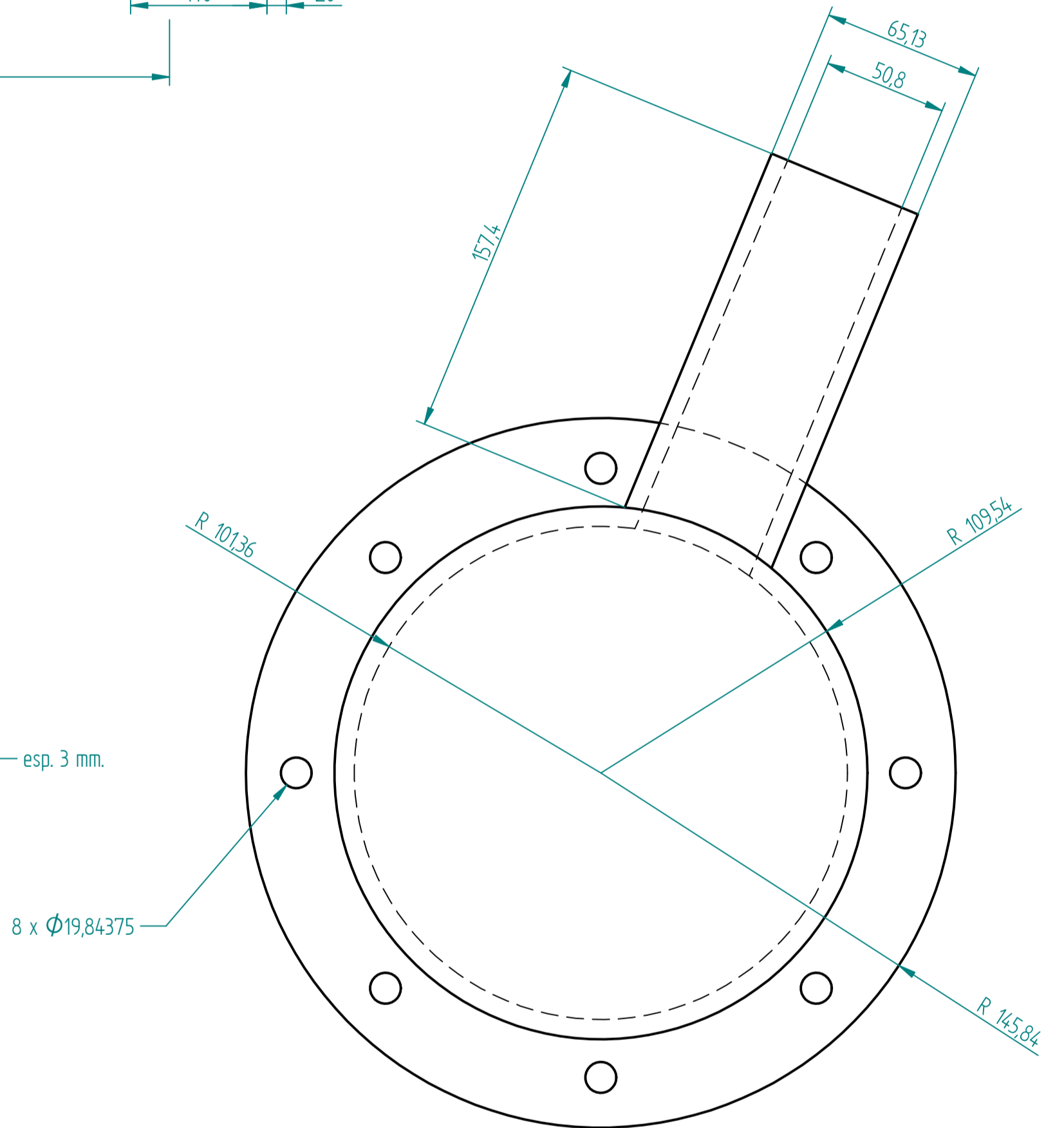
CORTE A-A



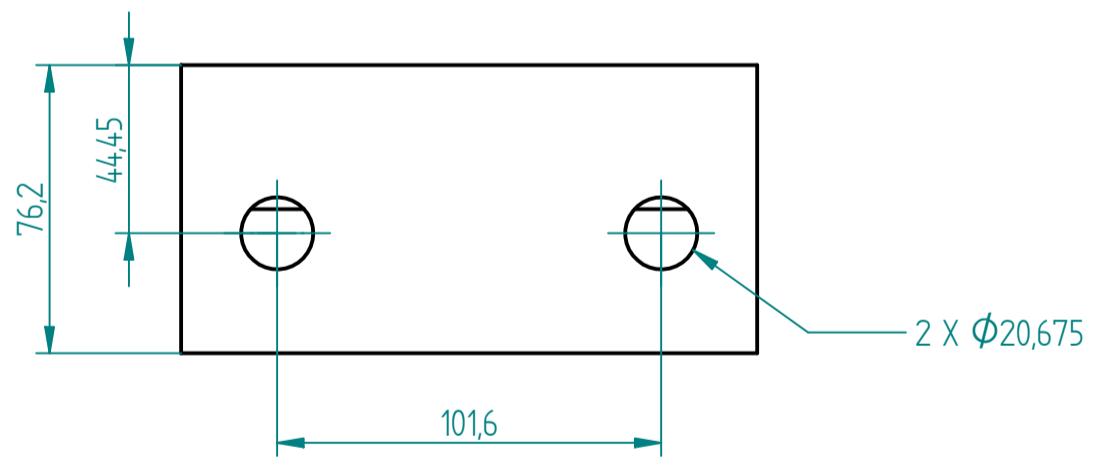
SOPORTE



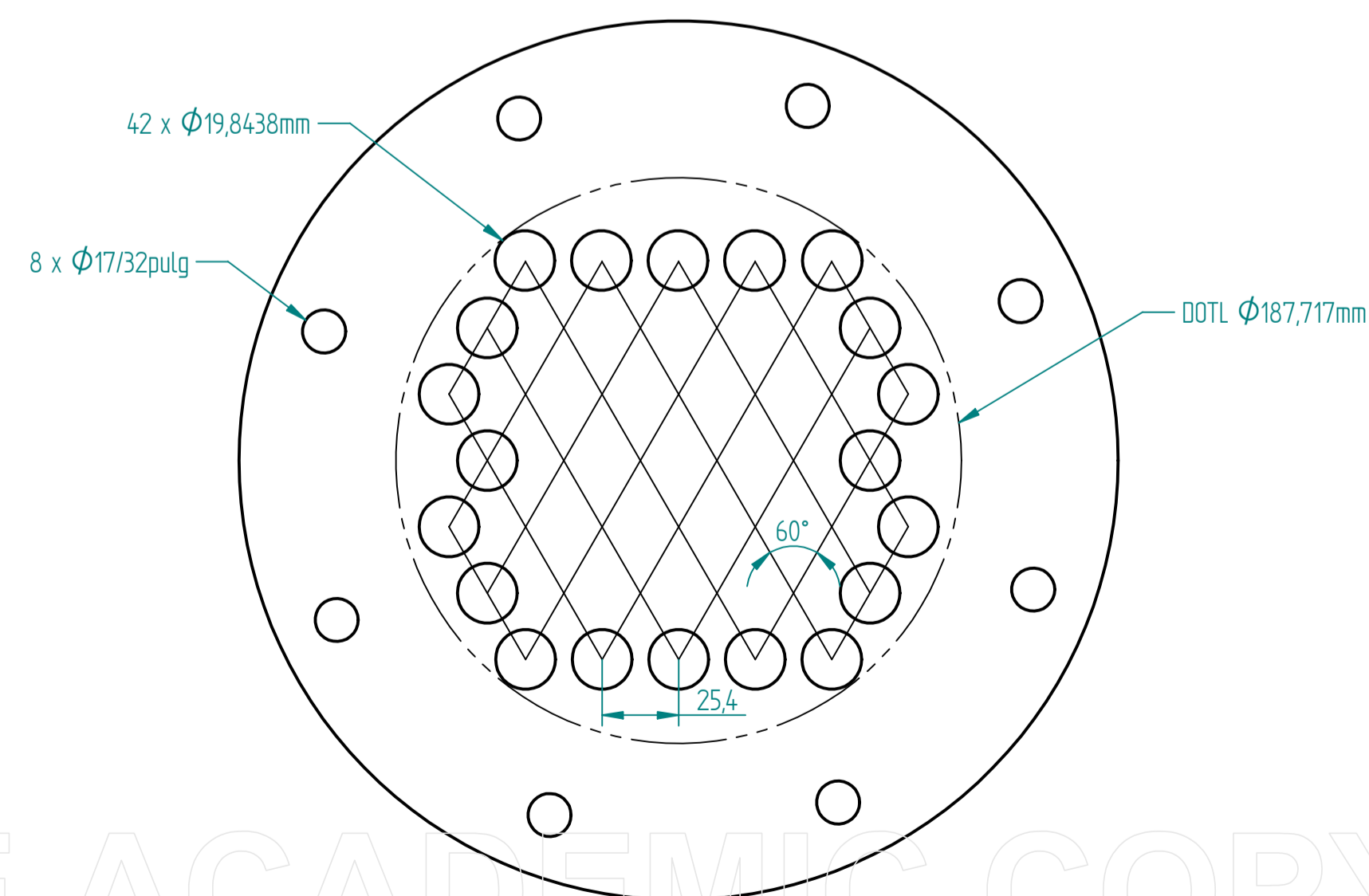
SELLO



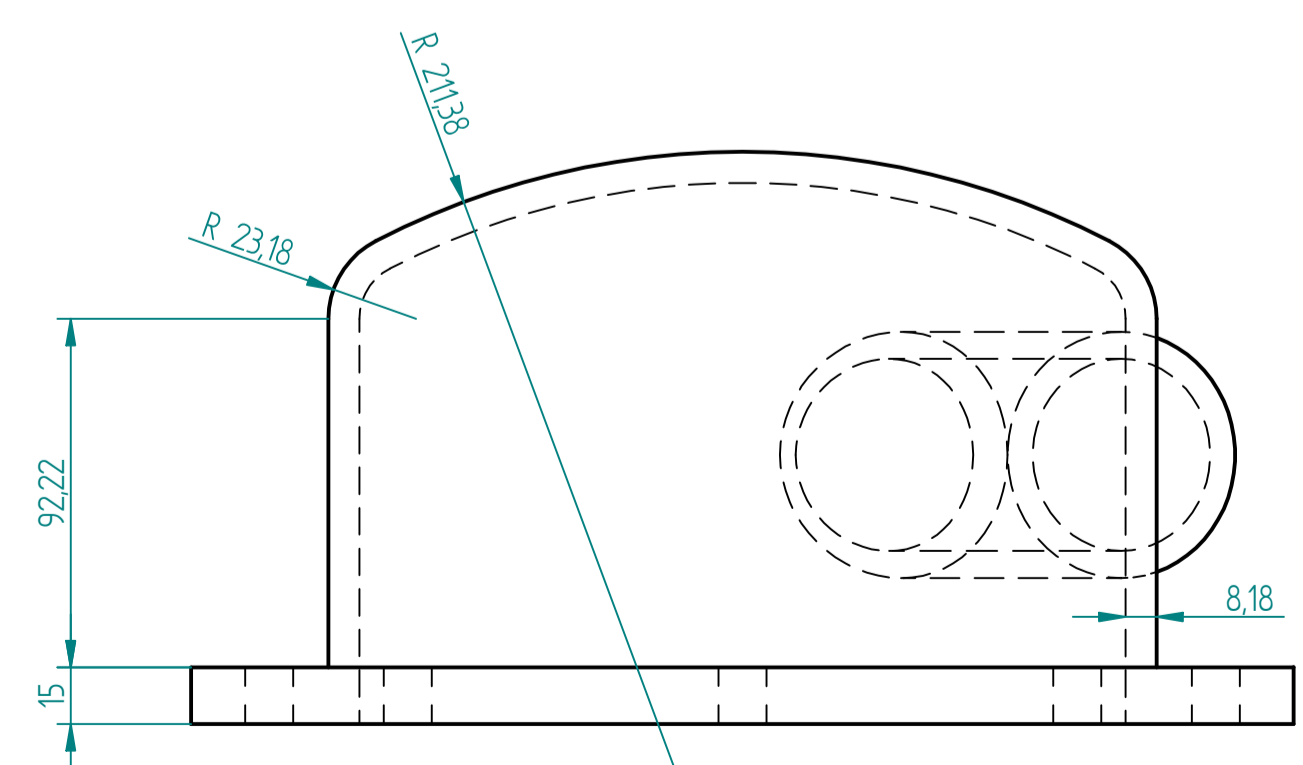
CABEZAL



BAFLE



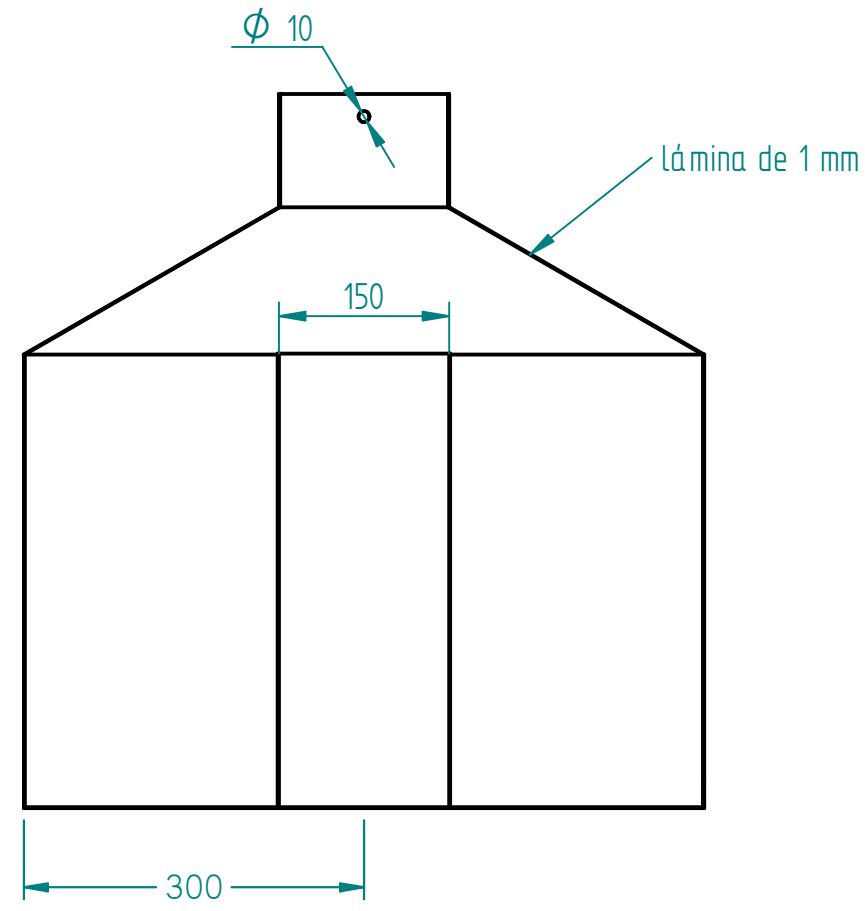
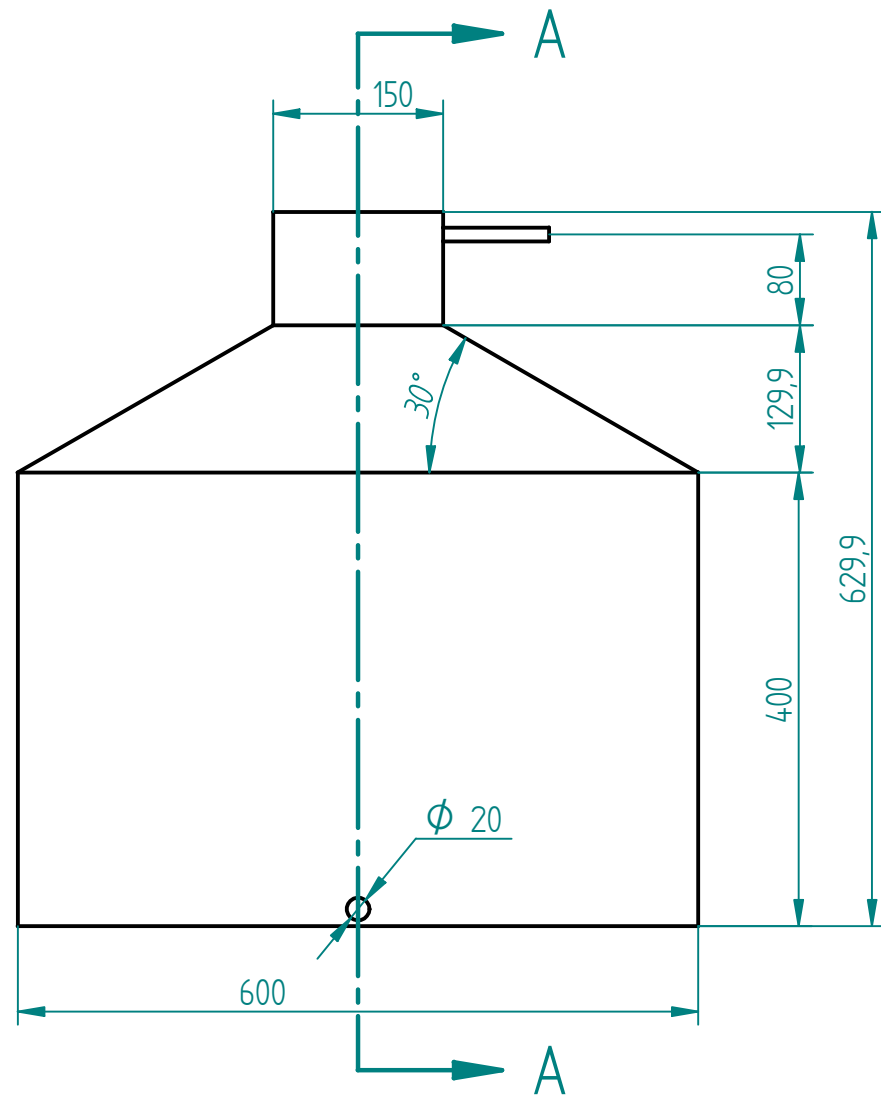
DISTRIBUCIÓN TUBULAR



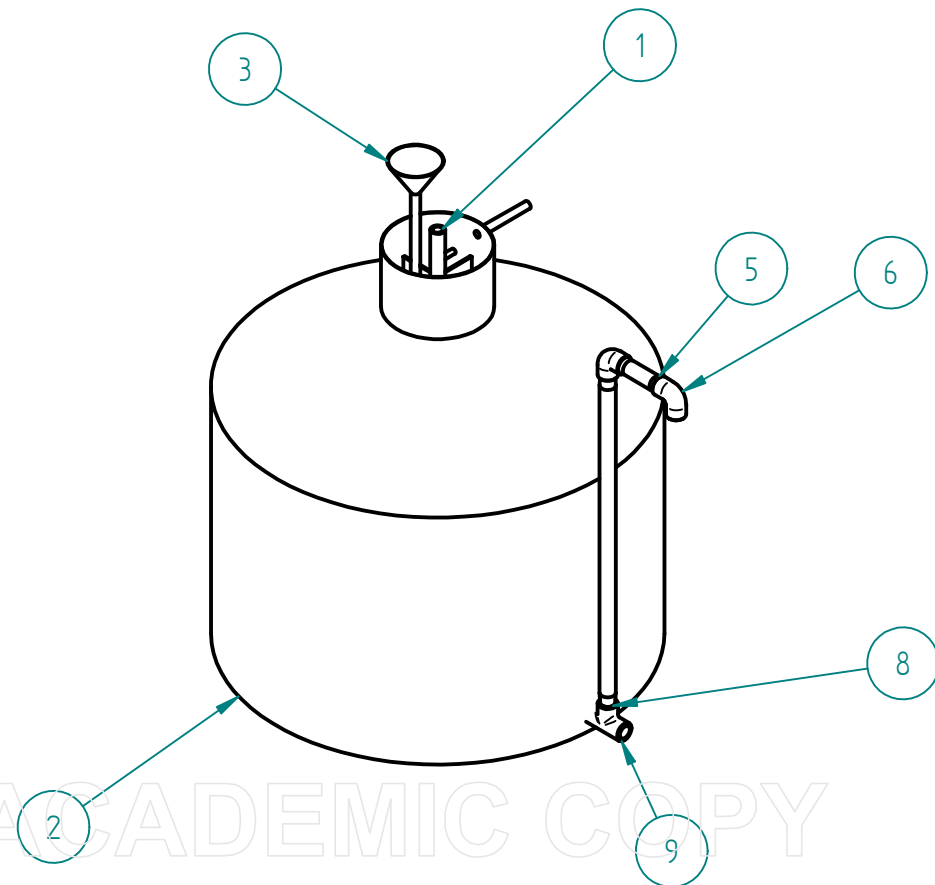
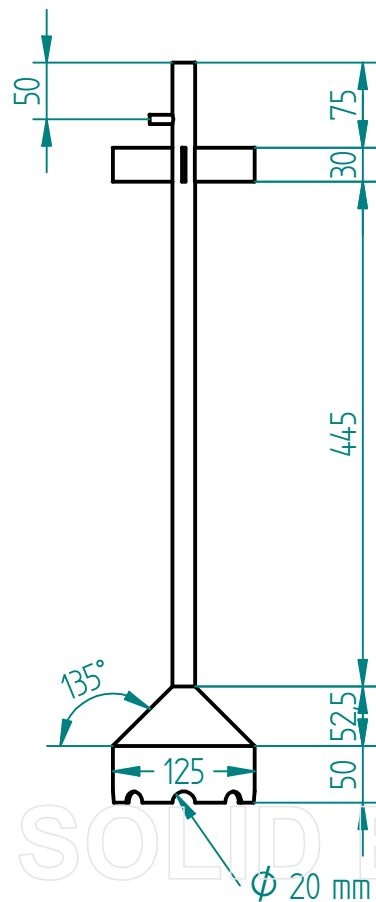
Número de elemento	Título	Material	Cantidad	Comentarios
1	CASCO	AISI 304	1	
2	SELLO	NEOPRENO SILICONADO	2	
3	BAFLE	AISI 304	9	
4	HAZ DE TUBOS	AISI 304	1	Ø 19,05mm L 1500mm, BWG 20
5	CABEZALES	AISI 304	2	
6	SOPORTES	ASTM A-36	2	

Dibujado	Nombre	Fecha	CENIVAM
Comprobado	Mantenimiento	21/02/07	
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Rev
Archivo: soporte.dft			
Escala	Peso	Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



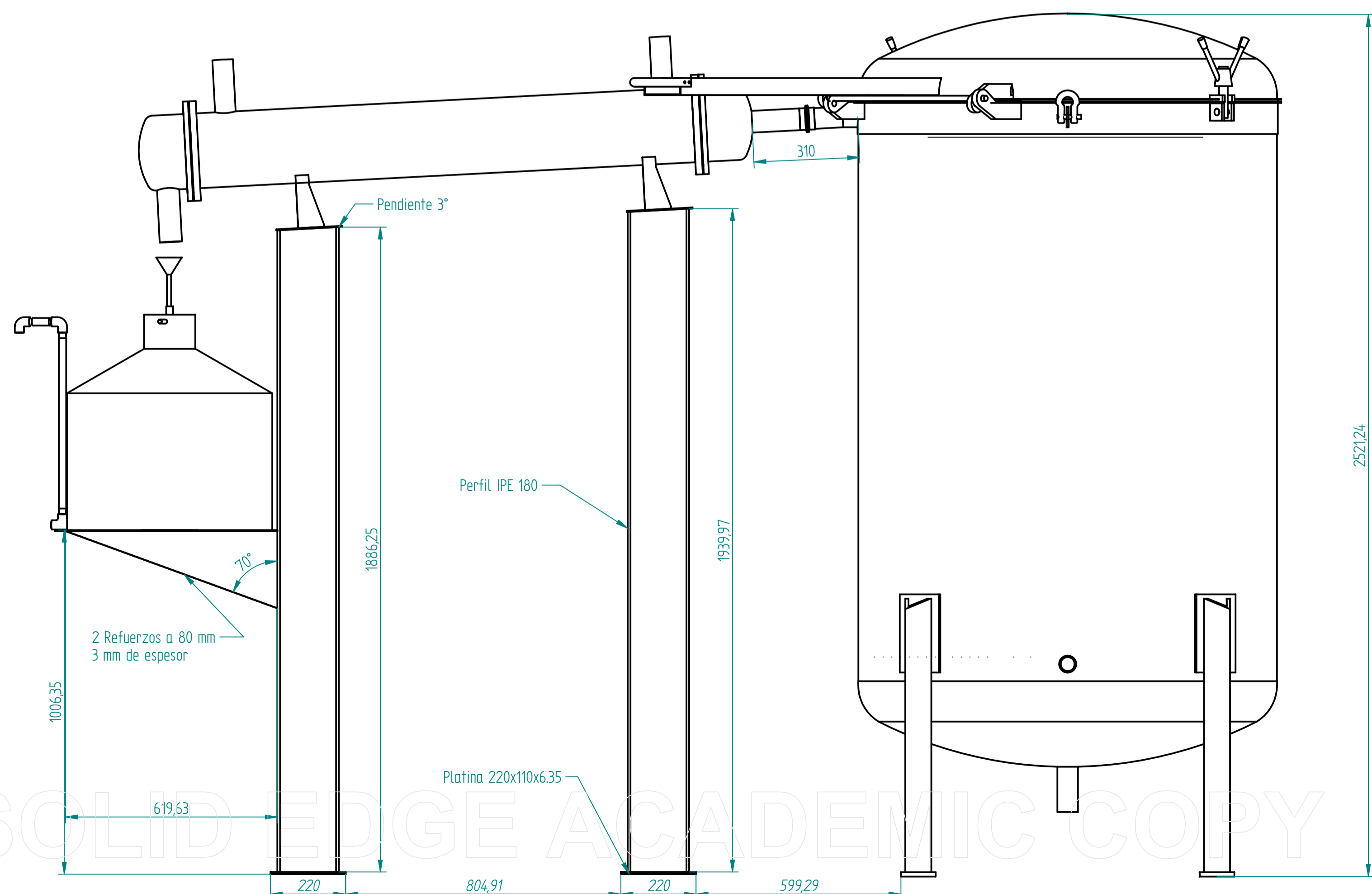
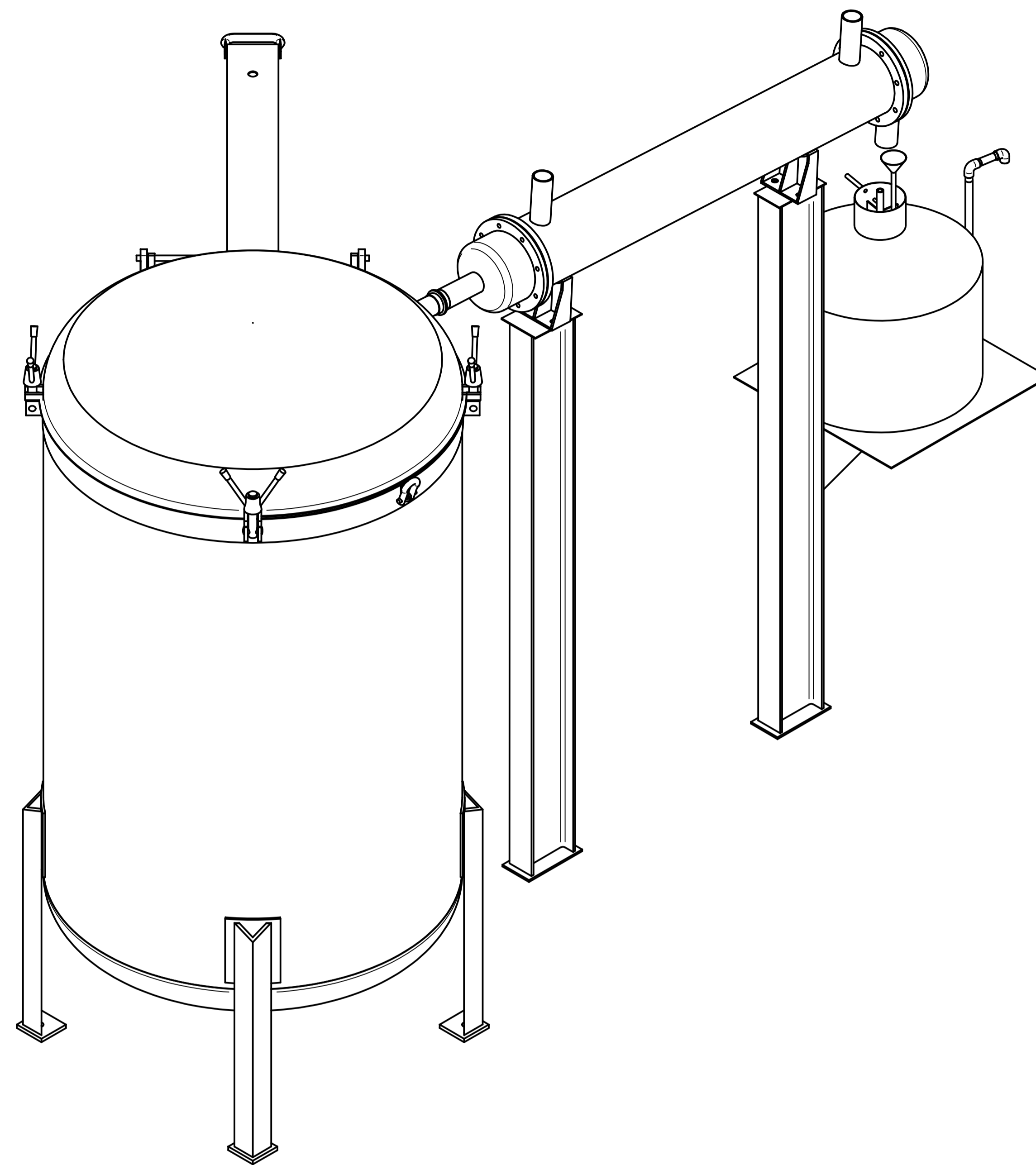
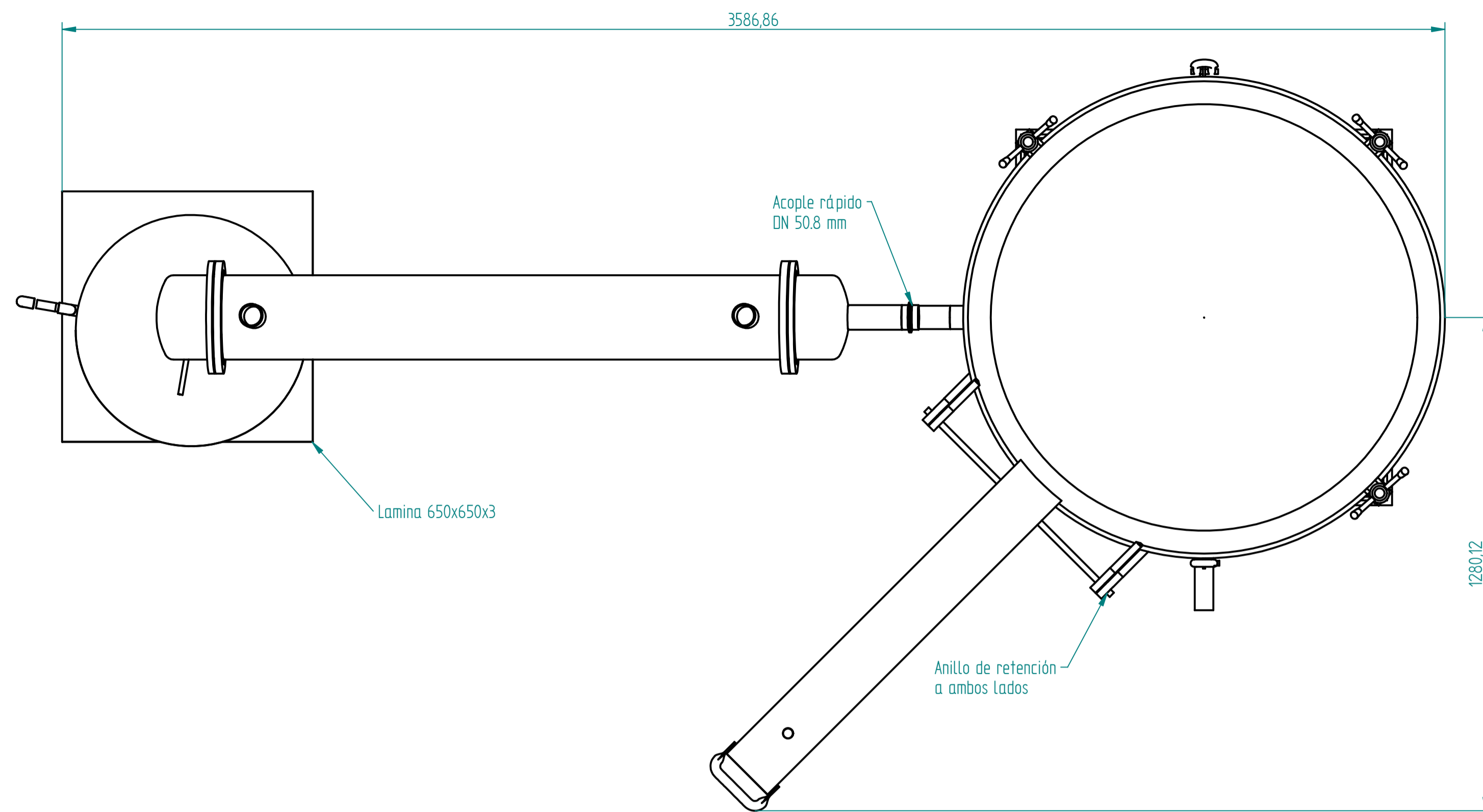
CORTE A-A



Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1	Centro		1
2	Separador	Acero inoxidable, 304	1
3	Tubo de 1/2"		1
4*	Codo de 1/2"	Acero inoxidable, 304	1
5	Tubo de 1/2"		2
6	codo de 1/2" roscado	Acero inoxidable, 304	2
7*	Tubo de 1/2"		1
8	Tubo de 1/2"	Acero inoxidable, 304	1
9	Te de 1/2"		1

Nombre		Fecha	CENIVAM	
Dibujado	Mantenimiento	21/02/07	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
Dibujado	wilmer arias	14/02/07	Título	
Aprobado 1	Omar Gelvez		SEPARADOR	
Aprobado 2			A3 Plano Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Separador v17.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Dibujado	Nombre	Fecha	CENIVAM	
Comprobado	Arias/Granados	21/02/07		
Aprobado 1			MONTAJE	
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A1	Plano
			Escala: 1:5	Peso
			Hoja 1 de 1	Rev

SOLID EDGE ACADEMIC COPY