

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PARA LA EXTRACCIÓN DE
ACEITES ESENCIALES CON CAPACIDAD PARA 300 kg DE MATERIAL
VEGETAL**

**EDINSON LÓPEZ ARENALES
JOSE MANUEL CARVAJAL ALBARRACIN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, 2.009**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PARA LA EXTRACCIÓN DE
ACEITES ESENCIALES CON CAPACIDAD PARA 300 kg DE MATERIAL
VEGETAL**

**EDINSON LÓPEZ ARENALES
JOSE MANUEL CARVAJAL ALBARRACIN**

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

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**Codirectores
ELENA E. STASHENKO
Ph. D Cromatografía**

**JAIRO RENE MARTÍNEZ
Ph. D Físicoquímica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, 2.009**

DEDICATORIA

*Este trabajo de grado, lo dedico a quienes siempre
estuvieron a mi lado, brindándome su apoyo:
A Dios, por que sin él nada de esto hubiese sido posible,
A mis padres, Blanca Leonor Arenales y Hermes López, por su
gran amor, paciencia y constante apoyo,
A mis hermanos, Sandra Milena y Hermes Oswaldo, por sus
concejos y palabras de animo,
Al profesor Omar Gelvez, por todas sus enseñanzas,
A mis familiares y amigos, que creyeron en mí y siempre
estuvieron a mi lado.*

EDINSON LÓPEZ ARENALES

DEDICATORIA

*A mis padres Luis Jesús Carvajal
y Alba socorro Albarracín quienes
me brindaron su comprensión y apoyo,
A mis hermanos Juan Carlos y Alba lucia
quienes siempre me animaron y me aconsejaron,
A mi novia Patricia por todo su amor,
Al profesor Omar Gelvez por sus conocimientos,
A mis familiares y amigos por haber creído en mí,
A Dios por que sin el nada de esto seria posible.*

JOSE MANUEL CARVAJAL ALBARRACÍN

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1 GENERALIDADES DE LOS ACEITES ESENCIALES..... | 3 |
| 1.1 DEFINICIÓN DEL ACEITE ESENCIAL | 3 |
| 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEITES ESENCIALES | 3 |
| 1.3 HISTORIA..... | 4 |
| 1.4 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN | 5 |
| 1.4.1 Enfleurage | 6 |
| 1.4.2 Extracción con solventes | 7 |
| 1.4.3 Extracción por prensado..... | 7 |
| 1.4.4 Extracción con fluidos supercríticos | 9 |
| 1.4.5 Extracción asistida por la radiación de microondas | 12 |
| 1.4.6 Hidrodestilación..... | 12 |
| 1.4.7 Destilación Agua-Vapor | 14 |
| 1.4.8 Destilación por arrastre con vapor..... | 15 |
| 1.5 COMPONENTES EN LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR | 16 |
| 1.5.1 Generadores de vapor..... | 16 |
| 1.5.2 Alambique | 17 |
| 1.5.3 Condensador..... | 18 |
| 1.5.4 Vaso separador de aceites o vaso Florentino..... | 20 |
| 2 DISEÑO TERMICO DEL DESTILADOR | 21 |
| 2.1 METODO PARA DETERMINAR EL FLUJO TEORICO DE VAPOR | 22 |
| 2.1.1 Procedimiento para el calculo del flujo de vapor (\dot{m}_v)..... | 23 |
| 2.1.2 Corrección de los factores t, s y la altura H..... | 27 |
| 2.1.3 Cálculo del tiempo de extracción corregido. | 29 |
| 2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO | 31 |
| 2.2.1 Pruebas Preliminares | 31 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.2.2 | Pruebas finales..... | 36 |
| 2.3 | RESULTADOS TEÓRICOS VS. EXPERIMENTALES | 47 |
| 2.4 | CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DE VAPOR DE DISEÑO | 50 |
| 2.5 | SELECCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR | 54 |
| 2.5.1 | Características de la Biocaldera..... | 55 |
| 3 | DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR..... | 58 |
| 3.1 | CRITERIOS DE DISEÑO | 58 |
| 3.2 | EVOLUCIÓN DEL DISEÑO..... | 60 |
| 3.3 | DISEÑO DEL CUERPO | 65 |
| 3.3.1 | Dimensionamiento del cuerpo..... | 65 |
| 3.3.2 | Espesor de pared del cuerpo | 65 |
| 3.3.3 | Espesor del fondo del cuerpo..... | 67 |
| 3.3.4 | Brida para el soporte del cartucho..... | 69 |
| 3.3.5 | Soporte de destilador..... | 70 |
| 3.3.6 | Sello de agua del destilador..... | 73 |
| 3.4 | DISEÑO DEL CARTUCHO..... | 73 |
| 3.4.1 | Dimensionamiento del cartucho | 73 |
| 3.4.2 | Espesor de pared del cartucho..... | 74 |
| 3.4.3 | Fondo del cartucho | 75 |
| 3.4.4 | Orejas para el izaje del cartucho | 76 |
| 3.5 | DISEÑO DE LA TAPA..... | 77 |
| 3.6 | DISEÑO DEL DISTRIBUIDOR..... | 78 |
| 3.6.1 | Cálculo del diámetro del distribuidor de vapor..... | 78 |
| 3.6.2 | Cálculo del número mínimo de agujeros del distribuidor de vapor..... | 79 |
| 3.6.3 | Cálculo del paso entre agujeros (p), para el distribuidor de vapor..... | 79 |
| 3.7 | DISEÑO DEL VASO FLORENTINO..... | 81 |
| 3.7.1 | Velocidad de separación del aceite esencial | 81 |
| 3.7.2 | Funcionamiento y partes del vaso florentino. | 82 |
| 3.7.3 | Cálculos para el diseño del vaso florentino..... | 83 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4 | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR | 88 |
| 4.1 | DISEÑO TÉRMICO | 88 |
| 4.1.1 | Datos de entrada: | 89 |
| 4.1.2 | Diseño Térmico: Zona de Condensación. | 93 |
| 4.1.3 | Diseño Térmico: Zona de Subenfriamiento..... | 105 |
| 4.1.4 | Área del condensador. | 109 |
| 4.1.5 | Caída de Presión en el condensador. | 109 |
| 4.1.6 | Tabulación de datos para el diseño del condensador. | 111 |
| 4.2 | DISEÑO MECÁNICO | 117 |
| 4.2.1 | Partes del intercambiador de calor. | 117 |
| 4.2.2 | Clasificación y designación de intercambiadores de calor. | 118 |
| 4.2.3 | Diseño del casco del condensador..... | 121 |
| 4.2.4 | Diseño de los tubos del condensador. | 123 |
| 4.2.5 | Diseño de los Baffles del condensador..... | 124 |
| 4.2.6 | Diseño de los cabezales del condensador..... | 124 |
| 4.2.7 | Selección de los empaques..... | 125 |
| 4.2.8 | Diseño de la placa portatubos..... | 125 |
| 4.2.9 | Diseño de las Bridas. | 126 |
| 4.3 | CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR..... | 133 |
| 5 | EQUIPOS AUXILIARES | 138 |
| 5.1 | TUBERÍAS DE VAPOR | 138 |
| 5.2 | ACCESORIOS | 141 |
| 5.3 | AISLAMIENTO TÉRMICO | 141 |
| 5.3.1 | Aislamiento de las Tubería para el transporte de vapor. | 142 |
| 5.3.2 | Aislamiento del Destilador. | 143 |
| 5.4 | SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA..... | 145 |
| 5.4.1 | Control de la dureza del agua. | 145 |
| 5.4.2 | Cálculos para la selección del suavizador | 146 |
| 5.4.3 | Selección del suavizador | 149 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.4.4 | Control de sílice..... | 150 |
| 5.4.5 | pH y Alcalinidad..... | 150 |
| 5.5 | TORRE DE ENFRIAMIENTO | 151 |
| 5.5.1 | Definición y clasificación de las torres de enfriamiento..... | 151 |
| 5.5.2 | Selección de la torre de enfriamiento | 153 |
| 5.6 | DISTRIBUCIÓN EN PLANTA..... | 155 |
| 5.6.1 | Conceptos básicos | 155 |
| 5.6.2 | Determinación de la distribución en planta..... | 158 |
| | CONCLUSIONES..... | 161 |
| | RECOMENDACIONES | 162 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 164 |
| | ANEXOS | 166 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Enfleurage..... | 6 |
| Figura 2. Esquema de extracción del aceite por prensado continuo..... | 8 |
| Figura 3. Diagrama P-T. | 10 |
| Figura 4. Diagrama equipo de extracción supercrítica. | 11 |
| Figura 5. Extracción por la radiación de microondas, equipo de laboratorio. | 12 |
| Figura 6. Hidrodestilación. | 13 |
| Figura 7. Destilación agua-vapor. | 14 |
| Figura 8. Destilación por arrastre con vapor. | 15 |
| Figura 9. Caldera de biomasa. | 17 |
| Figura 10. Partes del alambique..... | 18 |
| Figura 11. Condensador enfriado por agua. | 19 |
| Figura 12. Condensador de coraza y tubos. | 19 |
| Figura 13. Condensador enfriado por aire. | 20 |
| Figura 14. Vaso separador..... | 20 |
| Figura 15. Densidad de empaqueo del material vegetal. | 27 |
| Figura 16. Flujograma para el cálculo del flujo másico de vapor..... | 30 |
| Figura 17. Toma de muestras en probetas durante las pruebas. | 33 |
| Figura 18. Material Vegetal. | 36 |
| Figura 19. Material cortado. | 37 |
| Figura 20. Influencia del flujo de vapor en el rendimiento..... | 39 |
| Figura 21. Influencia de la densidad de empaqueo en el rendimiento | 41 |
| Figura 22. Grafica End Point para la prueba No. 7 | 45 |
| Figura 23. Biocaldera. | 56 |
| Figura 24. Producción de vapor Vs. Consumo de combustible. | 57 |
| Figura 25. Alternativa de diseño 1 | 61 |
| Figura 26. Alternativa de diseño 2 | 62 |
| Figura 27. Alternativa final del diseño | 63 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28. Sedimento en el condensador | 64 |
| Figura 29. Clases de soldadura | 67 |
| Figura 30. Geometría del cabezal tipo toriesférico..... | 68 |
| Figura 31. Soporte para el cartucho..... | 69 |
| Figura 32. Sección transversal del ángulo | 70 |
| Figura 33. Soporte para recipientes verticales | 71 |
| Figura 34. Sello de agua..... | 73 |
| Figura 35. Fondo del cartucho..... | 75 |
| Figura 36. Oreja para izaje del cartucho..... | 76 |
| Figura 37. Tapa del destilador..... | 77 |
| Figura 38. Distribuidor de vapor | 80 |
| Figura 39. Velocidad de separación de las partículas de aceite de lavanda..... | 81 |
| Figura 40. Separación del aceite. | 82 |
| Figura 41. Separador de aceite. | 83 |
| Figura 42. Geometría del vaso Florentino..... | 86 |
| Figura 43. Zonificación del condensador | 89 |
| Figura 44. Esquema de localización de fluidos | 91 |
| Figura 45. Geometría del arreglo de 30° en los tubos | 92 |
| Figura 46. Corte del baffle. | 93 |
| Figura 47. Factores J_i y f_i para banco de tubos ideal para un arreglo a 30°..... | 97 |
| Figura 48. Separación entre baffles..... | 98 |
| Figura 49. Geometría del área transversal del Condensador..... | 100 |
| Figura 50. Designación de intercambiadores. | 120 |
| Figura 51. Valores recomendados del corte del baffle | 124 |
| Figura 52. Construcción placas portatubos..... | 133 |
| Figura 53. Construcción Haz de tubos. | 134 |
| Figura 54. Construcción baffles..... | 134 |
| Figura 55. Construcción casco condensador. | 135 |
| Figura 56. Construcción Cabezales. | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 57. Proceso de soldadura de bridas y conexiones. | 136 |
| Figura 58. Pruebas Hidrostáticas..... | 137 |
| Figura 59. Gráfica de dimensionamiento de tubería para Vapor – Velocidad | 139 |
| Figura 60. Sistema de tuberías u accesorios. | 140 |
| Figura 61. Fibra de vidrio tipo cañuela amplio rango. | 143 |
| Figura 62. Fibra de vidrio tipo lana AW. | 144 |
| Figura 63. Características de la fibra de vidrio tipo lana AW..... | 145 |
| Figura 64. Tipo de sistema de suavizador a utilizar | 150 |
| Figura 65. Distribución en Planta Propuesta. | 159 |
| Figura 66. Vista isométrica de la distribución propuesta..... | 160 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de t y s , calculados por TIM DENNY para la lavanda..... | 27 |
| Tabla 2. Formato para pruebas de laboratorio. | 34 |
| Tabla 3. Resultado de pruebas preliminares..... | 35 |
| Tabla 4. Resultados Pruebas de Laboratorio. | 38 |
| Tabla 5. Datos usados para el análisis de la influencia del flujo de vapor | 39 |
| Tabla 6. Datos usados en el análisis de la densidad de empaçado..... | 40 |
| Tabla 7. Determinación de los parámetros estándar..... | 42 |
| Tabla 8. Condiciones estándar..... | 42 |
| Tabla 9. Cálculo del tiempo de extracción y altura virtual de carga a condiciones estándar..... | 46 |
| Tabla 10. Cálculo del tiempo básico (t) y el parámetro de incremento de aceite esencial (s) | 46 |
| Tabla 11. Datos de proceso de las pruebas de referencia..... | 47 |
| Tabla 12. Resultados cálculo del tiempo de calentamiento pruebas..... | 48 |
| Tabla 13. Comparación del flujo teórico Vs el flujo experimental | 50 |
| Tabla 14. Parámetros de diseño..... | 51 |
| Tabla 15. Cálculo del tiempo de calentamiento teórico. | 52 |
| Tabla 16. Cálculo del tiempo de extracción teórico..... | 53 |
| Tabla 17. Cálculo del flujo másico de vapor de diseño..... | 54 |
| Tabla 18. Especificaciones técnicas de la Biocaldera. | 57 |
| Tabla 19. Dimensiones del cuerpo del destilador | 65 |
| Tabla 20. Valores de t y P para tanques a presión. | 66 |
| Tabla 21. Eficiencias de las juntas..... | 67 |
| Tabla 22. Valores de M | 68 |
| Tabla 23. Dimensiones y propiedades de la sección transversal del ángulo | 70 |
| Tabla 24. Dimensiones del cartucho | 74 |
| Tabla 25. Velocidades razonables para el flujo de vapor de agua en tuberías | 78 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 26. Parámetros de diseño del vaso Florentino | 83 |
| Tabla 27. Resultado del diseño del vaso florentino..... | 87 |
| Tabla 28. Datos del proceso. | 90 |
| Tabla 29. Constantes para el cálculo de J_i y f_i para un arreglo de 30 grados..... | 96 |
| Tabla 30. Valores de L_{tpef} y L_{pp} según el arreglo. | 101 |
| Tabla 31. Diseño térmico de la zona de condensación (Primera Iteración) | 112 |
| Tabla 32. Diseño térmico de la zona de condensación (Segunda Iteración) | 113 |
| Tabla 33. Diseño térmico de la zona de subenfriamiento (Primera Iteración)..... | 114 |
| Tabla 34. Diseño térmico de la zona de subenfriamiento (Segunda Iteración) ... | 115 |
| Tabla 35. Cálculo de la longitud real de los tubos. | 116 |
| Tabla 36. Cálculo de la caída de presión en el condensador..... | 116 |
| Tabla 37. Cálculo de la presión de diseño en el casco..... | 122 |
| Tabla 38. Espesores mínimos de cascos de intercambiadores..... | 123 |
| Tabla 39. Calculo de la presión de diseño en los tubos. | 123 |
| Tabla 40. Cálculo de la placa portatubos..... | 126 |
| Tabla 41. Cálculo de la brida en el casco | 131 |
| Tabla 42. Cálculo de la brida en los cabezales | 132 |
| Tabla 43. Listado de accesorios. | 141 |
| Tabla 44. Espesor óptimo de la fibra de vidrio para tuberías. | 142 |
| Tabla 45. Espesores recomendados de fibra de vidrio tipo Lana AW..... | 144 |
| Tabla 46. Clasificación de dureza del agua. | 146 |
| Tabla 47. Condiciones de Operación | 153 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO A. TIEMPO DE EXTRACCIÓN HERBÁCEAS MUY ABSORBENTES CON ACEITE SUPERFICIAL | 166 |
| ANEXO B. ANALISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE SOTFWARE CAE..... | 168 |
| ANEXO C. PROPIADES DE LOS SELLOS O EMPAQUES | 178 |
| ANEXO D. VALORES DE ESFUERZOS PERMITIDOS, UHA 23 | 179 |
| ANEXO E. FACTORES GEOMÉTRICOS INVOLUCRADOS EN EL CÁLCULO DE ESFUERZOS SOBRE LAS BRIDAS..... | 180 |
| ANEXO F. CATALOGO VALVULA DE COMPUERTA..... | 181 |

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON CAPACIDAD PARA 300 kg DE MATERIAL VEGETAL.*

AUTORES:

Edinson López Arenales

Jose Manuel Carvajal Albarracín**

PALABRAS CLAVES:

Aceites esenciales, destilación, arrastre con vapor, alambique, diseño, construcción, Tim Denny, Intercambiador de calor.

DESCRIPCION

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. Una de estas opciones, es la extracción de aceites esenciales a partir de plantas aromáticas, la cual generará desarrollo debido a la gran demanda por parte de las industrias de alimentos, farmacéutica, y perfumera-cosmética, para cubrir las crecientes necesidades creadas por una sociedad que busca una mejor calidad de vida.

Ante el auge de las plantas medicinales y el regreso de a los productos naturales, empresas colombianas se asociaron para exportar a Europa aceites esenciales, esencias y extractos de plantas nativas.

La planta diseñada y construida, va dirigida a una de estas empresas, llamada "MOREMOS LTDA", con el fin de mejorar su producción y calidad del producto. Por lo cual, se realizaron pruebas experimentales en una planta piloto, con capacidad para procesar hasta 100kg de material vegetal, y con base en los resultados obtenidos se realizo su diseño y construcción.

Este trabajo de grado, se desarrollo en cinco capítulos así: en el primer capítulo, se escriben las generalidades sobre los aceites esenciales, métodos de obtención y equipos utilizados. En el segundo capítulo, se presenta el diseño térmico del destilador, donde se muestran los aspectos relacionados con la generación de vapor y el análisis de las pruebas realizadas en la planta piloto. En el tercer capítulo, aparecen el diseño mecánico y la construcción del destilador. En el cuarto capítulo, se describen los diseños térmico y mecánico del condensador y su construcción. El quinto capítulo, contiene el diseño y la selección de equipos auxiliares y, finalmente, siguen las conclusiones, recomendaciones y anexos.

* Trabajo de grado

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

ABSTRACT

NAME:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN ESSENTIAL OIL EXTRACTION PLANT WITH A CAPACITY OF 300 kg OF VEGETABLE MATERIAL.

AUTHORS:

Edinson López Arenales
Jose Manuel Carvajal Albarracín**

KEY WORDS:

Essential Oil, distillation, vapor drag, alembic, design, construction, Tim Denny, heat exchanger.

DESCRIPTION

Colombia is a country of a vast biological richness that offers a great variety of options for an adequate use of its natural resources in an agro-industrial basis. One of these options is the extraction of essential oils from aromatic herbs which can generate development due to the great demand from food, medical and perfume-cosmetic industries to supply the needs created by a society always looking for a better quality of life.

Given the boom of medicinal plants and the return to natural products, Colombian companies associated to export essential oils, essences and native plant extracts to Europe.

The designed and built plant is addressed to one of these companies called "MOREMOS Ltda." aiming to improve its production and product quality. Aiming to this objective, experimental tests were carried out in a pilot plant with a capacity of processing up to 100 kg of vegetable material and the results were used as a basis for the main design and construction.

The present degree work has five chapters, distributed as follows: in the first chapter some generalities about essential oils, their way of extraction and needed equipment are described. In the second chapter the thermal design of the distiller is shown where the vapor generation related aspects and the analysis of the tests on the pilot plant are described. The third chapter presents the mechanical design and the construction of the distiller. In chapter four, the thermal and mechanical designs and construction of the condenser are described. The fifth chapter contains the design and selection of auxiliary equipment and finally the conclusions, suggestions and annexes.

* Degree work

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

INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander, como su misión tiene el propósito de apoyar a las comunidades en la solución de sus problemas para mejorar la calidad de vida y generar progreso y el desarrollo económico a partir de las diferentes líneas de investigación que ha establecido para tal fin; éstas permiten generar nuevos procesos y, por ende, la consecución de nuevas tecnologías que facilitan el apoyo a la agroindustria que es el ejercicio investigativo de este proyecto de grado titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITES ESENCIALES CON CAPACIDAD PARA 300 kg DE MATERIAL VEGETAL”**.

La Universidad Industrial de Santander por medio del CENIVAM (Centro Nacional de Investigaciones para la Agro-Industrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales) ha venido desarrollando tecnología para el proceso de extracción de aceites a través del diseño y construcción de plantas piloto, con el fin de analizar e identificar oportunidades de mejoramiento que aumenten su rentabilidad y eficiencia.

En la planta piloto del CENIVAM, cuya capacidad es de 50 kg de material vegetal, se inicia el desarrollo de este proyecto con la ejecución de pruebas para poder extrapolar los resultados obtenidos para la construcción de una planta a nivel industrial.

En la realización de las pruebas, se identificaron algunas mejoras tanto en el diseño como en la operación, lo que permitió un rediseño de los equipos utilizados y optimización del proceso y la obtención de un aceite de mejor calidad.

Los resultados obtenidos en este trabajo de grado son de gran importancia para el desarrollo de la industria de aceites esenciales en Colombia, ya que servirán de base para que en el diseño de nuevos equipos se logren alcanzar los estándares internacionales.

Los lectores de esta investigación encontrarán el trabajo presentado en cinco capítulos así: en el primer capítulo, se escriben las generalidades sobre los aceites esenciales, métodos de obtención y equipos utilizados. En el segundo capítulo, se presenta el diseño térmico del destilador, donde se muestran los aspectos relacionados con la generación de vapor y el análisis de las pruebas realizadas en la planta piloto del CENIVAM. En el tercer capítulo, aparece el diseño mecánico del destilador. En el cuarto capítulo, se describen los diseños térmico y mecánico del condensador. El quinto capítulo, contiene el diseño y la selección de equipos auxiliares y, finalmente, sigue las conclusiones y recomendaciones.

1 GENERALIDADES DE LOS ACEITES ESENCIALES

1.1 DEFINICIÓN DEL ACEITE ESENCIAL

- Aceite esencial es la parte del metabolismo de un vegetal, que conforman generalmente 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).
- El aceite es una 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 terpenos 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 DE LOS ACEITES ESENCIALES

En condiciones ambientales, los aceites esenciales son líquidos menos densos que el agua, pero más viscosos que ella. Poseen un color en la gama del amarillo, hasta ser transparentes, en algunos casos, llegan a ser inflamables, no son tóxicos, aunque pueden provocar alergias en personas sensibles a determinados terpenoides. Son inocuos, mientras la dosis suministrada no supere los límites de toxicidad. Sufren degradación química en presencia de la luz solar, del aire, del calor, de ácidos y álcalis fuertes, generan oligómeros de naturaleza indeterminada. Son solubles en los disolventes orgánicos comunes.

Los aceites esenciales generalmente son mezclas complejas de hasta más de 100 componentes que pueden ser:

- Compuestos alifáticos de bajo peso molecular (alcanos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos)
- Monoterpenos (C₁₀)
- Sesquiterpenos (C₁₅)
- Fenilpropanos

En su gran mayoría son de olor agradable, aunque existen algunos de olor relativamente desagradable como, por ejemplo, los del ajo y la cebolla, que contienen compuestos azufrados.

1.3 HISTORIA

En el Lejano Oriente, empezó la historia de los aceites esenciales. Las bases tecnológicas del proceso fueron concebidas y empleadas primariamente en Egipto, Persia y la India. Sin embargo, fue en Occidente donde surgieron los primeros alcances de su completo desarrollo.

Los datos experimentales de los métodos empleados, en los tiempos antiguos, son escasos y vagos. Aparentemente, solo el aceite esencial de trementina fue obtenido por los métodos conocidos actualmente, aunque se desconoce exactamente cuál fue.

Hasta la Edad Media, el arte de la hidrodestilación fue usado para la preparación de aguas florales. Cuando se obtenían, los aceites esenciales en la superficie del agua floral, eran desechados comúnmente, por considerarlos un sub-producto indeseado.

La primera descripción auténtica de la hidrodestilación de aceites esenciales reales ha sido realizada por Arnold de Villanova quien introdujo “el arte de este proceso” en la terapia europea. Bombastus Paracelsus (1493 – 1541) estableció el concepto de la *Quinta Essentia*, es decir, la fracción extraíble más sublime y posible técnicamente de obtener de una planta y constituye la droga requerida para el uso farmacológico. La definición actual de aceite “esencial” recae en el concepto desarrollado por Paracelsus (Günther, 1948).

Existen evidencias de que la producción y el uso de los aceites esenciales no llegaron a ser generales hasta la mitad del siglo XVI. El físico Brunschwig (1450 – 1534) menciona sólo 4 aceites esenciales conocidos durante esa época: el de trementina, el del enebro, el del romero y el del espliego (Günther, 1948).

Con la llegada de la máquina de vapor y el uso de calderas de vapor para las industrias manufactureras (Siglo XIX), la hidrodestilación se convirtió en un proceso industrial a gran escala. Surgieron dos tipos de generadores: los de calor vivo, donde la caldera forma parte del mismo recipiente donde se procesa el material vegetal y trabaja a la temperatura de ebullición atmosférica; y las calderas de vapor, las cuales no forman parte del equipo y trabajan en un amplio rango de flujos y temperaturas para el vapor saturado. Se puede afirmar, que la hidrodestilación industrial nació en el siglo XIX y durante el siglo XX, se buscó mejorar los diseños mecánicos de los alambiques, minimizar el alto consumo energético requerido y controlar adecuadamente el proceso.

1.4 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

Existen varios métodos para la extracción de aceites esenciales a partir de plantas aromáticas de los cuales los principales son:

- *Enfleurage* o enflorado.
- Extracción con solventes.

- Extracción por prensado.
- Extracción con fluidos supercríticos.
- Extracción asistida por radiación de microondas.
- Hidrodestilación.
- Destilación agua-vapor.
- Destilación por arrastre con vapor.

1.4.1 Enfleurage

Para este proceso se utilizan grasas naturales con puntos de ablandamiento alrededor de 40°C, normalmente manteca de cerdo RBD (Refinada, Blanqueada, Desodorizada), la cual se extiende en bandejas en profundidad no mayor de 0.5 cm y sobre ella se colocan los pétalos de flores o el material vegetal, desde donde se van a extraer los principios odoríficos, el contacto puede durar de 3 a 5 días. Luego, el material vegetal es removido y reemplazado por material fresco, esta operación se repite buscando la saturación de la grasa. Posteriormente, la grasa impregnada del principio activo, "*le pomade*", se lava con alcohol libre de congéneres (alcohol de perfumería), relación 1/1 dos veces consecutivas. El alcohol se filtra y se destila a vacío (21 in Hg, T 30 °C) hasta recuperar un 80 % del volumen de alcohol, como mínimo, en el fondo queda un residuo llamado "*absolute*".



Figura 1. Enfleurage.

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

1.4.2 Extracción con solventes

El material previamente debe de ser molido, macerado o picado, para permitir mayor área de contacto entre el sólido y el solvente; el proceso ha de buscar que el sólido, o el líquido, o ambos, estén en movimiento continuo, para lograr mejor eficiencia en la operación, el proceso se realiza preferiblemente a temperatura y presión ambiente, y también puede ejecutarse por lotes o en forma continua. Los solventes más empleados son: etanol, metanol, isopropanol, hexano, ciclohexano, tolueno, xileno, ligroína, éter etílico, éter isopropílico, acetato de etilo, acetona, cloroformo; no se usan clorados ni benceno por su peligrosidad para la salud. Los solventes se recuperan por destilación y pueden ser reutilizados.

El solvente adicionalmente extrae otros componentes como colorantes, gomas, mucílagos, ceras, grasas, proteínas, carbohidratos. En la etapa de recuperación de los solventes (atmosférica o al vacío), después de los condensadores ha de disponerse de una unidad de enfriamiento, para la menor pérdida del solvente. El material residual en la marmita de destilación, contiene concentrados las materias odoríficas, que se conocen como “*concrete*”.

En caso de emplear glicoles, aceites vegetales, aceites minerales, como solventes extractores, los componentes odoríficos son imposibles de recuperar desde allí y el producto se comercializa como un todo, conocido como “extracto”.

1.4.3 Extracción por prensado

También se le conoce como “expresión”. El material vegetal es sometido a presión, bien sea en prensas tipo *batch* o en forma continua; dentro de éstos se tienen los siguientes tipos de equipos: Tornillo sin fin de alta o de baja presión, extractor *expeller*, extractor centrífugo, extractor *decanter* y rodillos de prensa. Para los cítricos antiguamente se empleó el método manual de la esponja,

especialmente en Italia, que consiste en exprimir manualmente las cáscaras con una esponja hasta que se empapa de aceite, se exprime entonces la esponja y se libera el aceite esencial.

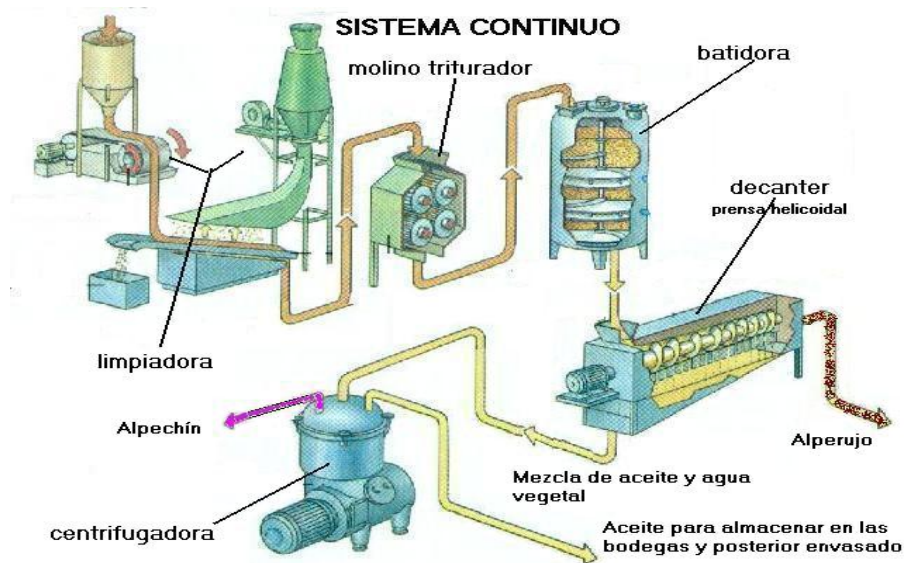


Figura 2. Esquema de extracción del aceite por prensado continuo.

Fuente: <http://thales.cica.es>

Otros métodos corresponden a raspado, como el del estilete o "*ecuelle*", donde la fruta se pone a girar en un torno y con un estilete se raspa la corteza únicamente; permanentemente cae un rocío de agua que arrastra los detritos y el aceite liberado; otro proceso emplea una máquina de abrasión similar a una peladora de papas, la "*pellatrice*" y también hace uso del rocío de agua. En estos procesos la mezcla detritos-agua-aceite se centrifuga a 5000 rpm durante 40 min y el aceite esencial recuperado se coloca en una nevera a 3°C durante 4 h, para solidificar gomas y ceras que se localizan en la superficie. El aceite esencial se guarda en recipientes oscuros a 12 °C. Los aceites obtenidos por prensado y/o raspado, se les comercializa como "expresión en frío" y cumplen la funciones de odorizantes y saborizantes.

1.4.4 Extracción con fluidos supercríticos¹

Punto crítico corresponde a las condiciones de temperatura y presión, para un gas o un vapor, por encima de las cuales la sustancia ya no puede ser licuada por incremento de presión. Adicionalmente las propiedades de la fase líquida y/o vapor son las mismas, es decir, no hay diferenciación visible ni medible entre gas y líquido, se habla así de P_c , T_c , V_c , D_c .

La sustancia más empleada es el CO_2 , que en estas condiciones presenta baja viscosidad, baja tensión superficial, alto coeficiente de difusión (10 veces mayor que el de un líquido normal), que conduce a un alto contacto con la superficie del material y a la posibilidad de penetrar a pequeños poros y rendijas del mismo lo que asegura una buena eficiencia en la extracción en un corto tiempo. En la parte final del proceso hay una remoción total del solvente, como se realiza a una temperatura baja, se disminuye la pérdida de sustancias volátiles y se evita la formación de sabores y olores extraños; presenta un C_p bajo, lo que disminuye notoriamente el consumo de energía del proceso, en intensidad y en tiempo. El CO_2 no es tóxico, ni explosivo, ni incendiario, es bacteriostático y es clasificado por la FDA como GRAS (*Generally Recognized As Safe*).

Los equipos se construyen en acero inoxidable tipo 316, deben soportar altas presiones en su operación y deben de ofrecer un manejo seguro. Por efecto mismo de la escala, para equipos más grandes, mayor debe de ser la capacidad de la bomba de compresión; mayor el espesor de las paredes, de las bridas en los mismos, de los cierres y sellamientos muy herméticos.

.

Puede tenerse la siguiente solubilidad en CO_2 supercrítico:

¹ II Segundo Congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Octubre 19-21 de 2006.

- Solubles: Hidrocarburos, éteres, ésteres, cetonas, lactosas, alcoholes, aldehídos, monó y sesquiterpenos.
- Ligeramente solubles: Grasas, resinas, esteroides, alcaloides, carotenos y oligómeros.
- Insolubles: Azúcares, glicósidos, aminoácidos, plásticos, proteínas y polisacáridos.

Se puede trabajar con CO₂ de alta, (P 150 bar; T 50°C), o de baja, (90 bar; T30°C), presión y temperatura. En el diagrama P- T, puede verse la operación del equipo.

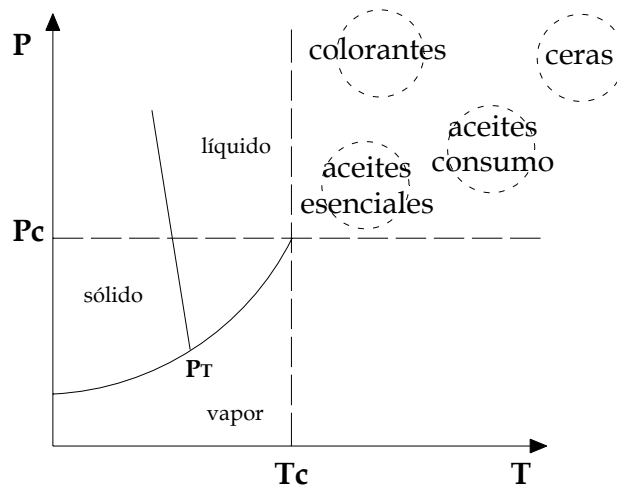


Figura 3. Diagrama P-T.

Fuente: II Segundo Congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas; Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Octubre 19-21 de 2006.

Después de la extracción, el CO₂ debe de ser enfriado por debajo de 5°C, para que la bomba pueda tomarlo líquido y bombearlo.

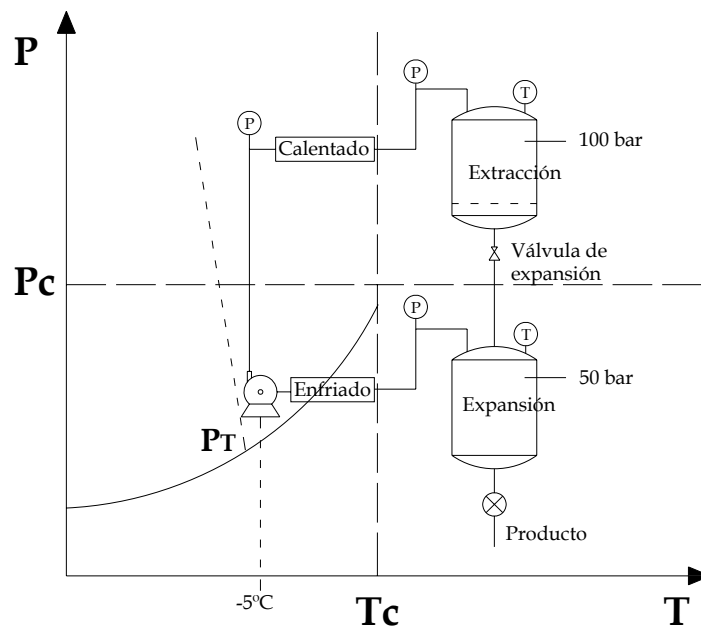


Figura 4. Diagrama equipo de extracción supercrítica.

Fuente: II Segundo Congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas; Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Octubre 19-21 de 2006.

Las ventajas técnicas de la SFE son:

- Obtención de aceites esenciales con una mayor frescura y aroma natural.
- Uso de temperaturas moderadas, para evitar la degradación térmica del producto.
- No hay presencia del disolvente en el aceite.
- Mayor rendimiento por operación.
- Proceso libre de contaminantes biológicos (microbios, hongos, etc.).
- Flexibilidad en la preparación del disolvente.
- Mínimo impacto ambiental.
- Flexibilidad en las variables de control para el proceso.
- Automatización de los equipos.

1.4.5 Extracción asistida por la radiación de microondas

El método consiste en sumergir el material vegetal en un medio disolvente que puede ser el CCl_4 , el hexano o tolueno y utilizar la radiación de microondas, que causan movimientos de moléculas por migración de iones y rotación de dipolos, lo que permite un rápido calentamiento del agua contenida en el material vegetal, debido a la presión de vapor generada por este calentamiento se rompen las estructuras celulares, que contienen la esencia, la cual migra hacia el disolvente.

La extracción asistida por la radiación de microondas es ampliamente utilizada a nivel de laboratorio, por su rapidez en la extracción y bajo consumo de energía.



Figura 5. Extracción por la radiación de microondas, equipo de laboratorio.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

1.4.6 Hidrodestilación

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

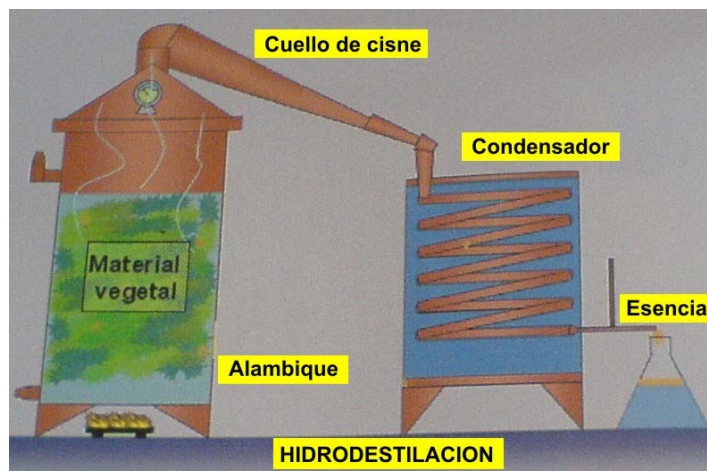


Figura 6. Hidrodestilación.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

En la destilación con agua, el material vegetal siempre debe encontrarse en contacto con el agua. Un factor de especial importancia a considerar es si el calentamiento del destilador se hace con fuego directo, el agua presente en él 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.

Cuando se emplea hidrodestilación, no se requiere de un calderín generador de vapor. Estos sistemas son muy utilizados en el campo, son fáciles de instalar, se pueden llevar de un sitio a otro, son baratos, seguros, fáciles de operar y presentan un consumo energético bajo. Los aceites producidos son más coloreados, que los obtenidos por arrastre con vapor propiamente dicho y tienden a presentar un cierto olor a quemado: eucalipto, *citronella*, limonaria.

Por lo anterior, estos aceites siempre van a requerir una etapa adicional de refinación.

Este método es útil cuando el material vegetal tiende a aglomerarse mientras el vapor pasa a través de él, y una ventaja adicional es que el costo involucrado para

la fabricación del equipo es de los más bajos en comparación con los métodos enunciados.

1.4.7 Destilación Agua-Vapor

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



Figura 7. Destilación agua-vapor.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

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

1.4.8 Destilación por arrastre con vapor

La destilación por arrastre con vapor, que se emplea para extraer los aceites esenciales, es una destilación de mezcla de dos líquidos inmiscibles y consiste, en resumen, en una vaporización a temperaturas inferiores a las de ebullición de cada uno de los componentes volátiles por efecto de una corriente directa de vapor agua, el cual ejerce la doble función de calentar la mezcla hasta su punto de ebullición y disminuir la temperatura de ebullición por adición de la tensión de vapor, del vapor que se inyecta, a la de los componentes volátiles de aceites esenciales. Los vapores que salen del cuello de Cisne se enfrían en un condensador donde regresan a la fase líquida, los dos productos inmiscibles, agua y aceite esencial finalmente se separan en el vaso Florentino o separador.



Figura 8. Destilación por arrastre con vapor.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

La destilación por arrastre con vapor de agua, no ha podido ser sustituida por la extracción con solventes orgánicos o con calentamiento directo por la gran cantidad de ventajas que tiene con relación a estos dos últimos sistemas y que pueden resumirse en:

- El vapor de agua es muy económico en comparación con el costo de los solventes orgánicos.
- Se asegura a través de este proceso que no se recaliente el aceite esencial.
- No requiere el uso de equipos sofisticados.

1.5 COMPONENTES EN LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR

El proceso de extracción por arrastre con vapor de agua es el método más utilizado por la industria para extraer el aceite esencial de las plantas medicinales y aromáticas, por esta razón, se decidió utilizar este método para la planta de extracción a diseñar y construir.

La planta de extracción a diseñar está compuesta principalmente por los siguientes equipos, los cuales serán objeto de diseño o selección en los siguientes capítulos.

- Generador de vapor.
- Alambique.
- Condensador.
- Vaso separador de aceites.

1.5.1 Generadores de vapor

La destilación por arrastre con vapor utiliza una fuente generadora de vapor llamada caldera; la cual se puede definir como un dispositivo a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía la transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

La caldera puede utilizar como fuente de combustible gas, ACPM, carbón, biomasa, *fuel oil*, ect.



Figura 9. Caldera de biomasa.

Fuente: MORENOS LTDA. Planta de extracción de aceites esenciales, Anolaima, Noviembre de 2007.

1.5.2 Alambique

Es el componente principal del equipo preferiblemente construido en acero inoxidable y es donde se realiza la extracción de los aceites esenciales.

Consiste en un tanque cilíndrico externo denominado como el cuerpo del destilador; en su interior se encuentra alojado otro tanque cilíndrico conocido como cartucho el cual contiene el material vegetal, éste, a su vez, es removible haciendo más ágil las etapas de cargue y descargue del destilador. En el fondo del cuerpo se encuentra el distribuidor de vapor que puede ser en forma de cruz o en forma de serpentín.

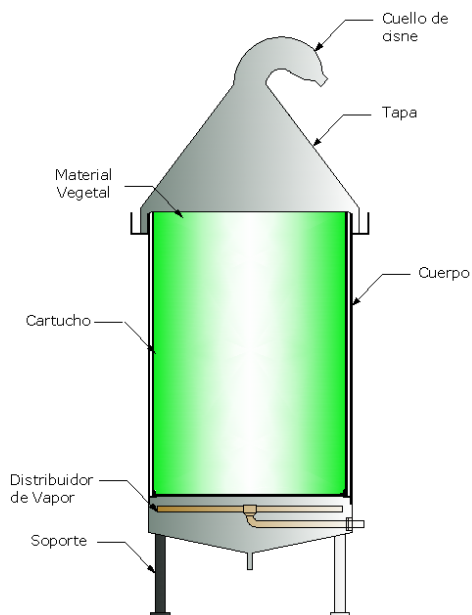


Figura 10. Partes del alambique.

Fuente: Autores del proyecto

En la parte superior se tiene una tapa que deberá garantizar un cierre hermético para evitar las fugas de vapor; generalmente, de la parte superior de la tapa sale un tubo llamado "cuello de Cisne" o cuello de Ganso que es el conductor de los vapores hacia el condensador.

1.5.3 Condensador

El condensador es un intercambiador de calor que no sólo debe condensar el vapor destilado, sino también garantizar que el condensado salga a una temperatura a la cual el aceite esencial y el agua se separen adecuadamente.

Por su bajo costo, el más utilizado es el de tipo serpentín, donde el vapor con aceite viaja a través de un tubo en espiral sumergido en un tanque con agua de enfriamiento, por lo general, el tubo se fabrica en cobre pero el aceite esencial es bastante corrosivo, por lo que es conveniente construirlo en acero inoxidable.



Figura 11. Condensador enfriado por agua.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

Un condensador de coraza y tubos es más eficiente, pero su costo es mucho mayor, en este tipo de condensador la mezcla de vapor y aceite viaja a través del haz de tubos y el agua de enfriamiento fluye en contracorriente por el casco o coraza. Para no desperdiciar tanta agua, es preferible instalar una torre de enfriamiento y hacer un ciclo cerrado.



Figura 12. Condensador de coraza y tubos.

Fuente: <http://www.comeval.es>.

En algunas ocasiones, no se puede contar con una fuente de agua cercana por lo que se usan condensadores enfriados por aire de flujo cruzado, donde el aire proviene de ventiladores.



Figura 13. Condensador enfriado por aire.

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

1.5.4 Vaso separador de aceites o vaso Florentino

Es un recipiente diseñado de tal manera, que se garantice que el aceite esencial tenga el tiempo suficiente para que se separe eficazmente de la mezcla agua-aceite, que sale del condensador.



Figura 14. Vaso separador.

Fuente: CENIVAM. Laboratorio de Cromatografía.

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

2 DISEÑO TERMICO DEL DESTILADOR

El diseño térmico del destilador, comprende el cálculo del requerimiento de flujo másico de vapor para el proceso de extracción del aceite esencial, por el método de arrastre con vapor.

Para determinar el requerimiento de potencia de la caldera, se debe calcular el flujo de vapor necesario para llevar a cabo el proceso de destilación; para esto, se tomó como referencia la teoría desarrollada por el ingeniero Tim Denny² y se compararon con pruebas realizadas en la planta piloto que se encuentra en el CENIVAM en el campus universitario de la Universidad Industrial de Santander, UIS. Esta planta piloto fue diseñada para una capacidad de 50 kg de material vegetal a una densidad de empacado de 200 kg/m³.

El material vegetal utilizado durante las pruebas fue “limonaria” (*Cymbopogon citratus*), debido a que ésta fue la planta aromática a procesar por la planta a diseñar; las plantas de limonaria usadas para las pruebas se cultivaron y fueron cosechadas, en parcelas que se ubicaron a los alrededores del CENIVAM dentro del campus Universitario, lo que permitió hacerle un mejor seguimiento y control de la especie.

En aras de aportar al desarrollo de esta tecnología, con el fin de modernizarla y optimizarla, fue necesario conocer sus antecedentes con los proyectos de grado realizados anteriormente, el control operacional de los equipos y el efecto de las variables y parámetros operacionales en el rendimiento; para tal fin, se diseñaron y realizaron pruebas en la planta piloto, obteniendo un flujo de vapor real de

² *Field distillation for herbaceous oils. Denny, McKenzie Associates. Australia. 2001.*

proceso el cual se compara con los requerimientos de flujo de vapor (\dot{m}_v) calculado con la teoría existente del ingeniero Tim Denny.

2.1 METODO PARA DETERMINAR EL FLUJO TEORICO DE VAPOR

Para la determinación del flujo de vapor teórico requerido, se utilizó la teoría desarrollada por el ingeniero Tim Denny, quien llevó a cabo experimentos con dos tipos de plantas para la extracción de aceites esenciales para herbáceas ligeramente absorbentes (Menta) y muy absorbentes (Lavanda), fijando condiciones estándar que permitían tener un punto de comparación al momento de trabajar a condiciones diferentes, a continuación se presentan las condiciones estándar fijadas para la lavanda³:

- Área transversal de la carga (A) igual a 1,026 m²;
- Altura estándar de empacado (H) igual a 0,95 m;
- Peso del material vegetal estándar (M) = 300 Kg;
- Flujo estándar de vapor (\dot{m}_l) para la lavanda igual a 3,170 kg/min;
- Contenido de aceite estándar para la lavanda igual a 9.09 mL/kg;
- *End point*⁴ momento en el que el flujo de aceite extraído es menor a 10 mL/min;
- El material vegetal no debe estar marchito por el sol, y debe ser pesado, y destilado inmediatamente es cosechado;
- El vapor es a presión atmosférica.

³ Hablamos de la lavanda ya que por sus características se asimila a la limonaria.

⁴ Punto hasta el cual va la prueba, ya que según el ingeniero TIM DENNY después de este punto no es rentable extraer el aceite esencial.

Estas condiciones estándar sirven como referencia para el cálculo del tiempo de extracción de la lavanda a condiciones diferentes de proceso (densidad, masa de material vegetal y altura de la carga).

El ingeniero Tim Denny realizó pruebas a condiciones diferentes a las estándar, por tal motivo él aplicó correcciones por diferencia de densidad y de rendimiento a los resultados de las pruebas, permitiéndole tener un punto de comparación para deducir el comportamiento del proceso de extracción y así poder desarrollar su teoría.

El objetivo de esta teoría desarrollada por el ingeniero Tim Denny es el cálculo del flujo másico de vapor requerido para llevar a cabo el proceso de extracción de aceite esencial para una masa de material vegetal en un tiempo determinado.

2.1.1 Procedimiento para el cálculo del flujo de vapor (\dot{m}_v)

Para calcular el flujo másico de vapor requerido, para extraer el aceite esencial del material vegetal, es necesario conocer la masa de vapor requerida, (M_v) [Kg], y el tiempo de proceso, T_p [min].

$$M_v = \dot{m}_l * T_{pr} \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_v = \frac{M_v}{T_p} \quad (2.2)$$

Donde:

M_v = Masa de vapor requerida para extraer el aceite esencial;

\dot{m}_l = Flujo de vapor estándar para el material vegetal;

T_{pr} = Tiempo requerido para extraer el aceite esencial a condiciones estándar;

\dot{m}_v = Flujo de vapor requerido para extraer el aceite esencial;

T_p = Tiempo de proceso para extraer el aceite esencial.

El tiempo requerido para extraer el aceite esencial a condiciones estándar (T_{pr}), se obtiene al hallar el tiempo respectivo de cada una de las dos etapas en las que se divide el proceso de extracción, las cuales son:

- Etapa de calentamiento;
- Etapa de extracción.

$$\text{Entonces: } T_{pr} = T_c + T_e \quad (2.3)$$

Donde:

T_c = Tiempo requerido para la etapa de calentamiento a condiciones estándar;

T_e = Tiempo requerido para la etapa de extracción a condiciones estándar.

Cálculo del tiempo de calentamiento, (T_c)

El tiempo de calentamiento es el necesario para elevar la temperatura del material vegetal y del destilador hasta la temperatura donde comienza a desprenderse el aceite esencial.

Para obtener el tiempo de calentamiento es necesario realizar un balance de energía para establecer la masa de vapor requerida para calentar el material vegetal y el destilador, y luego dividir la masa total de vapor requerida para el calentamiento sobre el flujo másico de vapor de referencia.

$$M_{vcs} = \frac{M_s * C_{ps} * \Delta T}{h_{fg}} \quad (2.4)$$

$$M_{vch} = \frac{M_h * C_{ph} * \Delta T}{h_{fg}} \quad (2.5)$$

$$M_{ct} = M_{vcs} + M_{vch} \quad (2.6)$$

$$T_c = \frac{M_{ct}}{\dot{m}_l} \quad (2.7)$$

Donde:

M_{vcs} = Masa de vapor requerida para calentar el sistema (Destilador);

M_{vch} = Masa de vapor requerida para calentar el material vegetal;

M_s = Masa del sistema;

M_h = Masa del material vegetal;

C_{ps} = Calor específico del acero inoxidable;

C_{ph} = Calor específico del material vegetal;

Δ_T = Diferencia entre la temperatura ambiente y la del vapor;

h_{fg} = Calor latente del vapor;

M_{ct} = Masa de vapor requerida para la etapa de calentamiento.

Cálculo del tiempo de extracción básico a condiciones estándar:

El tiempo de extracción es el periodo después del calentamiento hasta el momento en el cual termina la destilación. Su cálculo depende si la herbácea es muy absorbente (gran capacidad de absorber agua) o ligeramente absorbente.

Solo se mostrara el procedimiento para el cálculo del tiempo de extracción para las herbáceas muy absorbentes debido a que el material vegetal a procesar, (limonaria -*Cymbopogon citratus*), es de este tipo.

El tiempo de extracción para este tipo de plantas, depende de dos parámetros, que son únicos para cada herbácea, el *tiempo básico*, t y el *parámetro de incremento de la cantidad de aceite por unidad de altura de la carga*, s , definidos en el anexo A, y se relacionan matemáticamente así:

$$T_e = t * \sqrt{1 + \frac{H}{s}} \quad (2.8)$$

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

EL tiempo básico (**t**), es el tiempo requerido para evaporar el aceite que se ubica sobre la superficie del material vegetal una vez se revienta una glándula de aceite debido al calor suministrado por el vapor; al aceite ubicado sobre la herbácea después que esta se revienta también se conoce como parche típico.

El parche típico tiende a aumentar su tamaño a medida que aumenta la altura de la carga, para expresar la relación entre el área del parche de aceite y su incremento de área por unidad de altura de la carga se utiliza el parámetro de incremento de la cantidad de aceite por unidad de altura de la carga (**s**).

Como el material vegetal a procesar, limonaria -*Cymbopogon citratus*, y los parámetros **t** y **s** que dedujo el ingeniero Tim Denny se aplican para la lavanda y la menta, se hace necesario calcular el tiempo básico, **t**, y el parámetro de incremento de aceite, **s**, para la herbácea a procesar; para esto es necesario realizar dos pruebas a densidades de empacado similares y altura de carga diferentes, y al reemplazar los tiempos de extracción de cada prueba, **T_{e1}** y **T_{e2}**, y las alturas respectivas, **H₁** y **H₂**, en las siguientes ecuaciones, deducidas por TIM DENNY, se obtienen los parámetros **t** y **s**.

$$\frac{T_{e1}}{T_{e2}} = \sqrt{\frac{1+(H_1/S)}{1+(H_2/S)}} \quad (2.9)$$

$$t = T_{e1} * \sqrt{\frac{s}{s+H_1}} \quad (2.10)$$

Una vez conocido los valores de **t** y **s**, y al reemplazarlos en la Ecuación 2.8 se obtiene el tiempo de extracción a condiciones estándar, para saber el tiempo de extracción a condiciones diferentes, se hace necesario corregir el los valores de **t** y **H**.

Tabla 1. Valores de t y s, calculados por TIM DENNY para la lavanda

| Parámetro | Valor | Unidad | Descripción |
|-----------|--------|--------|--|
| t | 9.719 | min | Tiempo básico. |
| s | 40.946 | cm | Parámetro de incremento de la cantidad de aceite por unidad de altura de la carga. |

Fuente: DENNY, Tim. *Field distillation for herbaceous oils*

2.1.2 Corrección de los factores t, s y la altura H.

Para calcular los requerimientos de flujo de vapor para procesos de extracción que se realicen a una densidad de empaqueo diferente a la estándar, es necesario corregir los valores de **t** y **H**.

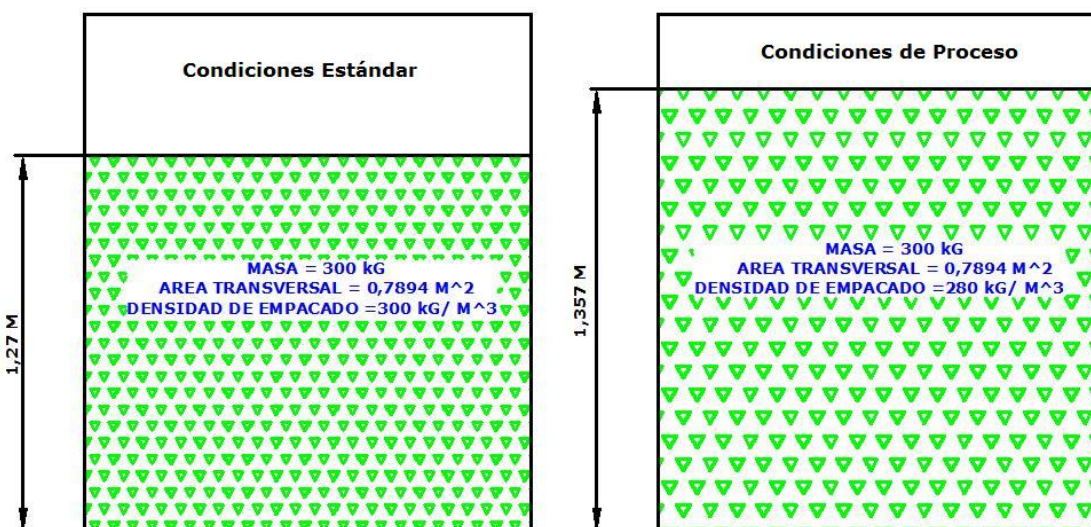


Figura 15. Densidad de empaqueo del material vegetal.

Fuente: Autores del proyecto.

Al observar la anterior figura se muestran dos recipientes con la misma cantidad de material vegetal, pero a una densidad de empaqueo diferente, se puede apreciar que el recipiente a menor densidad de empaqueo tiene mayor espacios libres para el paso del flujo de vapor encontrando una menor resistencia en comparación con el recipiente a condiciones estándar que tiene una mayor densidad. Por este motivo es que hay que ajustar el factor **t** y la altura **H** por el efecto de la diferencia de densidades.

Corrección del tiempo básico

El tiempo básico corregido, t_c , se obtiene al dividir el tiempo básico (t) con el factor de corrección de densidad F_{cd} .

$$t_c = \frac{t}{F_{cd}} \quad (2.11)$$

Donde:

$$F_{cd} = \frac{(A - 0.00664 * (\rho_l * H * A)^{2/3})}{(A - 0.00664 * (M_h)^{2/3})} \quad (2.12)$$

A = Área transversal a la dirección del flujo de vapor

ρ_l = Densidad de empaqueo estándar

H = Altura de la carga

M_h = Masa del material vegetal

El factor de corrección de densidad (F_{cd}), fue desarrollado por el ingeniero Tim Denny gracias al estudio de las pruebas que él realizó y con el único propósito de simplificar el proceso de determinación del flujo de vapor, ya que siempre se presentarían condiciones de proceso diferentes a la estándar y sin la ayuda de los factores de corrección habría que calcular para cada proceso los factores t y s , los cuales requieren un proceso de cálculo más complejo.

Corrección de la altura de carga

La altura H se modifica multiplicando su valor por la relación de densidades, así:

$$H_v = H * \frac{\rho}{\rho_l} \quad (2.12)$$

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

Corrección del parámetro de incremento de aceite esencial (s)

El parámetro de incremento de aceite esencial (**s**) se modifica, cuando el rendimiento del proceso, **R_d**, en [ml de aceite producido / kg de material vegetal] es diferente del rendimiento estándar. El valor de **s** varía inversamente con el cambio en el rendimiento, es decir:

$$S_c = S * \frac{R}{R_d} \quad (2.13)$$

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

Los valores de **s** se toman como los valores reales, sin hacer ninguna modificación, ya que el rendimiento por 1 kg, **R**, depende básicamente de las condiciones de suelo y clima donde se cultive la herbácea.

2.1.3 Cálculo del tiempo de extracción corregido.

El tiempo de extracción, **T_e**, a las condiciones de diseño se calcula al reemplazar en la Ecuación 2.8 los valores de t, s y H por los valores corregidos para cada uno de ellos, quedando la nueva ecuación de la siguiente forma:

$$T_e = t_c * \sqrt{1 + H_v/S} \quad (2.14)$$

A continuación se muestra el flujograma para el cálculo del flujo másico de vapor requerido \dot{m}_v , para condiciones diferentes a las estándar.

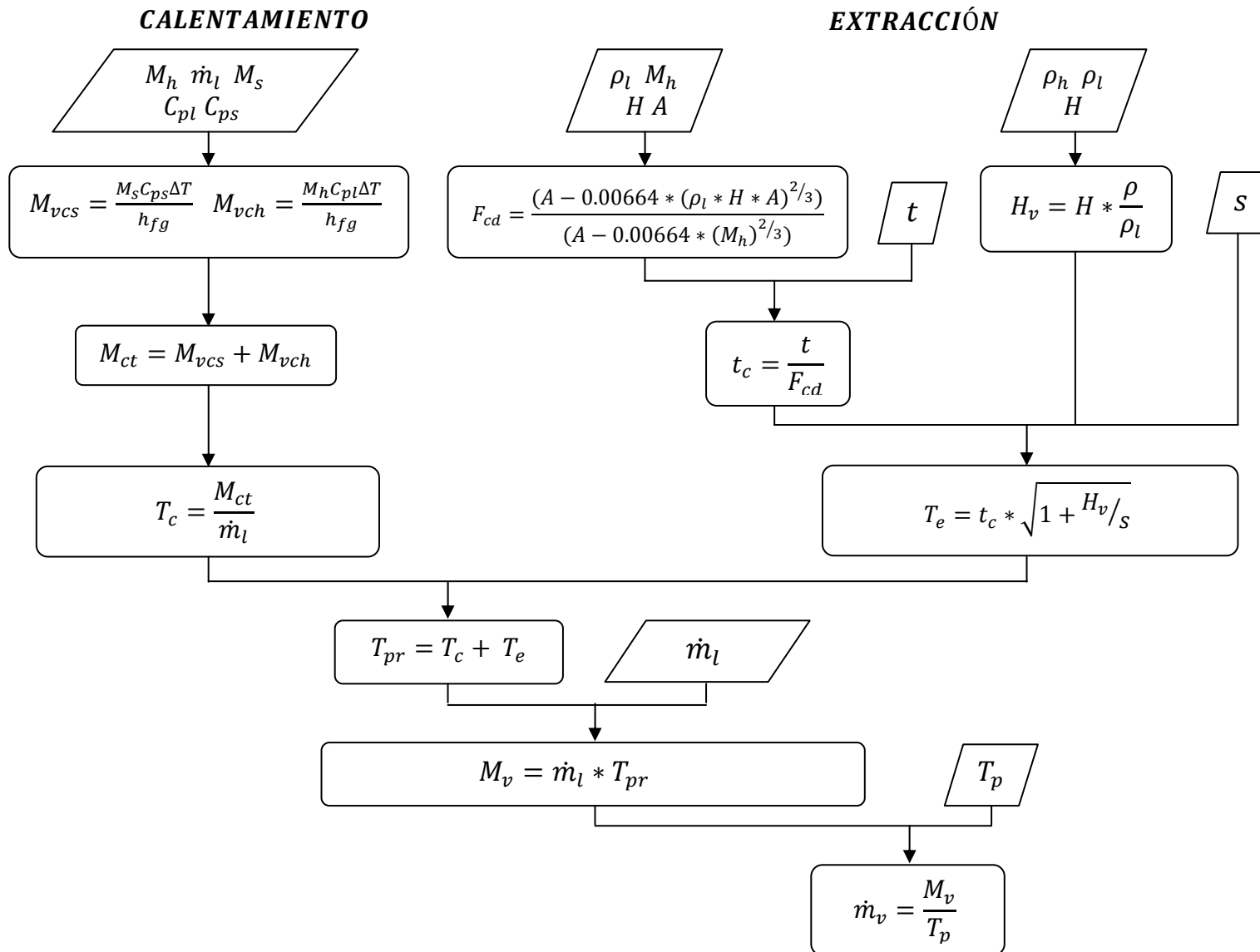


Figura 16. Flujograma para el cálculo del flujo másico de vapor

Fuente: DENNY, Tim. *Field distillation for herbaceous oils* – Autores del Proyecto.

2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

El objetivo de las pruebas es el de conocer y evaluar las variables que influyen en el rendimiento en el momento de la extracción del aceite esencial, específicamente para la limonaria (*Cymbopogon citratus*).

Los factores que inciden en el rendimiento pueden depender tanto de la clase de material vegetal como del procedimiento de la operación del destilador, es decir:

- El tratamiento que se dio a los lotes de material vegetal durante su crecimiento (El sol, agua, fertilizante, la densidad de siembra en el cultivo);
- La temperatura ambiente;
- La humedad del material;
- Condiciones del material al momento de la destilación.

Los factores que tienen que ver con el tratamiento que se le dio a los cultivos afectan la cantidad de aceite que puede contener el material vegetal. Por esta razón se hace necesario realizar las pruebas con un lote de material de la misma siembra, para obtener resultados más acertados.

En total se realizaron 26 pruebas en la planta piloto del CENIVAM, las cuales se hicieron en dos etapas:

- Pruebas preliminares (de la prueba 01 a la 06);
- Pruebas finales (de la prueba 07 a la 26).

2.2.1 Pruebas Preliminares

En esta primera fase de pruebas se observaron la influencia del estado del material vegetal sobre el rendimiento en peso del aceite esencial, siendo analizadas las siguientes características:

- Días de secado del material vegetal;
- El estado del material vegetal (si fue picado o no).

Las pruebas fueron realizadas teniendo en cuenta las siguientes consideraciones o condiciones:

- Tipo de Proceso utilizado: Arrastre con vapor;
- Material Vegetal: “limonaria” (*Cymbopogon citratus*);
- Tiempo de recolección de las muestras: Aproximadamente un Minuto.

La metodología usada para la realización de las pruebas es descrita a continuación:

El material vegetal fue cosechado, secado y picado para las pruebas que lo requirieron, luego se peso y se cargo en el destilador para la realización del proceso de extracción; una vez paso el tiempo de calentamiento del sistema, alcanzando la temperatura a la cual se desprende el aceite esencial del material vegetal, se inicia la etapa de recolección de muestras secuenciales de condensado, (Hidrosol + Aceite Esencial), con duración de aproximadamente un minuto en probetas de capacidad un litro, esta etapa de recolección de muestras va hasta el momento en que la fracción de aceite de las muestra disminuye significativamente.

Tanto el volumen total del condensado en cada probeta y la fracción de aceite presente en cada muestra fue registrado, esta medición se hizo de forma visual siendo posible que se obtenga una margen significativo de error en la lectura del volumen de aceite esencial, por tal motivo al final de cada prueba el aceite obtenido es medido nuevamente para corregir los errores de lectura.

La relación que se evaluó en las pruebas fue el progreso de aceite expresado en mililitros, contra el tiempo de la prueba, adicionalmente se midió la cantidad de agua que sale del destilador.

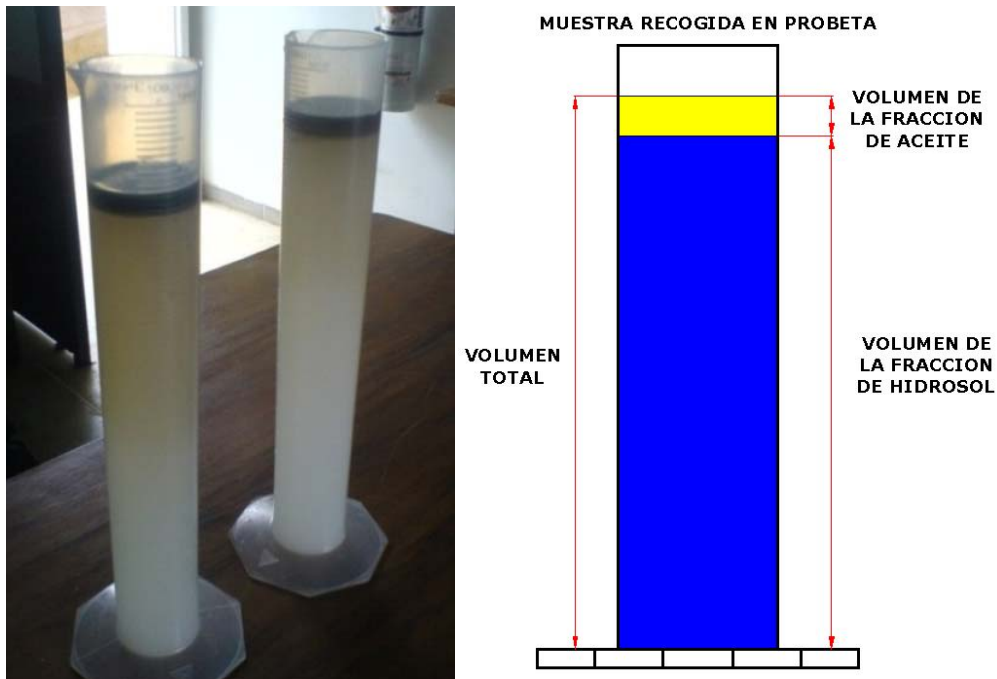


Figura 17. Toma de muestras en probetas durante las pruebas.

Fuente: CENIVAM; Autores del Proyecto.

Los datos fueron recolectados en un formato diseñado y que consta de las siguientes partes:

- Primera Columna: En esta columna se registran las condiciones a las cuales fueron realizadas las pruebas, la hora de inicio y de terminación de la prueba, el tiempo al cual salen los vapores no condensables y el tiempo en el cual se obtiene la primera gota de condensado;
- Segunda Columna: Se registra el tiempo de recolección de cada muestra;
- Tercera Columna: Se registra el volumen total de condensado, (Hidrosol + Aceite Esencial), de la muestra;
- Cuarta Columna: Se registra el volumen de la fracción de aceite presente en cada muestra.

Tabla 2. Formato para pruebas de laboratorio.

| DETALLES DE LA CARGA | | Tiempo muestra (Seg) | Volumen Total, (ml) | Volumen de la fracción de Aceite, (ml) |
|--|------------|----------------------|---------------------|--|
| Fecha de la Prueba | 13-12-2007 | 123 | 1020 | 20 |
| | | 64 | 900 | 50 |
| Hora de inicio | 9:00 AM | 65 | 920 | 50 |
| Hora de terminación | 10:00 AM | 66 | 910 | 40 |
| | | 66 | 900 | 30 |
| Peso Material Vegetal | 102 Kg | 68 | 920 | 30 |
| Altura Cartucho | 0.62 m | 69 | 930 | 25 |
| Densidad de carga (Kg/m ³) | 427.49 | 68 | 930 | 22 |
| Apertura de Válvula | 1/4 | 69 | 930 | 25 |
| | | 69 | 910 | 15 |
| Tiempo no condensados | 596 Sg | 70 | 925 | 15 |
| Tiempo Primera gota | 650 Sg | 70 | 930 | 15 |
| | | 71 | 940 | 15 |
| Volumen Total de Aceite | 303.59 ml | 71 | 925 | 12 |
| Peso del Aceite | 258.05 g | 72 | 940 | 14 |
| Rendimiento en peso | 0.253 % | 70 | 925 | 15 |
| | | 71 | 940 | 14 |
| Flujo másico de vapor (lb/h) | 104 | 72 | 940 | 14 |
| | | 70 | 920 | 8 |
| Flujo Promedio de Condensado (mil/min) | 787.88 | 70 | 920 | 8 |
| | | 69 | 920 | 6 |
| Observaciones: El material vegetal utilizado es Limonaria, fresco y sin picar. | | 70 | 925 | 5 |
| | | 147 | 1935 | 10 |
| | | 69 | 930 | 4 |
| | | 70 | 950 | 3 |
| | | 69 | 920 | 2 |
| | | 73 | 950 | 2 |
| | | 69 | 915 | 2 |
| | | 72 | 925 | 2 |
| | | 72 | 930 | 1 |
| | | 74 | 960 | 1 |
| | | 70 | 915 | 0.5 |
| | | 69 | 925 | 0.5 |
| | 66 | 910 | 0.5 | |

Fuente: Autores del proyecto.

Con los datos recolectados durante las pruebas se calcula el rendimiento en peso de la prueba que es la relación entre el peso del aceite esencial y el peso del material vegetal.

Tabla 3. Resultado de pruebas preliminares

| Prueba | Peso, kg | Estado del material vegetal | Días de Secado | Pérdida de peso | Peso virtual, kg | Peso de AE | Rendimiento % peso | Rendimiento % peso virtual |
|--------|----------|-----------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------|--------------------|----------------------------|
| 01 | 83 | Picado | 0 | 0 | 83 | 301,6 | 0,3633 | 0,3633 |
| 02 | 91 | Sin Picar | 0 | 0 | 91 | 243,41 | 0,2674 | 0,2674 |
| 03 | 102 | Sin Picar | 0 | 0 | 102 | 258,05 | 0,2529 | 0,2529 |
| 04 | 58,5 | Sin Picar | 1 | 20% | 73,125 | 127,57 | 0,2180 | 0,1744 |
| 05 | 120 | Picado | 50% 1 50% 0 | 20% 0% | 135 | 400,2 | 0,3335 | 0,2964 |
| 06 | 78 | Picado | 2 | 40% | 130 | 300 | 0,3846 | 0,2307 |

Fuente: Autores del proyecto.

Observando los resultados obtenidos en las primeras seis pruebas se puede apreciar que las pruebas en las cuales el material vegetal fue picado ofrecieron un mejor comportamiento en el rendimiento en peso,

Para determinar el porcentaje en peso que pierde la limonaria con respecto a los días de secado, se tomaron muestras de material fresco que se pesaron día tras día, hallando así la relación respectiva. Para las pruebas en que se dejó secar el material vegetal se les calculó el peso virtual (peso que debería tener en estado fresco), y con este peso virtual se calcula el rendimiento virtual, el cual al compararlo nos deja apreciar un rendimiento más bajo.

Al analizar esto se puede concluir que el secado del material disminuye el tiempo de extracción, sin lograr una significativa disminución en su volumen, es decir que el material pierde hasta un 50% en peso por secado pero solo pierde un 2% de volumen; exponer el material vegetal a un tiempo de secado puede producir que el material se composte y que el aceite esencial más volátil se desprenda de este afectando esto considerablemente el rendimiento final.



Figura 18. Material Vegetal.

Fuente: CENIVAM. Autores del proyecto

Por esta razón se decidió realizar una segunda etapa de pruebas, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El material a destilar deberá estar a una condiciones de cultivo similares, (sol, agua, fertilizante);
- El material deberá ser cosechado, picado y destilado de una vez.

Estas consideraciones serán aplicadas a las pruebas finales con el fin de obtener resultados más homogéneos.

2.2.2 Pruebas finales

El objetivo de las pruebas finales es el de conocer la influencia de los factores de operación en el proceso de extracción, tales como:

- La densidad de empaçado;
- El flujo de vapor.

El conocer la influencia de estas condiciones de operación sirve para poder fijar las condiciones de operación de los equipos a diseñar.

Otro de los objetivos de estas pruebas finales es la de obtener el tiempo básico (**t**) y el parámetro de incremento de aceite esencial (**s**) para la limonaria, los cuales

son necesarios para el cálculo teórico del flujo másico de vapor y poder compararlos con los datos obtenidos en las pruebas realizadas.

Procedimiento aplicado durante las pruebas:

La limonaria fue recogida de los cultivos del CENIVAM y posteriormente fue picado y pesado para su posterior carga en el destilador, de manera que formara un lecho fijo compactado. Una vez se depositó el material picado dentro del cartucho del destilador este se compactó por medio del peso de una persona, por otra parte el vapor fue inyectado mediante un distribuidor de vapor interno ubicado debajo de la base del cartucho garantizando que este atravesara el lecho de limonaria de la manera más homogénea posible.



Figura 19. Material cortado.

Fuente: CENIVAM. Autores del Proyecto

Conforme el vapor entra en contacto con el lecho, la materia prima se calienta y va liberando el aceite esencial siendo este arrastrado por el vapor saturado que fluye hacia el condensador, en el cual la mezcla de vapor y aceite se condensa para luego poder recogerlas en las probetas con el fin de medir el volumen de de aceite y agua que sale en un determinado tiempo, aproximadamente un minuto, obteniendo así una medida del flujo de agua condensada y aceite producido.

Ya que la humedad contenida en la herbácea afecta su peso y el tiempo de proceso. Entonces se hace necesario medir el porcentaje de humedad del material vegetal en las pruebas, obteniendo un punto de referencia para poder compáralas con las demás; para medir el porcentaje de humedad se tomaron muestras de cada lote destilado y se registraron su peso antes, durante y después del proceso de secado al ambiente, obteniendo así el porcentaje de humedad contenido en lote procesado.

Tabla 4. Resultados Pruebas de Laboratorio.

| Prueba | Peso, (Kg) | Estado Material | Altura Carga, (m) | Flujo Vapor, (lb/h) | Densidad empacado, (K/m3) | Tiempo 1 ^a Gota, (hh:mm:ss) | Tiempo Extracción, (hh:mm:ss) | Rendimiento, (% p/p) |
|--------|------------|-----------------|-------------------|---------------------|---------------------------|--|-------------------------------|----------------------|
| 7 | 138 | fresca | 0,81 | 96,450 | 442 | 00:20:58 | 00:43:01 | 0,313 |
| 8 | 98 | fresca | 0,575 | 102,098 | 442 | 00:16:55 | 00:33:00 | 0,342 |
| 9 | 57,5 | fresca | 0,338 | 102,944 | 442 | 00:09:00 | 00:13:10 | 0,398 |
| 10 | 64 | fresca | 0,55 | 112,885 | 302 | 00:08:00 | 00:30:00 | 0,375 |
| 11 | 64 | fresca | 0,55 | 119,953 | 302 | 00:05:30 | 00:22:55 | 0,436 |
| 12 | 64 | fresca | 0,55 | 136,054 | 302 | 00:05:30 | 00:16:50 | 0,362 |
| 13 | 58,5 | fresca | 0,43 | 131,098 | 353 | 00:04:45 | 00:22:03 | 0,457 |
| 14 | 58,5 | fresca | 0,43 | 164,723 | 353 | 00:03:30 | 00:23:14 | 0,390 |
| 15 | 94,5 | fresca | 0,69 | 127,757 | 355 | 00:09:48 | 00:23:05 | 0,198 |
| 16 | 76,5 | fresca | 0,56 | 123,218 | 353 | 00:09:00 | 00:21:30 | 0,217 |
| 17 | 57,5 | fresca | 0,5 | 116,711 | 298 | 00:06:00 | 00:17:00 | 0,344 |
| 18 | 57,5 | fresca | 0,338 | 131,989 | 442 | 00:07:00 | 00:24:45 | 0,330 |
| 19 | 57,5 | fresca | 0,338 | 102,037 | 442 | 00:07:30 | 00:23:00 | 0,376 |
| 20 | 55 | fresca | 0,47 | 102,939 | 304 | 00:07:10 | 00:19:40 | 0,465 |
| 21 | 64 | fresca | 0,55 | 144,643 | 302,36 | 00:03:32 | 00:19:17 | 0,387 |
| 22 | 64 | fresca | 0,55 | 129,303 | 302,36 | 00:05:53 | 00:19:05 | 0,375 |
| 23 | 64 | fresca | 0,55 | 139,934 | 302,36 | 00:05:50 | 00:14:45 | 0,397 |
| 24 | 64 | fresca | 0,55 | 127,485 | 302,36 | 00:06:20 | 00:15:58 | 0,380 |
| 25 | 64 | fresca | 0,55 | 113,556 | 302,36 | 00:07:00 | 00:23:00 | 0,352 |
| 26 | 44 | fresca | 0,37 | 127,385 | 302,36 | 00:04:45 | 00:13:30 | 0,275 |

Fuente: Autores del proyecto

Influencia de los factores de operación en el proceso de extracción

Para el análisis de la influencia del flujo de vapor y la densidad de empacado en el proceso de extracción, se tomaron las pruebas que más se ajustaron para cada

análisis, en las siguientes graficas se puede apreciar la tendencia de estas variables.

- Flujo de vapor: El rendimiento no depende del flujo de vapor ya que este tiene que ver con las propiedades del material vegetal, pues el aumentar o disminuir el flujo de vapor va a lograr que el proceso dure un menor o mayor tiempo destilando la misma cantidad de aceite esencial; para soportar esto se compararon los resultados obtenidos en las pruebas 21, 24 y 25, siendo estas las condiciones de operación:

Tabla 5. Datos usados para el análisis de la influencia del flujo de vapor

| Prueba | Peso del Material Vegetal, (Kg) | Densidad de Empacado, (Kg/m ³) | Flujo de Vapor, (Lb/h) |
|--------|---------------------------------|--|------------------------|
| 25 | 64 | 302 | 112,28 |
| 24 | 64 | 302 | 129,17 |
| 21 | 64 | 302 | 145,67 |

Fuente: Autores del proyecto

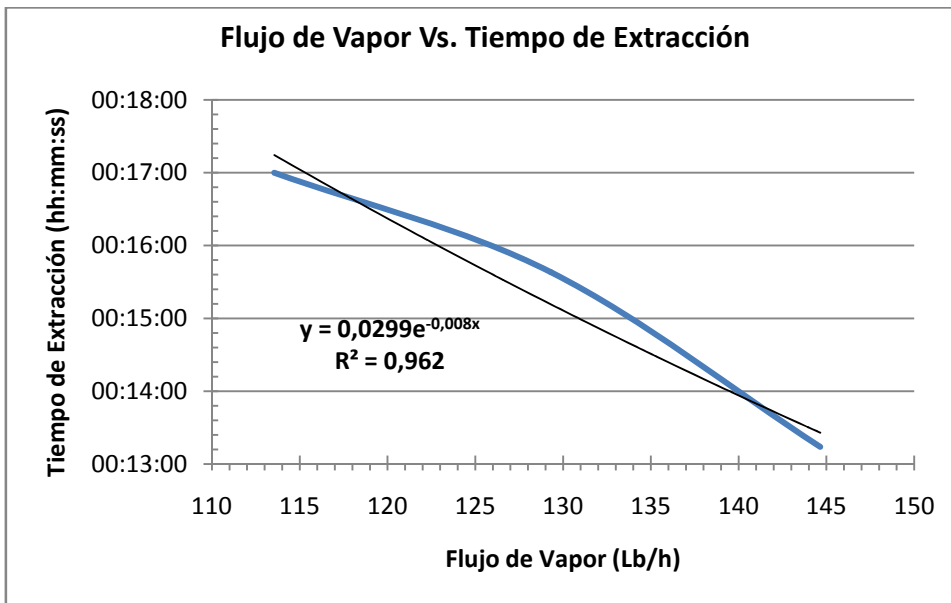


Figura 20. Influencia del flujo de vapor en el rendimiento

Fuente: Autores del proyecto

En la anterior grafica se puede apreciar que la línea de tendencia está definida por una ecuación exponencial, lo cual quiere decir que uno puede reducir el tiempo de extracción aumentando el flujo de vapor pero hay que analizar la relación costo-beneficio, ya que el generar más vapor tiene un mayor costo.

- Densidad de empacado: Para determinar el comportamiento de la densidad de empacado se compararon los resultados obtenidos en las pruebas 09, 11 y 13, siendo estas las condiciones de operación:

Tabla 6. Datos usados en el análisis de la densidad de empacado.

| Prueba | Peso del Material Vegetal, (Kg) | Densidad de Empacado, (Kg/m ³) | Rendimiento % Peso |
|--------|---------------------------------|--|--------------------|
| 11 | 64 | 302 | 0,43 |
| 13 | 58.5 | 353 | 0,457 |
| 09 | 57.5 | 442 | 0,39 |

Fuente: Autores del proyecto

El tener una mayor densidad implica que el material este más compactado creando una mayor resistencia para el paso del flujo de vapor lo cual hace que el vapor cree canales a través del lecho del material vegetal dejando porciones del lecho sin hacer contacto, lo cual afecta negativamente el rendimiento del proceso; de igual forma ocurre cuando el material vegetal queda muy suelto ya que es posible que el vapor se vaya por caminos de menor resistencia. Por tal motivo es importante buscar el punto más apropiado para que la transferencia de calor sea lo más homogénea posible.

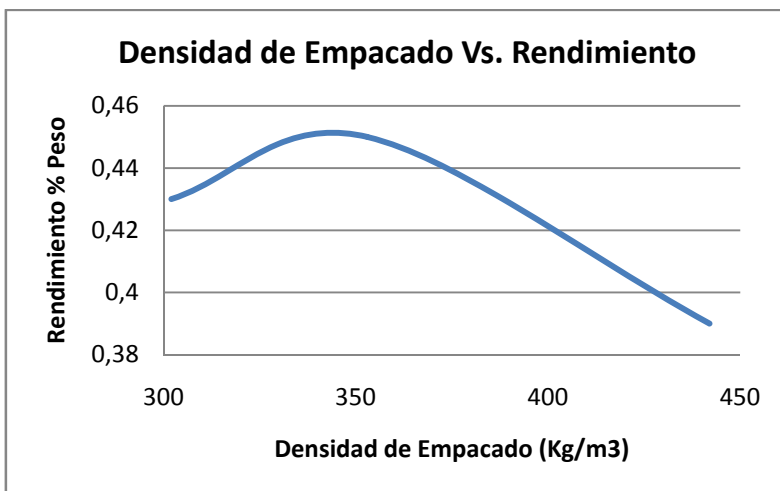


Figura 21. Influencia de la densidad de empacado en el rendimiento

Fuente: Autores del proyecto

Se puede observar que una densidad apropiada para obtener un mejor rendimiento es aquella que este entre los 330 y 350 Kg/m³.

Determinación del tiempo básico (t), el parámetro de incremento de aceite esencial (s) y el calor específico (Cpl) para la limonaria.

Con el fin de poder aplicar la teoría planteada por el ingeniero Tim Denny, se hace necesario conocer las propiedades propias de la limonaria, como lo son el tiempo básico (t), el parámetro de incremento de aceite esencial (s) y el calor específico (Cpl), ya que esta teoría se baso en pruebas para dos tipos de plantas, la lavanda y la menta.

Al igual que el procedimiento hecho por el ingeniero Tim Denny, se fijaron parámetros de referencia o estándar con el propósito de corregir los resultados de las pruebas llevándolos todos a un mismo punto de comparación.

Se tomaron como parámetros de referencia, el promedio de las pruebas 21, 22, 23, 24 y 25, ya que se hicieron en condiciones muy similares.

Tabla 7. Determinación de los parámetros estándar.

| Nº Prueba | Peso, KG | Hum, % | Vol. AE, mL | Peso AE, g | Tc, min | Te, min | Flujo de agua, mL/min | Flujo Vapor, Lb/h | Cont. AE, mL/Kg | H, cm | Área, m ² | Den. Emp, Kg/m ³ | % p/p |
|--------------|-----------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 21 | 64 | 74,46 | 291,7 | 247,92 | 3,53 | 13,23 | 1070 | 144,6 | 4,56 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,387% |
| 22 | 64 | 68,41 | 282,6 | 240,18 | 5,88 | 14,97 | 978 | 129,3 | 4,42 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,375% |
| 23 | 64 | 77,06 | 298,8 | 254,00 | 5,83 | 15,58 | 980 | 139,9 | 4,67 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,397% |
| 24 | 64 | 71,44 | 285,9 | 243,00 | 6,33 | 15,63 | 933 | 127,5 | 4,47 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,380% |
| 25 | 64 | 72,32 | 264,7 | 225,01 | 7,00 | 17,00 | 860 | 113,6 | 4,14 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,352% |
| Prom. | 64 | 72,74 | 284,7 | 242,02 | 6,26 | 15,28 | 964 | 131,0 | 4,45 | 55 | 0,384845 | 302,36 | 0,378% |

Fuente: Autores del proyecto

De la anterior tabla se desprenden las siguientes condiciones estándar:

Tabla 8. Condiciones estándar.

| Condiciones Estándar | |
|--|---------|
| Área (m ²) | 0,3848 |
| Densidad Empacado (kg/m ³) | 302,36 |
| Altura (cm) | 0,55 |
| Flujo de agua (mL/min) | 964,20 |
| Contenido de AE (mL/kg) | 4,45 |
| Cpl (kj/kg ^o K) | 3,274 |
| Contenido AE (mL/kg) | 4,45 |
| Contenido AE (mL/cm) | 5,18 |
| Rendimiento (% p/p) | 0,378% |
| Flujo de vapor (Lb/h) | 130,984 |
| Tc/kg | 0,10 |

Fuente: Autores del proyecto

- Calor Específico: Se determinó usando la correlación de SIEBEL (1918)⁵, quien observó que para vegetales y frutas libres de grasas, el calor específico [J/kg^oK] varía con el contenido de humedad, pudiéndose determinar como la media en peso del calor específico del agua y el calor específico de los sólidos.

⁵Balance de materia y energía, Tema 2, Página 9

<http://iqtma.cps.unizar.es>

Consultado en enero de 2009

Para un material libre de grasa, con una fracción en masa de agua (M), el calor específico del agua por encima del punto de congelación es 1 BTU/lbm.°F (4186.8 J/kg.K) y para sólidos no grasos es 0.2 BTU/lbm.°F (837.36 J/kg.K).

$$C_{p_m} = 4186,8 M + 837,6 (1 - M) \text{ [J/kg.K]} \quad (2.15)$$

Entonces; se tiene que: $C_{pl} = 4186,8 * 0,7274 + 837,6 (1 - 0,7274)$

$$\mathbf{C_{pl} = 3273,81 \text{ [J/kg}^{\circ}\text{K]}}$$

- Calculo del tiempo básico (t) y parámetro de incremento de aceite esencial (s):
Para el cálculo de estas variables, se tomaron seis pruebas, las cuales fueron realizadas en condiciones muy parecidas.

Los valores obtenidos mediante cada una de las pruebas se corrigieron por los parámetros estándar, ya sea por la diferencia en el flujo de vapor, el porcentaje de humedad, la densidad de empacado y el contenido de aceite esencial, una vez calculado el tiempo de extracción y la altura virtual de carga a condiciones estándar, se aplican las Ecuaciones 2,9 y 2,10 para obtener tiempo básico (t) y el parámetro de incremento de aceite esencial (s) para la limonaria; para así poder hacer el cálculo teórico a las condiciones de diseño de la planta de extracción objeto de este trabajo de grado.

El contenido de humedad afecta el tiempo de calentamiento por lo que el peso del material vegetal se corrige por un factor que relaciona el tiempo de calentamiento por kg de material vegetal (Tc/Kg); viéndose por ende afectada la densidad de empacado a la que se realizó la prueba y el rendimiento calculado inicialmente.

De la misma manera el tiempo de extracción se corrigió por la diferencia entre el flujo de vapor y el contenido de humedad respecto a los parámetros estándar.

La altura de la carga se corrigió por la diferencia de la densidad de empaqueo respecto a la densidad de referencia. Tal como se muestra en el siguiente ejemplo para la prueba No. 7.

Peso = 138 kg

Tc/Kg⁶ Estándar = 0.10 min/kg

Tc/Kg de la prueba No.7 = 0.13 mini/Kg

Peso corregido = $138 \times (0.10/0.13) = 103.53$ Kg

Densidad corregida = $\text{Peso corregido} / (\text{Área estándar} \times \text{altura de la prueba})$

Densidad corregida = $103.53 / (0.3848 \times 0.81) = 332.11$

Rend. Corregido = $[(\text{EVE}^7/1000) \times \text{Densidad del Aceite}^8] / \text{Peso corregido} \times 100$

Rendimiento corregido (RTOc) = $(492 \times 0.85/1000) / 103.53 = 0.404$ %

⁶ Relación entre el tiempo de calentamiento y el peso del material vegetal.

⁷ Contenido virtual de aceite esencial en el material vegetal.

⁸ Dato proporcionado por personal del CENIVAM

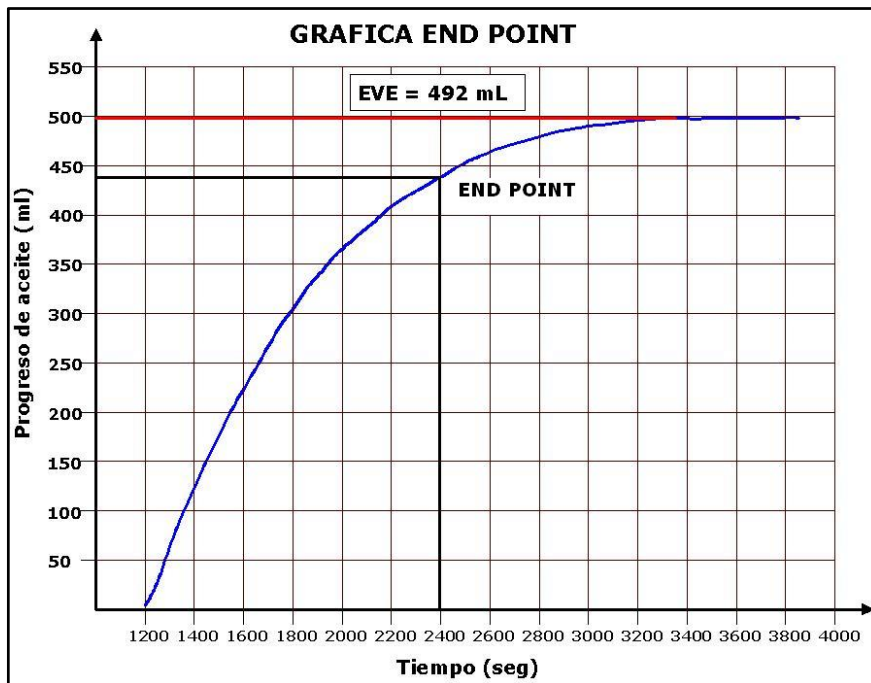


Figura 22. Grafica End Point para la prueba No. 7

Fuente: Autores del proyecto

Tiempo de extracción= Tiempo virtual primera muestra + Tiempo de extracción en el end point

Tiempo de ext end point⁹ = (Tiempo de recolección end point)*(Flujo de vapor prueba/flujo de vapor estándar)*(Tc/kg de la prueba / Tc/kg estándar)

Tiempo de ext end point = (2394/6)*(96.45/130.984)*(0.13/0.1)=22.041 min

Tiempo de extracción= 0.657+22.041 = 22.698 min

Altura Virtual de Carga= (EVE/contenido de aceite esencial ml/cm)*(densidad de la prueba/densidad estándar)

Altura Virtual de Carga= (492/5.18)*(332.11/302.36) = 104.39 cm

⁹ Tiempo de extracción en el *end point*.

Aplicando estas consideraciones obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 9. Cálculo del tiempo de extracción y altura virtual de carga a condiciones estándar.

| Prueba Nº | Peso, Kg | Tc/Kg | Peso STD, Kg | H m | Dens. Corr, Kg/m ³ | RTO Corr, % p/p | EVE, mL | Cont. AE, mL/Kg | Flujo Vapor, Lb/h | Flujo Prom Agua, mL/min | Tiempo virtual primera muestra, min | Tiempo ext <i>end point</i> | Tiempo ext a flujo estándar, min | Altura virtual de carga, m |
|-----------|----------|-------|--------------|-------|-------------------------------|-----------------|---------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 7 | 138 | 0,13 | 103,53 | 0,81 | 332,110 | 0,404% | 492 | 4,75 | 96,450 | 730,68 | 0,657 | 22,041 | 22,698 | 104,39 |
| 8 | 98 | 0,15 | 62,65 | 0,575 | 283,123 | 0,380% | 280 | 4,47 | 102,098 | 773,47 | 0,484 | 16,943 | 17,426 | 50,64 |
| 9 | 57,5 | 0,14 | 40,44 | 0,338 | 310,893 | 0,372% | 177 | 4,38 | 102,944 | 779,88 | 0,487 | 15,090 | 15,577 | 35,15 |
| 15 | 94,5 | 0,11 | 87,38 | 0,66 | 344,034 | 0,409% | 420 | 4,81 | 127,757 | 967,85 | 0,691 | 20,735 | 21,426 | 92,31 |
| 16 | 76,5 | 0,10 | 71,58 | 0,54 | 344,446 | 0,346% | 291 | 4,07 | 123,218 | 933,47 | 0,649 | 18,052 | 18,701 | 64,03 |
| 13 | 58,5 | 0,07 | 76,98 | 0,43 | 465,196 | 0,279% | 253 | 3,29 | 131,098 | 993,17 | 0,327 | 19,498 | 19,825 | 75,19 |

Fuente: Autores del proyecto

Utilizando los datos de tiempo de extracción y altura virtual, y aplicando las Ecuaciones 2.9 y 2.10 se obtuvieron los valores de s y t.

Tabla 10. Cálculo del tiempo básico (t) y el parámetro de incremento de aceite esencial (s)

| Prueba | Te1 | Te2 | H1 | H2 | s | t |
|---------|--------|--------|-----------------|-------|---------------|---------------|
| 7 - 8 | 22,698 | 17,426 | 104,39 | 50,64 | 26,510 | 10,215 |
| 7 - 9 | 22,698 | 15,577 | 104,39 | 35,15 | 26,484 | 10,211 |
| 8 - 9 | 17,426 | 15,577 | 50,64 | 35,15 | 26,441 | 10,206 |
| 15 - 16 | 21,426 | 18,701 | 92,31 | 64,03 | 26,399 | 10,104 |
| 15 - 13 | 21,426 | 19,825 | 92,31 | 75,19 | 26,721 | 10,152 |
| 16 - 13 | 18,701 | 19,825 | 64,03 | 75,19 | 26,025 | 10,053 |
| | | | Promedio | | 26,430 | 10,157 |

Fuente: Autores del proyecto

2.3 RESULTADOS TEÓRICOS VS. EXPERIMENTALES

Partiendo de los datos obtenidos para el tiempo básico (t), el parámetro de incremento de aceite esencial (s) y el poder calorífico C_{pl} ; y utilizando la teoría del ingeniero Tim Denny se calculó el flujo de vapor teórico para las pruebas de referencia, (pruebas 21, 22, 23, 24 y 25), y se compararon con el flujo utilizado en estas pruebas.

Tabla 11. Datos de proceso de las pruebas de referencia.

| DATOS DEL PROCESO | | | |
|-------------------|---------|-------------------|--|
| DATOS | VALOR | UNID | OBSERVACIÓN |
| M_h | 64 | kg | Masa de la limonaria |
| ρ | 302,365 | kg/m ³ | Densidad de la prueba |
| ρ_l | 302,36 | kg/m ³ | Densidad de la limonaria |
| C_{pl} | 3,274 | kJ/kg°K | Calor específico de la limonaria |
| ρ_s | 7900 | kg/m ³ | Densidad del acero |
| C_{ps} | 0,451 | kJ/kg°K | Calor específico del acero |
| h_{fg} | 2257 | kJ/kg | Calor latente de vaporización |
| ΔT | 80 | | Se toma temperatura ambiente, 20°C (Bucaramanga) |
| D_i | 0,7 | m | Diámetro interno del cartucho |
| \dot{m}_l | 0,9642 | kg/min | Flujo másico de vapor |
| t_l | 10,157 | min | Tiempo básico de la limonaria |
| s_l | 0,264 | m | Incremento de aceite de la limonaria |
| M_s | 195 | kg | Masa del sistema |

Fuente: Autores del proyecto

Tiempo de calentamiento T_c

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

$$A = \frac{\pi * D_i^2}{4} = 0,3848 [m^2]$$

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

$$H = \frac{M_h}{\rho * A} = 0,55 [m]$$

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

$$M_{vcs} = \frac{M_s C_{ps} \Delta T}{h_{fg}} = 3,117 [kg]$$

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

$$M_{vch} = \frac{M_h C_{pl} \Delta T}{h_{fg}} = 7,427 [kg]$$

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

$$M_{ct} = M_{vcs} + M_{vch} = 10,544 [kg]$$

6) Se calcula el tiempo de calentamiento, T_c [min]:

$$T_c = \frac{M_{ct}}{\dot{m}_l} = 10,935 [min]$$

Los valores obtenidos para el cálculo del tiempo de calentamiento se muestran a continuación:

Tabla 12. Resultados cálculo del tiempo de calentamiento pruebas.

| TIEMPO DE CALENTAMIENTO TEÓRICO | | | |
|---------------------------------|--------|----------------|---|
| DATOS | VALOR | UNID | OBSERVACIÓN |
| A | 0,3848 | m ² | Área transversal del cartucho |
| H | 0,55 | M | Altura del cartucho |
| M_{vcs} | 3,117 | kg | Masa de vapor de calentamiento del sistema |
| M_{vch} | 7,427 | kg | Masa de vapor de calentamiento del material vegetal |
| M_{ct} | 10,544 | kg | Masa total de vapor de calentamiento |
| T_c | 10,935 | min | Tiempo de calentamiento teórico |

Fuente: Autores del proyecto

Tiempo de extracción T_e

1) Como la densidad de empacado es igual a la densidad de la prueba el factor de corrección de densidad (F_{cd}) es igual a 1; por lo que el tiempo básico no es necesario corregirlo, al igual que la altura H.

2) Entonces el cálculo del tiempo de extracción, T_e [min], es:

$$T_e = t_l * \sqrt{1 + H/S_l} = 17,84 \text{ [min]}$$

Cálculo del flujo másico de vapor

1) Se calcula el tiempo de proceso T_{pr} [min].

$$T_{pr} = T_c + T_e = 28,775 \text{ [min]}$$

2) Se calcula la masa de vapor requerida [kg].

$$M_v = \dot{m}_l * T_{pr} = 27,745 \text{ [kg]}$$

Para obtener el valor del flujo teórico de las pruebas de referencia el valor de $M_v = 27,745 \text{ Kg}$ se divide sobre el tiempo de prueba y un factor de eficiencia de la caldera de 0,9; este valor es comparado con el flujo de vapor utilizado en la prueba hallando así el porcentaje de error de las pruebas realizadas.

En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de error de las pruebas realizadas, que van desde 0,3% hasta 11,83%, lo cual obedece a que el flujo de vapor fue medido mediante el aforo del condensado que salía del intercambiador de calor y se pudieron generar errores en la apreciación del flujo.

Tabla 13. Comparación del flujo teórico Vs el flujo experimental

| COMPARACIÓN FLUJO EXPERIMENTAL Vs. FLUJO TEÓRICO | | | | |
|---|------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|
| Prueba N° | Tiempo de prueba (min) | Flujo teórico | Flujo promedio de las pruebas | Porcentaje de error |
| | | kg/seg | kg/seg | |
| 21 | 22,816 | 0,0225 | 0,0238 | 5,6% |
| 22 | 24,960 | 0,0206 | 0,0225 | 9,5% |
| 23 | 20,583 | 0,0250 | 0,0273 | 9,3% |
| 24 | 22,300 | 0,0230 | 0,0231 | 0,3% |
| 25 | 30,000 | 0,0171 | 0,0191 | 11,8% |
| | | | Promedio | 7,3% |

Fuente: Autores del proyecto

Es posible utilizar las condiciones estándar seleccionados y los parámetros **s** y **t** determinados para calcular los requerimientos de diseño, ya que al comparar los resultados teóricos con los utilizados en las pruebas no se presentan errores muy significativos y por otra parte los rendimientos obtenidos a estas condiciones fueron altos.

2.4 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DE VAPOR DE DISEÑO

Utilizando las condiciones estándar y los parámetros **s** y **t** determinados anteriormente, podemos calcular el requerimiento de flujo de vapor a las condiciones de diseño de los equipos.

A continuación, se muestran los parámetros de diseño a tener en cuenta en el cálculo del flujo másico de vapor requerido para el proceso de extracción.

Tabla 14. Parámetros de diseño.

| DATOS DE DISEÑO | | | |
|-----------------|--------|-------------------|--|
| DATOS | VALOR | UNID | OBSERVACIÓN |
| M_h | 300 | kg | Masa de la limonaria de diseño |
| ρ | 350 | kg/m ³ | Densidad de diseño |
| ρ_l | 302,36 | kg/m ³ | Densidad de la limonaria |
| C_{pl} | 3,274 | kJ/kg°K | Calor específico de la limonaria |
| ρ_s | 7900 | kg/m ³ | Densidad del acero |
| C_{ps} | 0,451 | kJ/kg°K | Calor específico para el acero |
| h_{fg} | 2257 | kJ/kg | Calor latente de vaporización |
| ΔT | 75 | | Se toma temperatura ambiente, 25°C (Aipe, Huila) |
| T_p | 45 | min | Tiempo del proceso |
| D_i | 1 | m | Diámetro del cartucho |
| \dot{m}_l | 0,9642 | kg/min | Flujo másico de vapor (asumido) |
| t_l | 10,157 | min | Tiempo básico de la limonaria |
| s_l | 0,264 | m | Incremento de aceite de la limonaria |
| M_w | 116 | kg | Masa del cartucho |
| M_c | 160 | kg | Masa del cuerpo |
| M_t | 42 | kg | Masa de la tapa |
| M_s | 318 | kg | Masa del sistema |

Fuente: Autores del proyecto

Tiempo de calentamiento Tc

Para el cálculo de calentamiento se siguen los siguientes pasos:

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

$$A = \frac{\pi * D_i^2}{4} = 0,7854 [m^2]$$

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

$$H = \frac{M_h}{\rho * A} = 1,091 [m]$$

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

$$M_{vcs} = \frac{M_s C_{ps} \Delta T}{h_{fg}} = 4,766 \text{ [kg]}$$

4) Se hace un balance de energía para calcular la masa de vapor requerida para calentar la limonaria:

$$M_{vch} = \frac{M_h C_{pl} \Delta T}{h_{fg}} = 32,638 \text{ [kg]}$$

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

$$M_{ct} = M_{vcs} + M_{vch} = 37,402 \text{ [kg]}$$

6) Se calcula el tiempo de calentamiento, T_c [min]:

$$T_c = \frac{M_{ct}}{\dot{m}_l} = 38,791 \text{ [min]}$$

Tabla 15. Cálculo del tiempo de calentamiento teórico.

| TIEMPO DE CALENTAMIENTO TEÓRICO | | | |
|---------------------------------|--------|----------------|---|
| DATOS | VALOR | UNID | OBSERVACIÓN |
| A | 0,7854 | m ² | Área trasversal del cartucho |
| H | 1,091 | m | Altura de carga de diseño |
| M_{vcs} | 4,766 | kg | Masa de vapor de calentamiento del sistema |
| M_{vch} | 32,638 | kg | Masa de vapor de calentamiento del material vegetal |
| M_{ct} | 37,402 | kg | Masa total de vapor de calentamiento |
| T_c | 38,791 | min | Tiempo de calentamiento teórico |

Fuente: Autores del proyecto

Tiempo de extracción T_e

1) Calcular el factor de corrección de densidad (F_{cd}):

$$F_{cd} = \frac{(A - 0.00664 * (\rho_l * H * A)^{2/3})}{(A - 0.00664 * (M_h)^{2/3})} = 1,05681$$

2) Calcular la altura virtual de carga:

$$H_v = H * \frac{\rho}{\rho_l} = 1,2629 [m]$$

3) Cálculo del tiempo básico corregido, t_c [min], es:

$$t_c = \frac{t_l}{F_{cd}} = 9,611 [min]$$

4) Cálculo del tiempo de extracción, t_e [min], es:

$$T_e = t_c * \sqrt{1 + H_v/S_l} = 23,11 [min]$$

Tabla 16. Cálculo del tiempo de extracción teórico.

| TIEMPO DE EXTRACCIÓN TEÓRICO | | | |
|------------------------------|---------|------|-----------------------------------|
| DATOS | VALOR | UNID | OBSERVACIÓN |
| F_{cd} | 1,05681 | - | Factor de corrección por densidad |
| t_c | 9,611 | min | Tiempo básico corregido |
| H_v | 1,2629 | m | Altura virtual de la carga |
| T_e | 23,11 | min | Tiempo de extracción teórico |

Fuente: Autores del proyecto

Cálculo del flujo másico de vapor

1) Se calcula el tiempo de proceso T_{pr} [min].

$$T_{pr} = T_c + T_e = 61,90 [min]$$

2) Se calcula la masa de vapor requerida [kg].

$$M_v = \dot{m}_l * T_{pr} = 58,68 [kg]$$

3) Se calcula el flujo másico de vapor requerido [kg/min].

$$\dot{m}_v = \frac{M_v}{T_p} = 1,326 [kg/min]$$

4) Se calcula el flujo másico de vapor requerido en la caldera [kg/min]

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_v}{0,9} = 1,474 \text{ [kg/min]}$$

Para determinar la potencia de la caldera expresada en “Caballos Caldera” (BHP), hay que dividir el flujo de vapor requerido de la caldera expresado en [Kg/h] sobre 15.65 kg/h de vapor saturado a 100° C que es la producción de un BHP.

$$BHP = \frac{\dot{m}_c}{15,65} = 5,65 \text{ BHP}$$

Tabla 17. Cálculo del flujo másico de vapor de diseño.

| CALCULO DEL FLUJO DE VAPOR DE DISEÑO | | | | |
|---|-------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| \dot{m}_v (kg/min) | \dot{m}_c (kg/min) | Pot. caldera, BHP | Pot. diseño caldera, BHP | Flujo de diseño kg/seg |
| 1,326 | 1,474 | 5,65 | 6,00 | 0,02608 |

Fuente: Autores del proyecto

2.5 SELECCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR

El tipo de generador de vapor es una caldera que cumpla como mínimo con los requerimientos de flujo másico de vapor y/o potencia necesarios para el proceso, estos valores se calcularon anteriormente y correspondían a 93.9 kg/h (206.58 lb/h) y 6 BHP, respectivamente.

La empresa MORENOS LTDA donde se va instalar la planta extractora, adquirió a mediados de año 2007 una Biocaldera que fue construida por la empresa INGEC SEC LTDA; esta caldera funciona a partir de la combustión de biomasa (cascarilla de arroz o de café); comparando las especificaciones técnicas y los requerimientos del proceso se determinó que esta caldera satisface las necesidades de la nueva planta.

2.5.1 Características de la Biocaldera

Descripción del funcionamiento de la biocaldera:

La caldera cuenta con una cámara de combustión vertical de forma cilíndrica, atravesada por un tubo perpendicular a ésta, éste tubo suministra el combustible (cascarilla de café o de arroz) a través de una hélice que comunica la tolva de almacenamiento y la cámara de combustión; esta hélice es movida por una transmisión por cadena desde un moto-reductor.

Las partículas de combustible caen por gravedad a la parrilla ubicada en la parte inferior de la cámara de combustión, por ésta parrilla ingresa el aire necesario para la combustión, esta admisión de aire se hace posible a través del tiro natural, por lo tanto el objetivo ideal es que la partícula se quemé dentro de la cámara antes de que llegue a la parrilla, y esta a su vez es arrastrada por la corriente ascendente de aire que provoca el tiro natural.

De aquí se obtiene la energía necesaria para cambiar de estado el agua de líquido a vapor, por medio de la transferencia de calor de las paredes hacia el interior de la camisa de agua.

Una vez quemada las partículas pasan al ciclón donde se recolectan las cenizas, es decir, las partículas más grandes con el fin de disminuir el impacto ambiental que genera la combustión.

Finalmente los gases libres de cierto tipo de material particulado son liberados a la atmósfera a través de la chimenea.

Ahora una vez explicado de donde se obtiene la energía para generar vapor, se explica a continuación todo lo relacionado con el cambio físico del agua. El agua

entre al tanque central de la caldera a través de una bomba desde un tanque de almacenamiento exterior; la operación de esta bomba se hace por medio de un dispositivo llamado *McDonell* que controla el encendido y el apagado respondiendo a una señal de entrada, que es el nivel mínimo y máximo de agua dentro de la caldera.

Una vez que el agua entra a la caldera intercambia calor con la pared de la cámara de combustión y las aletas, el vapor generado es almacenado en a parte superior del tanque central de agua donde finalmente es regulado con una válvula de globo para su uso final.



Figura 23. Biocaldera.

Fuente: Manual de servicio de la Biocaldera.

Tabla 18. Especificaciones técnicas de la Biocaldera.

| | |
|--|--------------------------------|
| Tipo | Vertical |
| Libras de vapor generado | 882 lb/h |
| Temperatura del vapor generado | 133 °C |
| Fecha de Fabricación | Julio 2007 |
| Presión de alivio válvula de seguridad | 40 psi |
| Volumen de agua en la caldera | 162 L |
| Capacidad | 24 BHP |
| Presión de diseño | 45 psi |
| Combustible recomendado | Cascarilla de café o de arroz. |
| Presión máxima para el <i>McDonell</i> | 50 psi |
| Peso vacía | 450 kg |
| Volumen total | 225 L |

Fuente: Manual de servicio de la Biocaldera.

Ya que esta caldera puede generar hasta 882 Lb/h de vapor, muy por encima del requerimiento de 206,58 Lb/h, el flujo de vapor se controla ajustando el consumo del biocombustible para lo cual el equipo cuenta con un variador de velocidad de 8 posiciones para el sistema de alimentación de la cascarilla de café o de arroz.

Para entender un poco mejor la relación entre el consumo de biocombustible y la producción de vapor, se presenta la siguiente gráfica, para cascarilla de arroz molida multiplicar el consumo de cascarilla de café por 1,3, ya que la cascarilla de arroz tiene un poder calorífico más bajo.

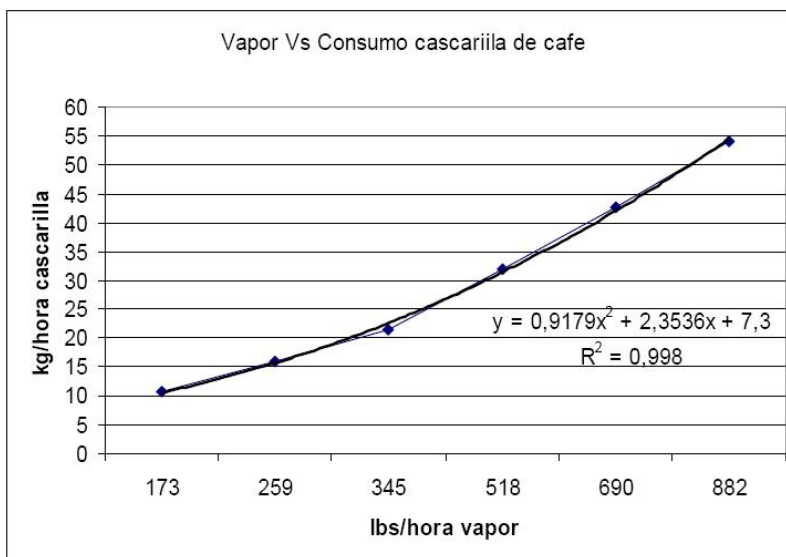


Figura 24. Producción de vapor Vs. Consumo de combustible.

Fuente: Manual de servicio de la Biocaldera.

3 DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR

El **CENIVAM**, con la ejecución del proyecto "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", requiere diseñar y construir una planta de extracción de aceites esenciales a nivel industrial con capacidad para 300 kg de material vegetal.

3.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Para dar cumplimiento al proyecto se tomaron en cuenta las recomendaciones de MORENOS LTDA y del CENIVAM y se fijaron los siguientes criterios de diseño:

- El equipo quedará ubicado en el Municipio de Aipe, el cual está localizado a la margen izquierda del río Magdalena y al Noroccidente del Departamento del Huila, este municipio se encuentra a 390 m sobre el nivel del mar y su temperatura promedio es de 28°C.
- El método a utilizar para la extracción del aceite esencial es el de arrastre por vapor, el cual deberá ser de flujo constante y a presión atmosférica.
- El material procesado deberá contenerse en cartuchos desmontables con capacidad para procesar 300 kg de material vegetal.
- En la fabricación de la planta se utilizará materiales que no reaccionen con el aceite esencial, ya que esto puede causar corrosión y cambio de propiedades del producto.
- El equipo debe ser seguro y de fácil manejo y operación (que pueda ser operado por dos personas).
- El tiempo del proceso será de 40 minutos aproximadamente.
- Que brinde un bajo impacto ambiental en su entorno.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios de diseño se establecieron las siguientes etapas para el diseño de la planta:

Para el destilador:

- 1) Diseño térmico: Comprende el cálculo de la demanda de vapor durante el proceso de extracción en el tiempo establecido, para este diseño se trazaron pruebas en la planta piloto con “limonaria” (*Cymbopogon citratus*). Este cálculo del flujo de vapor es el que nos determina la capacidad de la caldera a utilizar en el proceso (Ver Capítulo 2).
- 2) Diseño mecánico: Comprende el diseño de las partes fundamentales del destilador que son: El cuerpo, el cartucho, el distribuidor de vapor, y la tapa.

En este capítulo solo se trata el diseño mecánico, ya que el diseño térmico fue tratado en el Capítulo 2.

Para el condensador:

Debido a la complejidad en el diseño del condensador, se optó por destacarlo en el siguiente capítulo, el se basa en las siguientes etapas de diseño.

- 1) Diseño térmico: Se refiere al cálculo del área mínima de transferencia de calor, necesaria, para condensar la mezcla de vapor-aceite proveniente del destilador hasta una temperatura determinada.
- 2) Diseño mecánico: Se realizó el dimensionamiento del haz de tubos, las bridas, las placas portatubos, los cabezales y las boquillas de entrada y salida.

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), el cual se aprecia al final de este capítulo.

Para los equipos auxiliares

Los equipos auxiliares son tratados en el Capítulo 5, donde se encontraran los siguientes ítems desarrollados.

- 1) Selección de tuberías, accesorios y válvulas.
- 2) Aislamiento térmico del destilador y de la tubería de vapor.
- 3) Selección del sistema suavizador de agua.
- 4) 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.

3.2 EVOLUCIÓN DEL DISEÑO

Para el desarrollo del diseño se tomó como punto de partida la planta piloto y el equipo móvil del CENIVAM, y con base en estos dispositivos se formularon nuevas ideas para el destilador a fabricar.

En la primera alternativa de diseño, se puede observar los componentes básicos del alambique como el cuerpo, el cartucho, el distribuidor de vapor y la tapa cónica.

La configuración y operación del equipo se establece de la siguiente manera, el cartucho se introduce en el cuerpo y se sostiene por medio de una brida en la parte superior del cuerpo. Para sellar la tapa con el cuerpo del destilador se utiliza tornillos de apriete con tuercas tipo mariposa. Este sistema permite abrir y cerrar fácilmente la tapa. El distribuidor de vapor en cruz se ubica en la parte inferior del cartucho y en el fondo del cuerpo se instala un drenaje para el condensado

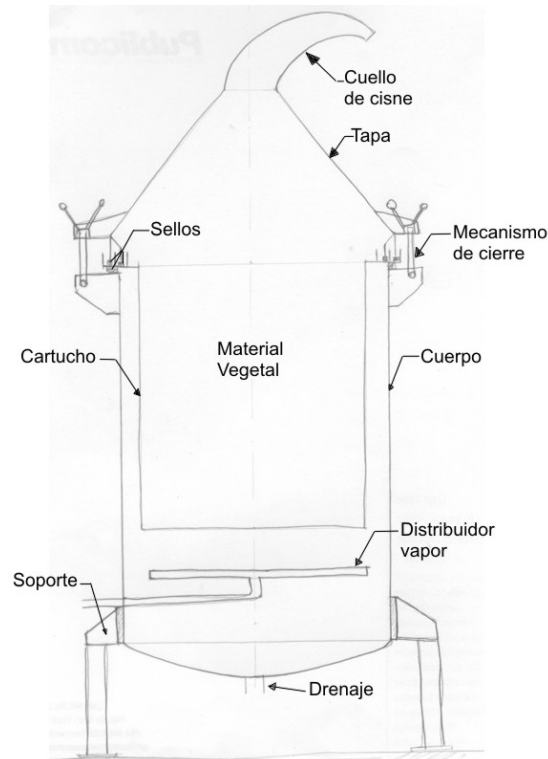


Figura 25. Alternativa de diseño 1

Fuente: Autores del proyecto

Al analizar la primera alternativa de diseño, y conforme avanzaban las pruebas experimentales en la planta piloto, se detectaron las siguientes opciones de mejora:

- Sistema de cierre de la tapa: La forma en la que se planteo inicialmente el cierre de la tapa requería de un esfuerzo alto, por lo que se decidió el uso de un mecanismo de fuerza infinita, el cual permitiera realizar la operación de manera más rápida y efectiva.

- Cuello de cisne: El diseño inicial planteaba su construcción en una única pieza la cual debería hacerse fundida, lo cual acarrearía a un mayor costo tal y como sucedió con la planta piloto, por tal motivo se replanteó su dimensionamiento para poder fabricarlo mediante la unión de codos y accesorios comerciales.

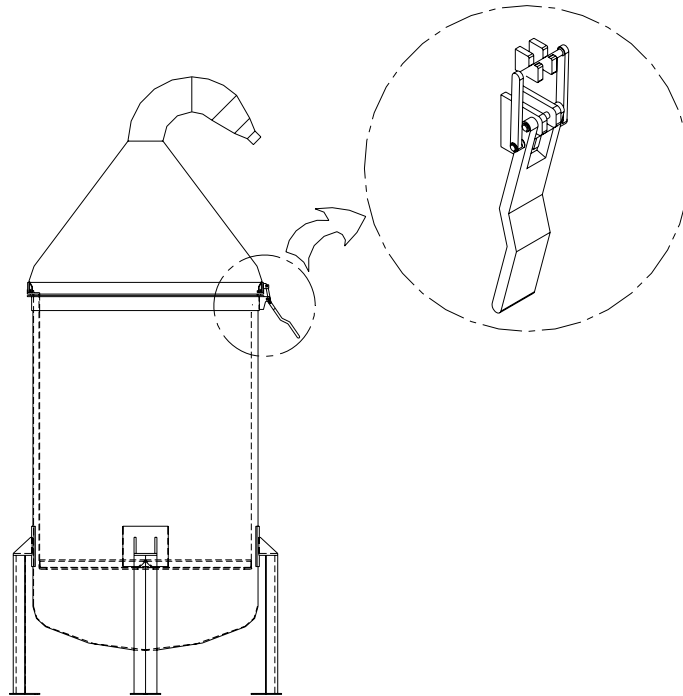


Figura 26. Alternativa de diseño 2
Fuentes: Autores del proyecto

Durante la fase de construcción, se notó que la fabricación de cada mecanismo de cierre era algo que requería de mucho trabajo y que además era muy exigente en el momento de ensamblarlo; creándose la necesidad de buscar otra manera de hacer el cierre, que nos ofreciera practicidad y que sellara de manera óptima, en la búsqueda de alternativas, encontramos una buena opción que es el sello de agua.

Este sello de agua es un canal, que va soldado a la pared del cuerpo en la parte superior, donde descansa la tapa del destilador; el sello se logra mediante una columna de agua de 4 pulgadas, que crea un diferencial de presión que evita que se presenten fugas debido a que el vapor se encuentra a presión atmosférica.

Con esta disposición se logra tener un fácil manejo, disminuyendo los tiempos de carga y descarga al destilador.

Al hacer estos cambios, se hizo necesario pensar en otra manera de apoyar el cartucho sobre el cuerpo, el cual iba a hacerse en la parte superior utilizando dos bridas, optando así por ubicar estas bridas, una en la base del cartucho y la otra al interior del cuerpo en la parte inferior.

Quedando como alternativa final la disposición que se presenta a continuación.

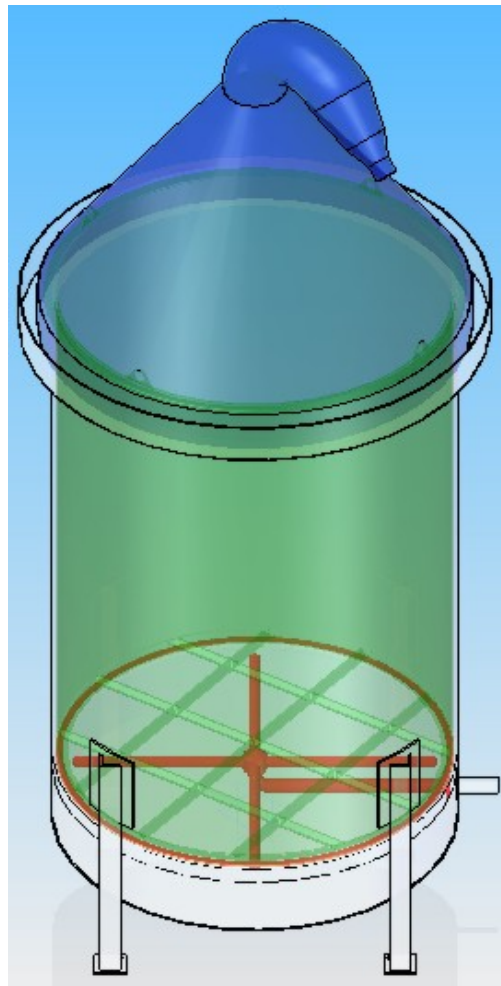


Figura 27. Alternativa final del diseño
Fuente: Autores del proyecto

Para la selección de los materiales, se tuvo en cuenta que ofreciera una buena resistencia mecánica y que no reaccionara con el aceite esencial extraído, debido a que en la pruebas experimentales llevadas a cabo en la planta piloto del CENIVAM se observó que el aceite extraído se contaminaba, ya que reaccionaba con los tubos del intercambiador de calor que eran de cobre, tomando un color verdoso tal como se puede apreciar en las siguiente figura.



Figura 28. Sedimento en el condensador
Fuente: CENIVAM; Autores del proyecto

El aceite de limonaria es bastante corrosivo por lo que afecta la vida útil de los materiales si no se seleccionan adecuadamente.

Por esta razón se consideró usar acero inoxidable en las partes que entran en contacto directo con el aceite, y adicionalmente con estos materiales se obtienen mejores resultados. Esto significa que las partes del destilador que se fabricarán en acero inoxidable son: el cuerpo, el cartucho, el distribuidor de vapor, la tapa del alambique, el condensador, las conexiones que unen la salida del la tapa hasta el condensador y el vaso florentino. Las demás partes o accesorios que no entren en contacto con el aceite, se fabricarán en aceros al carbono y/o láminas galvanizadas.

3.3 DISEÑO DEL CUERPO

3.3.1 Dimensionamiento del cuerpo

Para el dimensionamiento del cuerpo se tuvo en cuenta el tamaño de lámina comercial disponible en el mercado, con tal de aprovecharla al máximo y lograr un cilindro con una sola costura; las medidas de la lamina de acero inoxidable disponible en el mercado es de 3048 mm X 1524 mm.

El diámetro del cuerpo se define por la siguiente relación:

$$\phi = \frac{3048}{\pi}; \text{ teniendo que } \phi = 970,2m \quad (3.1)$$

El cuerpo del destilador queda entonces definido con las siguientes dimensiones:

Tabla 19. Dimensiones del cuerpo del destilador

| Diámetro (m) | Altura (m) | Volumen (m ³) |
|--------------|------------|---------------------------|
| 0,97 | 1,524 | 1,12 |

Fuente: Autores del Proyecto

3.3.2 Espesor de pared del cuerpo

Si bien este elemento sólo tiene cargas estáticas, el peso del material vegetal y su propio peso, se diseñó como un recipiente a presión, aunque la presión de operación es la atmosférica. El diseño mecánico de los recipientes a presión consiste en la determinación del espesor de la pared del material, el cual se obtiene mediante el uso de las siguientes ecuaciones del código ASME de recipientes a presión cilíndricos.

Tabla 20. Valores de t y P para tanques a presión.

| Tipo de depósito o cabezal | Espesor (t) | Presión de diseño (P) |
|-----------------------------------|---|---|
| Carcasa cilíndrica | $t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$ | $P = \frac{S \cdot R \cdot t}{R + 0,6 \cdot t}$ |
| Cabezal elipsoidal | $t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$ | $P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{D + 0,2 \cdot t}$ |
| Cabezal/carcasa semiesférico | $t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$ | $P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{R + 0,2 \cdot t}$ |
| Cabezal toriesférica | $t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$ | $P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{L \cdot M + 0,2 \cdot t}$ |

Fuente: Código ASME SEC. VIII. Div 1

Para determinar el espesor del cuerpo, se utiliza la fórmula planteada para carcasas cilíndricas.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6P} \quad (3.2)$$

Donde:

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

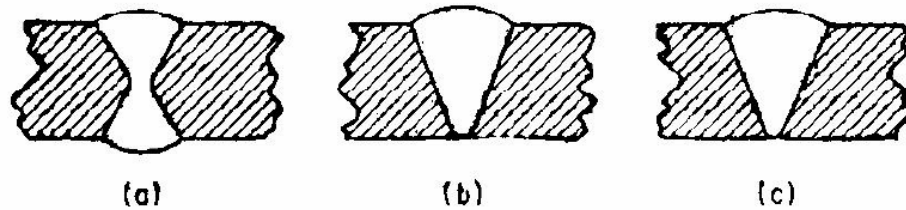
$R = 483,75$ mm (Radio interno)

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

$E = 0.7$ (eficiencia de la junta)

Los valores típicos de **E** dependen del tipo de unión y de la calidad de la soldadura concentrándose entre 0,6 y 1, generalmente.

Los tipos de soldadura utilizados para la mayoría de juntas perimetrales y longitudinales en recipientes a presión se muestran en la siguiente figura:



Tipos de soldadura: a) Junta por ensamble de soldadura doble, picada antes de soldar el segundo lado. b) Junta por ensamble de soldadura simple, con banda de respaldo que puede o no retirarse. c) Junta por ensamble de soldadura simple, sin banda de respaldo (que sólo se permite para algunas soldaduras perimetrales).

Figura 29. Clases de soldadura.

Fuente: Código ASME SEC. VIII. Div 1

Para determinar la eficiencia de la junta se selecciona el tipo de soldadura y luego se determina la eficiencia utilizando la siguiente tabla.

Tabla 21. Eficiencias de las juntas.

| Tipo de Soldadura | Grado de examen Radiográfico | | |
|-------------------|------------------------------|---------|-------------------------|
| | 100% | Puntual | No examinada por puntos |
| (a) | 1 | 0,85 | 0,7 |
| (b) | 0,9 | 0,80 | 0,65 |
| (c) | - | - | 0,6 |

Fuente: Código ASME SEC. VIII. Div 1

Luego $t = 0,98$ mm. Debido a que la lámina por diseño es muy delgada y el equipo está expuesto a sufrir golpes y abolladuras, se optó por estandarizar a una lámina calibre 12 de 2,5 mm, dándole así una mayor rigidez.

3.3.3 Espesor del fondo del cuerpo

Para el fondo se utilizó una configuración tipo toriesférica, debido a su uso comercial y el cual permite drenar más fácilmente el condensado que se produce al interior del destilador.

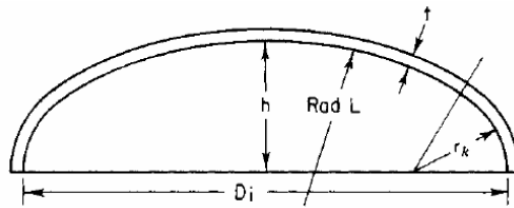


Figura 30. Geometría del cabezal tipo toriesférico.

Fuente: Capítulo 11, Sección 4.2 – página 538 del HEDH.

El cálculo del espesor del cabezal se sigue de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$t = \frac{M \cdot P \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad (3.3)$$

Donde M depende de la relación de L/r_k

Tabla 22. Valores de M.

| L/r_k | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 16,0 | 16,66 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| M | 1,56 | 1,58 | 1,60 | 1,62 | 1,65 | 1,69 | 1,72 | 1,75 | 1,77 |

Fuente: Diseño y cálculo de recipientes a presión. Juan Manuel León 2001.

$P = 152$ kPa (Presión de diseño, 22 psi)

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

$E = 0,7$ (Eficiencia de la junta)

$D_i = 967,5$ mm. (Radio interno)

$L = D_i = 967,5$ mm.

$r_k = 0,06L = 58,05$ mm.

$M = 1,77$

Donde se obtiene que $t = 1,74$ mm, estandarizando el espesor a 2,5 mm.

El valor de r_k , que se tomo cumple con el requisito de ser mayor que $3t$ (7,5 mm).

$$h = L - \frac{\sqrt{3L^2 - 4Lr_k}}{2}; \text{ Donde } h = 163,83 \text{ [mm]} \quad (3.4)$$

3.3.4 Brida para el soporte del cartucho

El cartucho reposa sobre una brida, de espesor t , que se encuentra soldada en el interior del cuerpo en la parte inferior. Sobre el borde externo de la brida se ejerce un momento M_r debido al peso del cartucho y del material vegetal.

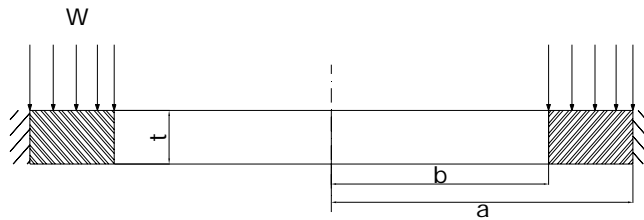


Figura 31. Soporte para el cartucho

Fuente: Autores del proyecto

$$M_r = \omega \cdot a^2 \left[k_1 - \left(\frac{k_2}{k_3} \right) \cdot k_3 \right] \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{W}{\pi \cdot (a^2 - b^2)} \quad (3.6)$$

$$k_1 = \frac{1}{4} \cdot \left[1 - \left[\frac{1-\mu}{4} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \left[1 + (1 + \mu) \cdot \ln \left(\frac{a}{b} \right) \right] \right] \quad (3.7)$$

$$k_2 = \left(\frac{1-\mu}{2} \right) \cdot \left[\left(\frac{a}{b} \right) - \left(\frac{b}{a} \right) \right] \quad (3.8)$$

$$k_3 = \frac{1}{2} \cdot \left[(1 + \mu) \cdot \left(\frac{b}{a} \right) + (1 - \mu) \cdot \left(\frac{a}{b} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$k_4 = \frac{1}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^4 - 4 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{a}{b} \right) \right] \quad (3.9)$$

$W = 7300$ N. Fuerza ejercida por el cartucho y el material vegetal.

$a = 0,483$ m. Radio exterior del soporte (igual al radio interno del destilador).

$b = 0,445$ m. Radio interior del soporte.

$\mu = 0,3$ Relación de Poisson.

$w = 32,98$ kPa. Presión ejercida sobre el soporte.

Al reemplazar se tiene que $M_r = 24,873$ N*m

Con el momento M_r se calcula el espesor t tomando un factor de seguridad $N=4$.

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot M_r}{\sigma / N}} = 2.373 \text{ [mm]} \quad (3.10)$$

Como el diámetro es grande, se optó por soldar un ángulo de $1 \frac{1}{2}'' \times 1 \frac{1}{2}'' \times \frac{1}{4}''$ en acero inoxidable, para darle una mayor rigidez y evitar el ovalamiento del cuerpo.

3.3.5 Soporte de destilador

El destilador va soportado por 4 ángulos soldados sobre la pared exterior del cuerpo. Para el diseño de este tipo de soporte se escogió el ángulo y se determinó si cumple con los requerimientos de trabajo.

Inicialmente se seleccionó un ángulo en acero inoxidable de $2'' \times 2'' \times \frac{1}{4}''$

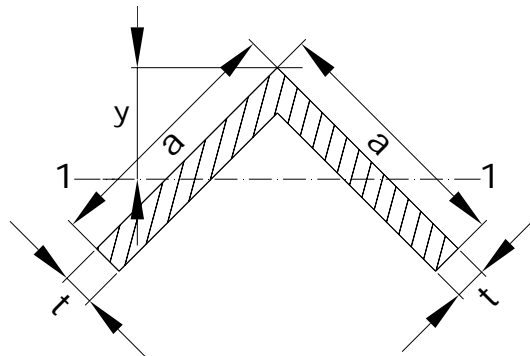


Figura 32. Sección transversal del ángulo

Fuente: Manual de fórmulas de ingeniería. Rafael García Díaz.

Tabla 23. Dimensiones y propiedades de la sección transversal del ángulo

| Dimensiones y propiedades | |
|------------------------------------|------------------------|
| a (longitud del ala) | 2 pg |
| t (espesor del ángulo) | $\frac{1}{4}$ pg |
| y (distancia al eje de simetría) | 0,8367 pg |
| A (área de la sección transversal) | 0,9375 pg ² |
| I (momento de inercia) | 0,1427 pg ² |
| r (radio de giro) | 0,3902 pg |

Fuente: Autores del proyecto

La longitud del ángulo se determinó de acuerdo con la siguiente figura:

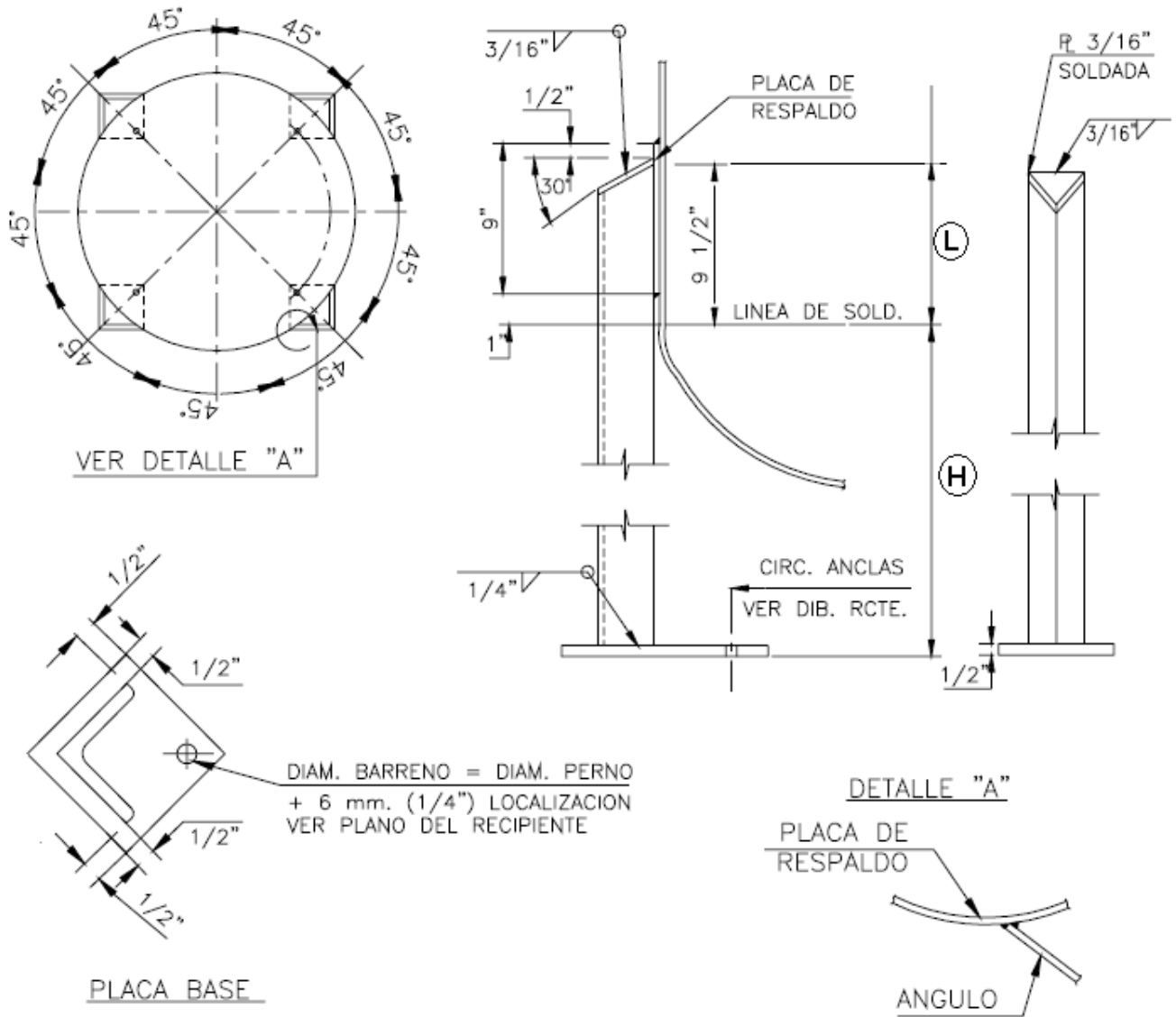


Figura 33. Soporte para recipientes verticales

Fuente: Diseño y cálculo de recipientes a presión. Juan Manuel León 2001.

Donde:

$L=10$ pg (Longitud de la línea de soldadura hasta el borde de la placa de refuerzo)

$H=13,62$ pg (Longitud de la línea de soldadura hasta el suelo)

$L_{sop} = 9,5 + 14,12 = 23,62$ pg (longitud del soporte)

Con estas dimensiones se calcula el esfuerzo de compresión y la relación de esbeltez:

$$F_a = \frac{18000}{1 + \left(\frac{L^2}{18000 \cdot r^2}\right)} \quad (3.11)$$

Donde:

L = 23,62 pg (Longitud del soporte)

r = 0,3902 pg (Radio de giro)

F_a = 14955,47 psi (esfuerzo de compresión)

(L/r) = 60,53 (Relación de esbeltez)

La relación de esbeltez (L/r) no debe ser superior a 120 y también el esfuerzo máximo de compresión permisible no debe ser superior a 15000 psi¹⁰.

Tenemos que F_a<15000 y (L/r)<120, quiere decir, que el ángulo seleccionado cumple con la norma. Una vez cumplida la norma, se calcula el área que se necesita para resistir el esfuerzo permisible, y esta debe ser menor que el área seleccionada, sino hay que escoger otro ángulo y volver a empezar el proceso.

$$A_r = \frac{P}{F_a} \quad (3.12)$$

Donde:

P = 330 Lb-f (Fuerza ejercida sobre una pata)

F_a = 14955,47 psi (esfuerzo de compresión)

Obteniendo así: $A_r = 0,0221 \text{ pg}^2$ (área requerida); $A_r < 0,9375 \text{ pg}^2$

Como se comprobó, que el área requerida es menor a la del ángulo seleccionado, entonces el ángulo a utilizar para el soporte del destilador será en acero inoxidable de 2"x2"x1/4" y de 23,52" de largo.

¹⁰ *Desing of process equipment*. Kanti k. Mahajan. 1979. Pag.181

3.3.6 Sello de agua del destilador

El funcionamiento del sello está determinado por la diferencia de presión que logra ejercer una columna de agua, la cual garantiza que el vapor salga por la parte superior de la tapa del destilador evitando las fugas. Para este diseño se fabricó un canal de agua con una columna de 4" como se muestra en la siguiente figura:

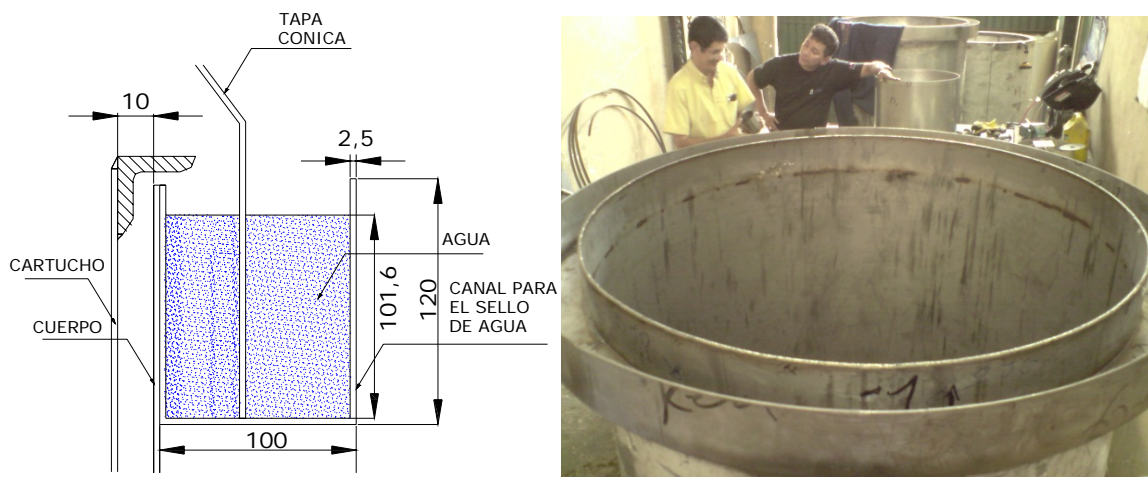


Figura 34. Sello de agua
Fuente: Autores del proyecto

3.4 DISEÑO DEL CARTUCHO.

3.4.1 Dimensionamiento del cartucho

En el cartucho se aloja el material vegetal que se va a destilar, por esta razón, el dimensionamiento depende de la cantidad de material y la densidad a la cual se va a trabajar. El volumen de cartucho queda determinado por la siguiente Ecuación:

$$V = \frac{M}{\rho_e} \quad (3.13)$$

Donde:

$\rho_e = 350 \text{ kg/m}^3$ (Densidad de empacado)

$M = 300 \text{ kg}$ (Carga de material vegetal)

$V = 0,857 \text{ m}^3$ (Volumen del cartucho)

Como el cartucho está contenido en el cuerpo, el diámetro se calculó con una holgura de 1cm con respecto al del cuerpo, esto con efecto de hacer más fácil el ensamble en la operación.

Tenemos que: $D = 0,970 - 0,020 = 0,950 \text{ [m]}$

Luego la altura del cartucho se define por la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad (3.14)$$

$H = 1,2 \text{ m}$; pero se aproximó a $1,35\text{m}$, ya que se pierde un volumen por la parrilla y la lamina del fondo.

Tabla 24. Dimensiones del cartucho

| Diámetro (m) | Altura (m) | Área (m ²) | Volumen (m ³) |
|--------------|------------|------------------------|---------------------------|
| 0,95 | 1,35 | 0,705 | 0,957 |

Fuente: Autores del Proyecto

3.4.2 Espesor de pared del cartucho

Para determinar el espesor de pared del cartucho se realizó el mismo procedimiento que en el cuerpo. Usando la Ecuación (3.2), para carcasa cilíndrica tenemos:

$P = 152 \text{ kPa}$ (presión de diseño, 22 psi)

$R = 473,75 \text{ mm}$ (Radio interno)

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

$E = 0,7$ (Eficiencia de la junta)

$t = 0,9632$ mm se estandarizó a 2,5mm.

3.4.3 Fondo del cartucho

Para el diseño del fondo se fijó una lámina en acero inoxidable de 3 mm de espesor, determinado mediante un proceso iterativo, es decir, se asumió un espesor de placa y luego se calculó con la ayuda de un programa CAE (Anexo B).

Con el fin de darle rigidez al fondo, se fabricó una parrilla en ángulo en acero inoxidable de 1"x1"x3/16", el cual se soldó al fondo y a la brida interna del cartucho, como se muestra en la siguiente figura.

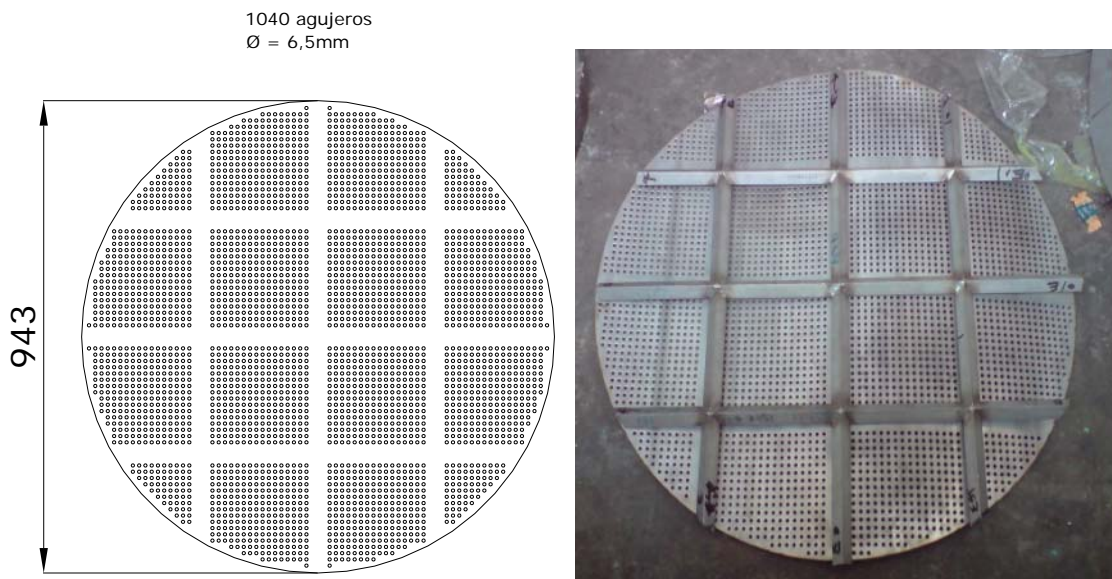


Figura 35. Fondo del cartucho

Fuente: Autores del proyecto.

3.4.4 Orejas para el izaje del cartucho

En la parte superior del cartucho van soldadas 4 orejas en acero inoxidable, ésto con el propósito de servir como soporte para levantamiento del cartucho durante la operación de carga y descarga.

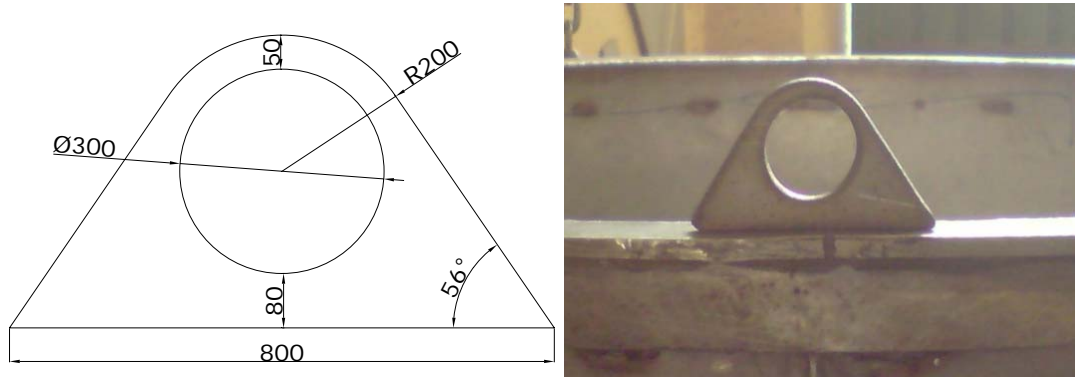


Figura 36. Oreja para izaje del cartucho

Fuente: Autores del Proyecto

Se cálculo del espesor de las orejas mediante la siguiente Ecuación:

$$t = \frac{P}{2 \cdot S \cdot \left(R - \frac{D}{2}\right)} \quad (3.15)$$

Donde:

P = 1500 N (Fuerza sobre la oreja)

S = 53,462 Mpa (esfuerzo cortante permitido acero SAE 304)

D = 30 mm (diámetro del agujero interno de la oreja)

R = 30 mm (radio del contorno de la oreja)

Reemplazando en la Ecuación 3.15, se obtiene el valor del espesor mínimo requerido para las orejas de izaje.

t = 2,805 mm (espesor de la oreja)

Estandarizando el espesor, se tiene que t=3/16" (4,7625 mm)

3.5 DISEÑO DE LA TAPA

Para efectos de cálculo se considera la tapa como un cabezal tipo cónico en recipientes a presión.

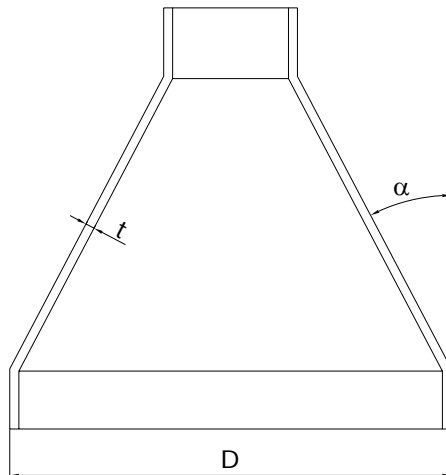


Figura 37. Tapa del destilador

Fuente: Autores del proyecto

El espesor de la tapa queda entonces determinado por la siguiente Ecuación:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad (3.16)$$

Donde:

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

D = 1040 mm (Diámetro interno)

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

$\alpha = 37$ (Ángulo del cono con la vertical)

E = 0,7 (Eficiencia de la junta)

Reemplazando en la Ecuación 3.16 se obtiene el valor del espesor mínimo requerido para la tapa del destilador.

t= 1,32 mm se estandarizó a 2,5mm.

De la parte superior de la tapa se desprende el cuello de Cisne, el cual se fabricó con la unión de un codo comercial de 6” y reducciones hasta 1 ½”, con el fin de poder conectar una manguera flexible en acero inoxidable para la salida de la mezcla de vapor-aceite proveniente del destilador.

3.6 DISEÑO DEL DISTRIBUIDOR

Existen varios diseños para los distribuidores de vapor, siendo los más comunes el de uno o dos anillos concéntricos, en forma de cruz, en espiral o la combinación de algunos de estos. Para este proyecto se fabricó en forma de cruz, ya que ofrece una distribución más uniforme en la salida del vapor proveniente de la caldera, lo cual garantiza que el vapor recorra de manera homogénea el lecho de material vegetal.

3.6.1 Cálculo del diámetro del distribuidor de vapor.

Para determinar las dimensiones del distribuidor de vapor es necesario calcular el diámetro de la tubería.

Tabla 25. Velocidades razonables para el flujo de vapor de agua en tuberías

| Condiciones del vapor de agua | Presión bar (p) (libras/pulg ²) | Servicio | Velocidad razonable metros por minuto (pies por minuto) (V) |
|-------------------------------|--|---|---|
| Saturado | 0 a 1.7 (0 a 29) | Calefacción (líneas cortas) | 1200 a 1800 (4000 a 6000) |
| | mayor de 1.7 (mayor de 25) | Equipo centrales térmicas, tubería de proceso, etc. | 1800 a 3000 (6000 a 10 000) |
| Sobrecalentado | mayor de 14 (mayor de 200) | Conexiones de calderas, turbinas, etc. | 2000 a 6000 (7000 a 20 000) |

Fuente: Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Crane. McGraw-Hill.

Según ecuaciones de la Crane el diámetro es igual a:

$$d = \sqrt{\frac{21220 \cdot \dot{m}_v \cdot \dot{V}}{v}} \quad (3.17)$$

Donde:

$\dot{m}_v = 93,9 \text{ kg/h}$ (Flujo másico de vapor)

$\bar{V} = 1,145 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Volumen específico a 152 kpa)

$v = 3000 \text{ m/min}$ (Velocidad del vapor, máxima recomendada)

Reemplazando en la Ecuación 3.17, se obtiene el valor del diámetro requerido:

$d = 27,57 \text{ mm}$.

Estandarizando se tiene un diámetro nominal de 1", cédula 10, donde el diámetro interno es de 27,861 mm y el externo de 33,401 mm.

3.6.2 Cálculo del número mínimo de agujeros del distribuidor de vapor.

Este se hace de acuerdo con la tubería de alimentación de vapor, lo que se busca es que el área total de todas las perforaciones por donde va a salir el vapor sea equivalente al área transversal de la tubería. Para el cálculo del número de agujero se utiliza la siguiente ecuación:

$$N = \frac{D^2}{d^2} \quad (3.18)$$

Donde:

$D = 27,861 \text{ mm}$ (Diámetro interno de la tubería)

$d = 3,175 \text{ mm}$ (Diámetro de la perforación, broca de 1/8")

Reemplazando en la Ecuación 3.18, se obtiene que $N=77$, se normaliza a 76 agujeros, para repartir igual número de agujeros por cada brazo de la cruz.

3.6.3 Cálculo del paso entre agujeros (p), para el distribuidor de vapor.

Se calculó el número de agujeros por cada brazo del distribuidor con la siguiente Ecuación:

$$N_t = \frac{N}{4} \quad (3.19)$$

Donde: $N = 76$ (Total de agujeros)

Reemplazando en la Ecuación 3.19, se tiene que el número de agujero por brazo es $N_t = 19$. Una vez conociendo el número de agujeros por brazo, se cálculo el paso entre agujeros así:

$$p = \frac{L}{N_t+1} \quad (3.20)$$

Donde:

$L = 420$ mm (longitud efectiva del brazo)

$N_t = 19$ (número de agujeros por brazo)

Al reemplazar en la Ecuación 3.20, se obtiene que el paso entre agujeros es $P=21$.

Los agujeros se ubicaron a 30° sobre la vertical intercalándolos de izquierda a derecha, para obtener una mejor distribución del vapor dentro del destilador, a continuación, se presenta el diseño final del distribuidor de vapor.

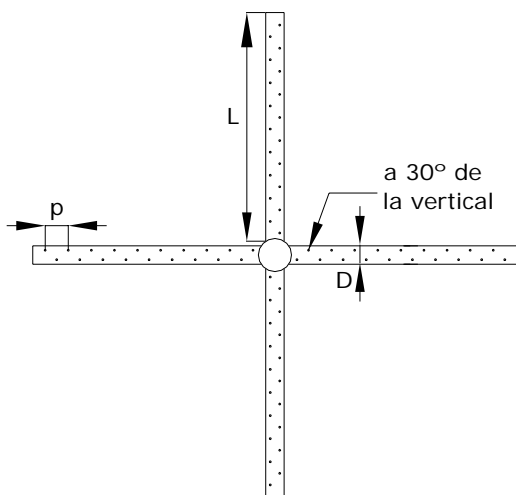


Figura 38. Distribuidor de vapor
Fuente: Autores del proyecto

3.7 DISEÑO DEL VASO FLORENTINO.

El agua es más densa que el aceite esencial y disminuye su viscosidad con el aumento de temperatura, por lo que el aceite tiende a irse a la superficie y, el agua apone poca resistencia, ya que su viscosidad disminuye debido a que el recipiente separador se diseñó para que mantenga una temperatura de 45°C y con la salida del aceite en su parte superior.

3.7.1 Velocidad de separación del aceite esencial

Partiendo de los descubrimientos del profesor A. D. Hughes, el ingeniero Tim Denny 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. A continuación, se presentan los resultados de dichas pruebas.

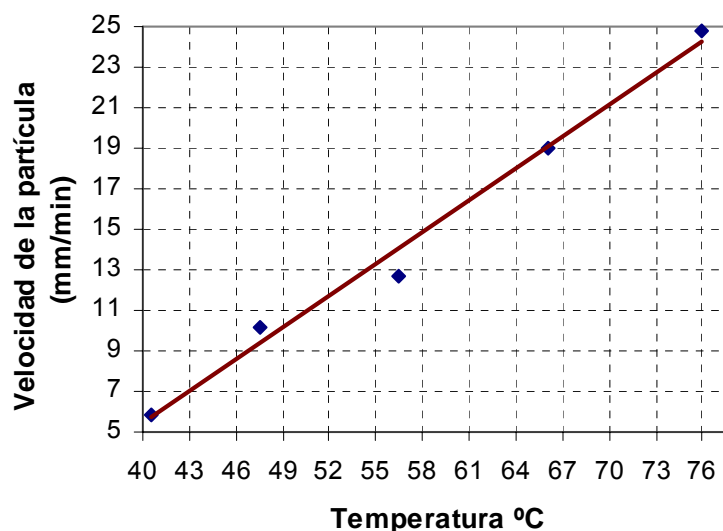


Figura 39. Velocidad de separación de las partículas de aceite de lavanda

Fuente: *Field distillation for herbaceous oils*. Denny, McKenzie Associates. Australia. 2001. Pág. 239

En conclusión, a los experimentos realizados por el ingeniero Tim Denny 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. En la anterior figura se muestra que para la temperatura de 45° C la velocidad de las partículas de aceite es aproximadamente igual a 9 mm/min.

Por otra parte, durante las pruebas experimentales llevadas a cabo en la planta piloto del CENIVAM, se determinó el tiempo experimental de separación de aceite esencial el cual es de 2,25 min. En la siguiente figura se muestra el aceite ascendiendo durante la separación.



Figura 40. Separación del aceite.

Fuente: Pruebas experimentales, CENIVAM. Autores del Proyecto

3.7.2 Funcionamiento y partes del vaso florentino.

Los condensados provenientes del intercambiador de calor salen a 45°C y son descargados a través de un primer tubo que lo conduce a un primer cilindro al interior del recipiente en donde al completarse su volumen habrá transcurrido tiempo suficiente para lograr la separación del hidrosol¹¹ y el aceite esencial,

¹¹ Mezcla de agua y aceite esencial en bajas concentraciones que no se puede separar por este método.

rebotándose hacia un cilindro externo de un mayor volumen en donde se produce una segunda separación este cilindro deberá garantizar que la velocidad de los condensados sea inferior a 9 mm/min, ya que las partículas de aceite del primer cilindro se separan a una velocidad de 9 mm/min, tal como se vio en la anterior sección.

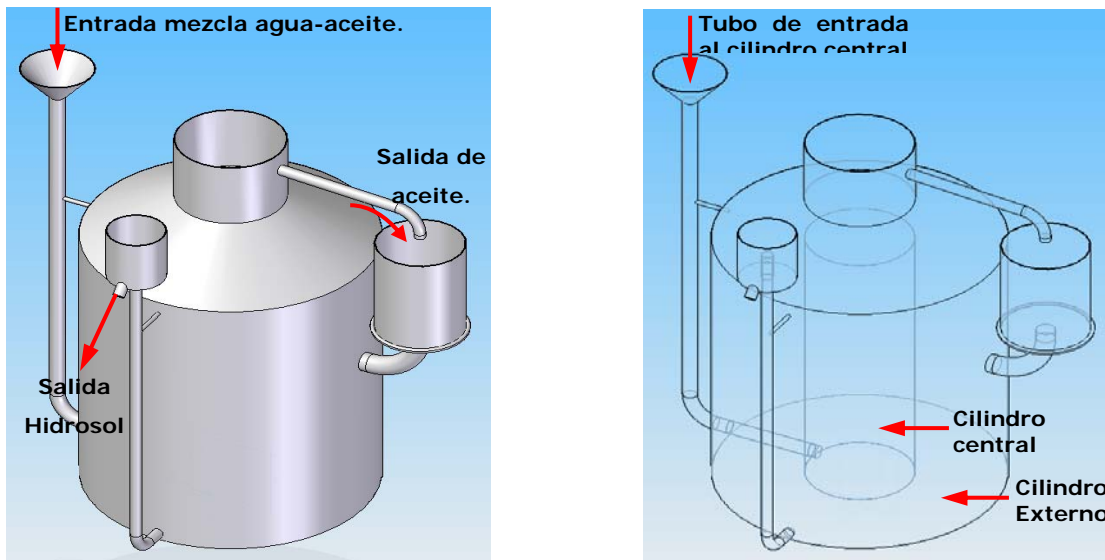


Figura 41. Separador de aceite.
Fuente: Autores del proyecto.

3.7.3 Cálculos para el diseño del vaso florentino

El flujo de condensado es de 93.9 L/h correspondiente al flujo de diseño del condensador ó 1.565 L/min. 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 de cisne y el centro.

Tabla 26. Parámetros de diseño del vaso Florentino

| PARÁMETROS DE DISEÑO | | | |
|----------------------|-------|--------|----------------------------------|
| DATOS | VALOR | UNIDAD | OBSEVACIONES |
| t_e | 45 | min | Tiempo de Extracción |
| t_r | 2,25 | min | Tiempo de residencia |
| \dot{F}_c | 1,565 | L/min | Flujo de condensado |
| V_c | 9 | mm/min | Velocidad de nivel de condensado |

Fuente. Autores de proyecto.

Cilindro interno. El condensado es recibido por el cilindro interno y sus dimensiones garantizan que este resida durante 2 minutos, dando tiempo suficiente para que se lleve a cabo la separación inicial. Durante esta separación inicial se recolecta la mayoría del aceite el cual es depositado dentro del centro hasta que éste se llena, y rebosándose hacia el cilindro externo en donde se lleva a cabo la separación restante.

La entrada del condensado se realiza por medio de un embudo el cual está conectado a un tubo con un codo en la parte inferior y el cual se comunica con el cilindro central. El diámetro interno de este cilindro es de 10 cm, el cual es el mismo del cuello del recipiente. La altura de este cilindro está dada por:

$$H = \frac{F_c * t_r}{A_{ci}} \quad (3.21)$$

Cilindro externo. El cilindro externo es donde se deposita la mayor parte del condensado, debido a que este volumen es mayor al del cilindro interno, se garantiza que todo el condensado dentro del recipiente llegue a ser prácticamente la misma. Esta cualidad es necesaria ya que en pruebas hechas por el profesor Huges y mostradas por el ingeniero Tim Denny, 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 el aceite esencial.

El dimensionamiento del cilindro externo se calcula así:

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

$$A_{ce} = \frac{F_c}{V_c} \quad (3.22)$$

$V_c = 0,9$ cm/min. Se toma la máxima para calcular el área A_{ce} mínima.

2) Se calcula el diámetro de la base del recipiente separador, el cual debe ser mayor que la suma del área del cilindro interno y externo.

De tal modo el diámetro de la base del recipiente, D_b , se calcula así:

$$D_b = \left(\frac{4 * A_b}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.23)$$

3) A partir del diámetro de la base del recipiente se comprueba que la velocidad del condensado en el anillo exterior sea menor que la velocidad mínima de separación (9 mm/min).

$$V_n = \frac{F_c}{A_{cext}} \quad (3.24)$$

Al garantizar que esta velocidad sea menor que la velocidad de las partículas de aceite que ascienden dentro del condensado (agua-aceite), se asegura que las partículas de aceite dentro del cilindro interno lleguen a la superficie del condensado y se mantenga allí por la diferencia de densidades.

Cuello. La función del cuello del separador es recoger los aceites esenciales 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 trasportarán.

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 $\theta=30^\circ$. La sección cilíndrica tiene un diámetro de 10 cm. La altura de la sección cónica, H_{cono} , es:

$$H_{cono} = \frac{(D_b - D) * \tan \theta}{2} \quad (3.25)$$

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 $1/0.85 = 1.18$ cm de alto equilibrará a una columna de agua de 1cm de alto. Por cada centímetro de aceite que queramos retener en el cuello del separador tenemos que hacer la salida de aceite 0.18 cm por encima de la salida de agua, es decir, para retener 5 cm de aceite en la sección cilíndrica del cuello, la salida de aceite es $5 \times 0.18 = 0.9$ cm sobre la salida de agua.

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

A continuación, se presentan los resultados del proceso de diseño del vaso Florentino o recipiente separador de aceites.

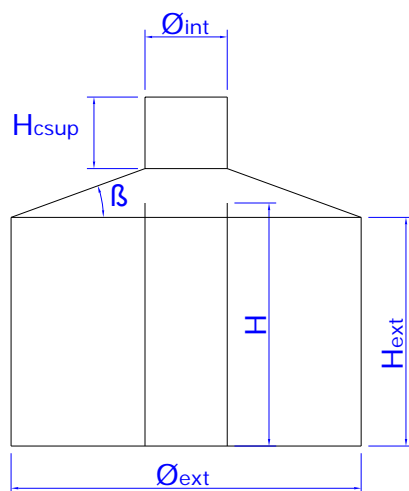


Figura 42. Geometría del vaso Florentino.
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 27. Resultado del diseño del vaso florentino.

| CÁLCULOS | | | |
|---------------------|--------------|-----------------|--|
| DATOS | VALOR | UNIDAD | OBSERVACIONES |
| \varnothing_{int} | 11,5 | cm | Diámetro interno del cilindro central |
| A_{cint} | 103,87 | cm ² | Área del cilindro central |
| H | 34 | cm | Altura del cilindro central |
| A_{cext} | 1738,89 | cm ² | Área del cilindro externo |
| A_b | 1842,76 | cm ² | Área de la base del recipiente |
| \varnothing_{ext} | 49 | cm | Diámetro de la base del recipiente |
| β | 20 | grados | Ángulo del cono |
| H_{cono} | 7,00 | cm | Altura del cono |
| H_{csup} | 10 | cm | Altura cilindro superior |
| V_{cext} | 44,49 | cm ³ | Volumen cilindro exterior |
| V_{cono} | 5,68 | cm ³ | Volumen cono |
| V_{csup} | 0,90 | cm ³ | Volumen cilindro superior |
| V_{total} | 51,07 | cm ³ | Volumen total del recipiente |
| V_n | 8,49 | mm/min | Velocidad del condensado en el anillo exterior |

Fuente: Autores del Proyecto

4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR

Para condensar la mezcla de vapor-aceite proveniente del destilador se opto por utilizar un intercambiador de calor de casco y tubos, debido a que proporciona una gran área de transferencia de calor utilizando poco volumen. Para este caso el vapor ira a través de los tubos y por la carcasa el refrigerante que para este caso será agua.

El diseño del condensador se realiza en dos fases o etapas, primero el diseño térmico el cual me determinara el área de transferencia de calor a utilizar y seguidamente se desarrolla el diseño mecánico donde se dimensionan las diferentes piezas que componen el intercambiador de calor.

Para el diseño y construcción del condensador se tendrán en cuenta la siguiente bibliografía:

- Normas TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*),
- Código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*)
- El manual HEDH (*Heat Exchange Design Handbook*).

4.1 DISEÑO TÉRMICO

El intercambiador de calor deberá ser capaz de condensar la mezcla vapor-aceite proveniente del destilador, garantizando así que el condensado salga a una temperatura de 45°C, la cual es la más apropiada para la correcta separación del aceite esencial y el agua; para el análisis térmico se divide el intercambiador en dos zonas; la primera es la zona de condensación en donde el vapor cambia a estado liquido y la segunda es la zona de subenfriamiento donde el condensado se enfría hasta la temperatura deseada; por lo que hay que tratar cada zona como

un intercambiador por separado. A cada zona se le calculará su propio coeficiente global de transferencia, su diferencia media de temperatura y su área de transferencia, y posteriormente se sumaran las áreas individuales obtenidas hallando así el área total de transferencia del intercambiador.

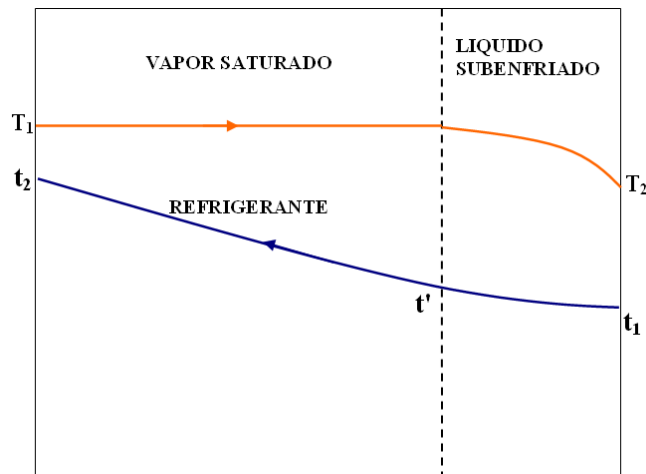


Figura 43. Zonificación del condensador

Fuente: Autores del proyecto

4.1.1 Datos de entrada:

Para realizar el diseño térmico es necesario determinar los datos conocidos y los requisitos con los que se cuentan antes de empezar el diseño, éstos son:

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

Datos de proceso

Flujo másico de vapor: Se calculó comparando los resultados teóricos basados en la metodología del ingeniero Tim Denny y los datos experimentales obtenidos mediante pruebas realizadas en la planta piloto que se encuentra en el CENIVAM, obteniendo un flujo de vapor de 93.9 kg/h (0.02608 kg/s).

Temperaturas del proceso:

$T_1 = 100^\circ\text{C}$ Temperatura de entrada del vapor al condensador

$T_2 = 45^\circ\text{C}$ Temperatura de salida del condensado.

$t_1 = 30^\circ\text{C}$ Temperatura de entrada del agua de enfriamiento.

$t_2 = 44^\circ\text{C}$ Temperatura de salida del agua enfriamiento.

$t' = ?$ Temperatura intermedia del agua de enfriamiento por hallar.

Tabla 28. Datos del proceso.

| | Fluido | T. Entrada | T. Salida | Flujo másico |
|--------------|--------|------------|-----------|--------------|
| Tubos | Vapor | 100C | 45°C | 0.02608 Kg/s |
| Casco | Agua | 30C | 44°C | -- |

Fuente: Autores del proyecto

El flujo másico de agua necesaria para el proceso se determina de la siguiente manera:

Calor total del proceso (Q_{total}):

$$Q_{total} = Q_{condensación} + Q_{subenfriamiento} \quad (4.1)$$

$$Q_{condensación} = \dot{m}_v * h_{fg} \quad (4.2)$$

$$Q_{subenfriamiento} = \dot{m}_v * C_{pv} * \Delta T_{subenfriamiento} \quad (4.3)$$

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

$$Q_{total} = \dot{m}_a * C_p * \Delta T \quad (4.4)$$

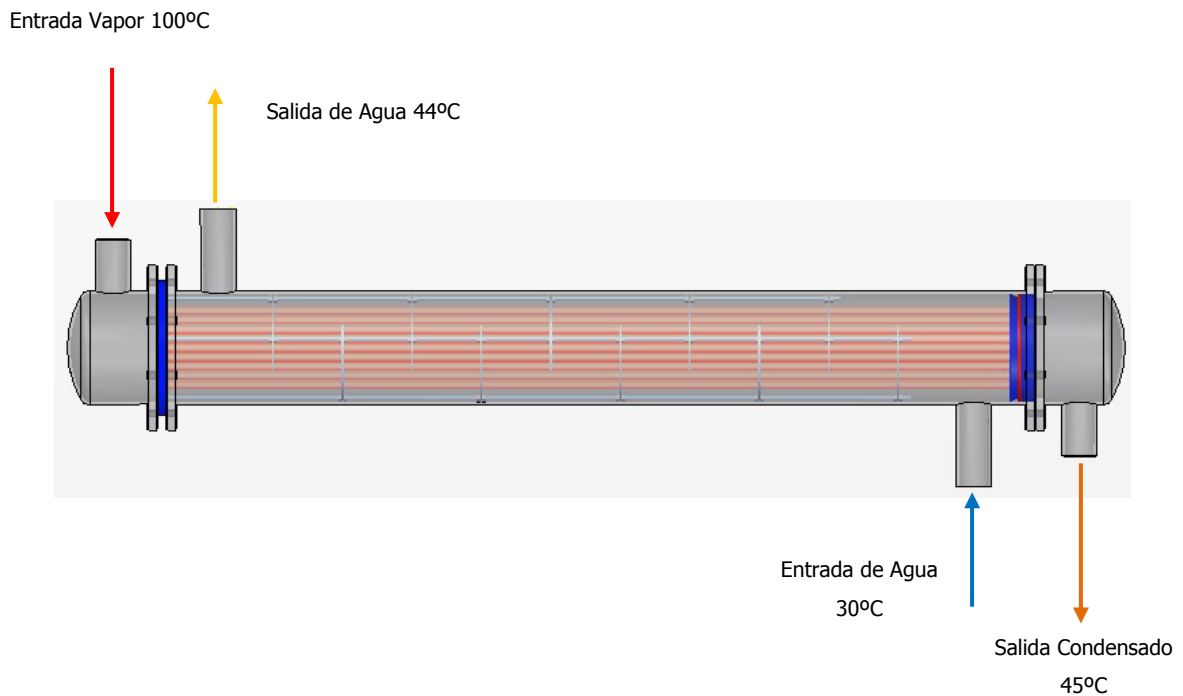


Figura 44. Esquema de localización de fluidos

Fuente: Autores del proyecto

Datos geométricos

Corresponden a la geometría de los tubos seleccionados como lo son el diámetro externo e interno, la longitud y el arreglo con el cual se van a distribuir en el haz de tubos. Para la selección de materiales de los tubos y del casco se tuvo en cuenta el mercado local, tomando para el haz de tubos, tubería tipo *tubing* en acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " ($De=1/2"$ =12.7 mm, $Di=10.922$ mm), se optó por acero inoxidable, ya que en las pruebas de laboratorio se detectó contaminación del aceite esencial por ser la tubería en cobre. Para el casco se seleccionó un tubo de acero inoxidable de 6" SCH 10 ($De=168.3$ mm; $Di=161.494$ mm; $Espesor=3.403$ mm).

Geometría del arreglo: El haz de tubos tendrá un arreglo estándar de 30° .

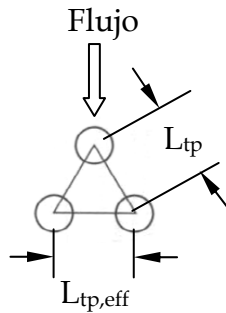


Figura 45. Geometría del arreglo de 30° en los tubos¹²

Fuente: Autores del proyecto

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

Datos de criterio

- El condensador se construirá todo en acero inoxidable.
- El vapor irá por dentro de los tubos y el agua por el lado del casco.
- Por razones de mantenimiento el haz de tubos se hará desmontable.
- El claro diametral entre el casco-haz (L_{bb}) será el menor posible.
- El agua para enfriamiento y el vapor viajarán en contraflujo.
- El corte del bafle (B_c) se obtiene a partir del porcentaje de corte del bafle (% B_c) definido por la relación entre la longitud de separación de los bafles centrales y el diámetro interno de carcasa L_{bc}/D_c .

¹² Tomado de HEDH, ítem 7, página 3.3.5-3

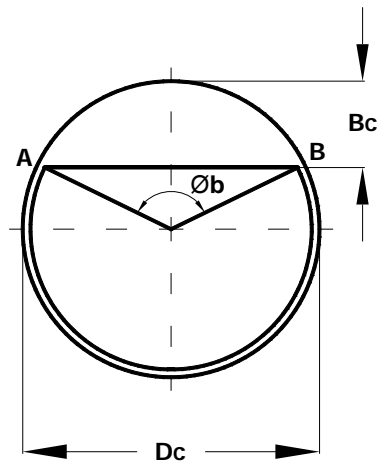


Figura 46. Corte del bafle.

Fuente: Fuente: Capítulo 5, Sección 4.2 – pagina 235 del HEDH¹³

4.1.2 Diseño Térmico: Zona de Condensación.

En esta zona se presenta un cambio de fase por lo que el calor de condensación que debemos remover es calor latente por parte del vapor el cual será igual al calor sensible del agua; el proceso es similar por el lado del casco; se hace necesario el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Q_{condensación} = \dot{m}_v * h_{fg} \quad (4.2)$$

$$Q'_{agua} = \dot{m}_a * C_{p_a} * (t_2 - t') \quad (4.5)$$

$$Q = U * A'_{cond} * LTDM \quad (4.6)$$

$$LTDM = \frac{(T_{sat} - t') - (T_{sat} - t_2)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_{sat} - t_2)}} \quad (4.7)$$

Para el diseño térmico en esta zona se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

¹³ Heat Exchanger and Steam Generator Design, Lecture Notes 7 Part 2, Page 16

<http://www.me.metu.edu.tr/courses/me421/me421mat.html>

Consultado en Enero de 2009

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

La cantidad de calor a extraer en la zona de condensación se obtiene de la ecuación (4.2):

$$Q_{condensación} = \dot{m}_v * h_{fg}$$

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

\dot{m}_v : Flujo másico por los tubos, vapor.

h_{fg} : Entalpía de vaporización.¹⁴

PASO 2. Temperatura intermedia.

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

$$Q_{condensación} = Q'_{agua} \quad (4.8)$$

Entonces podemos conocer la temperatura de entrada a la zona de condensación del agua despejando la ecuación (4.5):

$$t' = t_2 - \frac{Q'_{agua}}{\dot{m}_a * C_{pa}}$$

\dot{m}_a : Flujo másico por el lado del casco.

t_2 : Temperatura de salida del agua de refrigeración.

t' : Temperatura de entrada del agua a la zona de condensación.

C_{pa} : Calor específico a la temperatura media del agua¹⁵

¹⁴ Tomado de tablas de propiedades termodinámicas, Termodinámica de Cengel.

¹⁵ Propiedades de agua, Transferencia de calor Anthony F Mills.

PASO 3. Diferencia de temperatura media logarítmica

El procedimiento para calcular la diferencia de temperatura media logarítmica en cada una de las zonas es similar al utilizado en los intercambiadores sin cambio de fase y se obtiene a partir de la ecuación (4.7):

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

PASO 4. Cálculo de área de condensación asumida.

De la ecuación (4.6), se calcula un área de transferencia de condensación a partir de un $U_{asumido}=850 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, con esta área de condensación asumida calculamos los parámetros necesarios para corregir el $U_{asumido}$ mediante un proceso de iteración.

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

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

Se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor real externo; al calcular 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. Pero esto no es así ya que se presentan diversos tipos de corrientes que afectan el desempeño y que se deben tener en cuenta, los diferentes tipos de corrientes son:

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

Primero, se calcula el valor ideal y, luego, se corrige por una serie de factores que tienen en cuenta las diferentes zonas del flujo del lado del casco en donde la interacción térmica entre el fluido y la superficie exterior de los tubos es diferente.

El método utilizado fue desarrollado por la universidad de *Delaware* y está basado en una serie de datos de un banco de tubos ideal con geometría similar a un intercambiador de casco y tubos práctico. Por esta razón, se utiliza la tabla y ecuaciones descritas a continuación o la siguiente gráfica como base para los cálculos¹⁶.

J_i es el factor de *Corlun* transferencia de calor

f_i es el factor de fricción

$$J_i = (a_i) * \left(\frac{1,33}{L_{tp}/d_e} \right)^a * (Re_c)^{a_2} \text{ Donde } a = \frac{a_3}{1+0,14*(Re_c)^{a_4}} \quad (4.9)$$

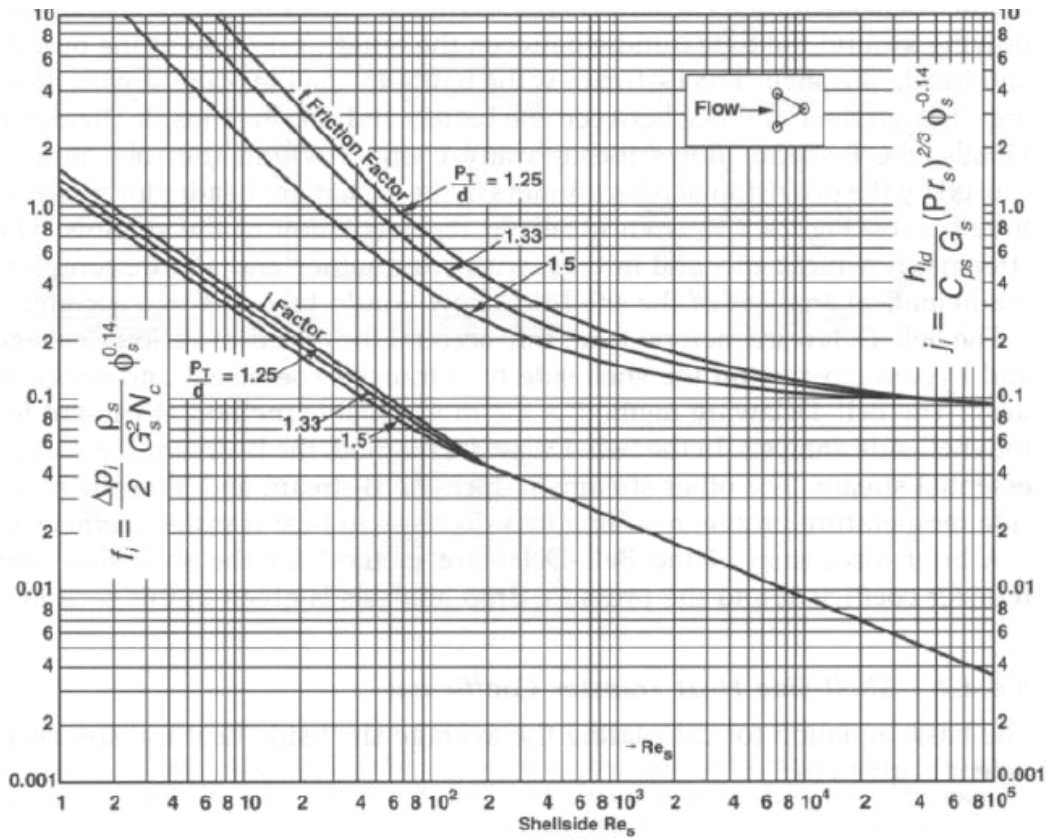
$$f_i = b_i * \left(\frac{1,33}{L_{tp}/d_e} \right)^b * (Re_c)^{b_2} \text{ Donde } b = \frac{b_3}{1+0,14*(Re_c)^{b_4}} \quad (4.10)$$

Tabla 29. Constantes para el cálculo de J_i y f_i para un arreglo de 30 grados.

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

Fuente: Sección 3.3.7 del HEDH

¹⁶ Tomadas de la sección 3.3.7 del HEDH



Ideal tube bank j_i and f_i factors for 30°C staggered layout. (From Taborek, J. [1983] *Heat Exchanger Design Handbook*, Section 3.3, Hemisphere, Washington, D.C. With permission from Begell House, NY.)

Figura 47. Factores J_i y f_i para banco de tubos ideal para un arreglo a 30°
 Fuente: *Heat Exchanger and Steam Generator Design, Lecture Notes 7 Part 2, Page 16*¹⁷

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

$$Re_c = \frac{d_e \cdot \dot{m}_s}{\mu} \quad (4.11)$$

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

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_c}{S_m} \quad (4.12)$$

¹⁷ <http://www.me.metu.edu.tr/courses/me421/me421mat.html>

Consultado en Enero de 2009

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

P_{rs} : Número de *Prandtl* del fluido del casco

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

$$\phi_c = \left(\frac{\mu_c}{\mu_w} \right) \quad (4.13)$$

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

$$S_m = L_{bc} * \left[L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp,eff}} (L_{tp} - d_t) \right] \quad (4.14)$$

L_{bc} : Separación entre baffles centrales

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

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

D_{ctl} : Diámetro del círculo a través de los centros de los tubos más alejados.

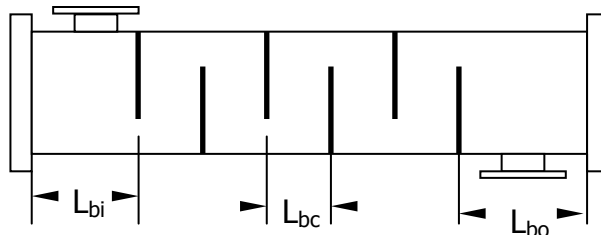


Figura 48. Separación entre baffles

Fuente: Capítulo 5, Sección 16.2 – pagina 283 del HEDH

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

$$h_{ideal} = J_i * \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(P_{rs})^{2/3} (\phi)^{-r}} \quad (4.15)$$

Factores de corrección del coeficiente de transferencia de calor del casco

El coeficiente calculado en la sección anterior es un coeficiente de transferencia de calor ideal que necesita ser corregido usando los siguientes factores:

$$J_{total} = J_c * J_l * J_b * J_s * J_r \quad (4.16)$$

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

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

$$J_c = 0.55 + 0.72 * F_c \quad (4.17)$$

Donde: $F_c = 1 - 2 * F_w$ y $F_w = \frac{A_w}{A} = \frac{N_{tw}}{N_{tt}}$ (4.18)

F_c : Fracción de tubos en flujo transversal;

F_w : Fracción de tubos ubicados en la ventana;

N_{tw} : Número de tubos en la ventana;

N_{tt} : Número de tubos totales.

Factor de corrección por fuga en el baffle (J_l): La diferencia de presión entre los dos compartimentos separados por un baffle, hace que el fluido penetre en los espacios entre el casco y el borde de la circunferencia del baffle y el espacio entre tubos y orificios en el baffle.

De las dos consideraciones anteriores el flujo entre el casco y el baffle es el que más afecta la transferencia de calor, ya que este no interactúa con los tubos. Por el contrario, el flujo entre el tubo y el baffle pasa por la superficie y es parcialmente efectivo. Aunque en algunos casos este flujo va disminuyendo con el paso del

tiempo debido a que los pequeños espacios entre el tubo y bafle se van tapando debido a la suciedad.

$$J_l = 0.44(1 - r_s) + [1 - 0.44(1 - r_s)] * e^{-2.2r_{lm}} \quad (4.19)$$

Donde,
$$r_{lm} = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m} \quad y \quad r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}} \quad (4.20)$$

Para el cálculo se deben determinar los siguientes valores:

$$S_{tb} = \frac{\pi}{4} [(D_t + L_{tb})^2 - d_e^2] (Ntt) (1 - F_w) \quad (4.21)$$

$$S_{sb} = \pi D_i \left(\frac{L_{sb}}{2} \right) \left(\frac{360 - \theta_{ds}}{360} \right) \quad (4.22)$$

$$\theta_{ds} = 2 * \cos^{-1} \left(1 - 2 * \left(\frac{B_c}{100} \right) \right) [deg] \quad (4.23)$$

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

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

Longitud máx. no soportada

< 36" o $D_t > 1 \frac{1}{4}$ "
> 36"

L_{tb}

1/32" (0.8 mm)
1/64" (0.4 mm)

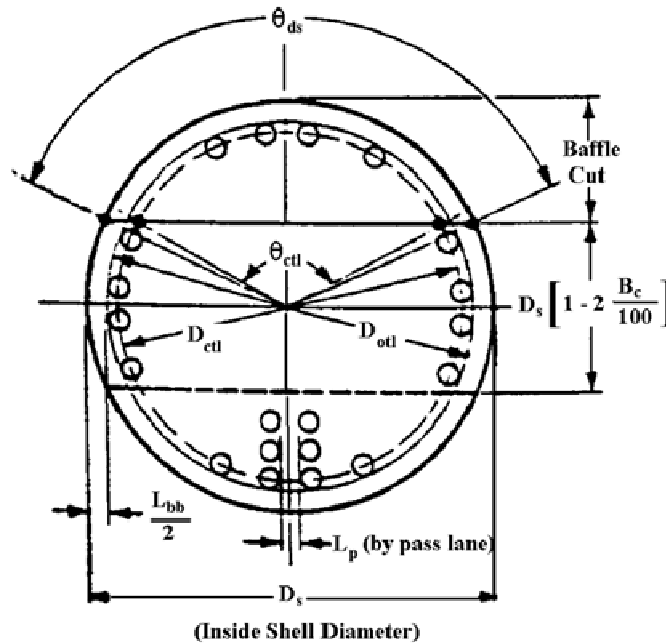


Figura 49. Geometría del área transversal del Condensador.

Fuente: Capítulo 5, Sección 16.2 – pagina 277 del HEDH

- S_{sb} : Área de fuga entre el casco y el baffle;
 S_{tb} : Área de fuga entre el tubo y el orificio del baffle ;
 S_m : Área de flujo cruzado al centro de haz de tubos.

Factor de corrección por corrientes de *bypass* en el haz (J_b): La resistencia al flujo en el espacio entre el casco y el haz de tubos es menor que a través del haz. Por esta razón, una parte del flujo buscará irse por allí en proporción a la relación de resistencias del área de *bypass* y el área de flujo cruzado en el haz.

$$J_b = \exp[-C_{bh} * F_{sbp} * (1 - \sqrt[3]{2 * r_{ss}})] \quad (4.24)$$

Para determinar J_b se deben conocer los siguientes parámetros:

- $C_{bh} = 1.35$ Flujo laminar $Re_s < 100$
 $C_{bh} = 1.25$ Flujo turbulento y de transición $Re_s > 100$

$$F_{sbp} = \frac{S_b}{S_m} \quad y \quad S_b = L_{bc} [L_{bb} + L_{pl}] \quad (4.25)$$

$L_{pl} = 0$ para cálculos estándar

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

$$r_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_{tcc}} ; N_{ss} = \frac{N_{tt} * F_w}{6} ; N_{tcc} = \frac{D_c}{L_{pp}} \left[1 - 2 \frac{B_c}{100} \right] \quad (4.26)$$

Tabla 30. Valores de L_{tpef} y L_{pp} según el arreglo.

| Arreglo | L_{tpef} | L_{pp} |
|---------|----------------|----------------|
| 30° | L_{tp} | $0.866 L_{tp}$ |
| 45° | $0.707 L_{tp}$ | $0.707 L_{tp}$ |
| 90° | L_{tp} | L_{tp} |

Fuente: Capítulo 5, Sección 16.2 – página 282 del HEDH

- S_b = Área de flujo por las corrientes de *Bypass*;
 L_{bc} = Espaciamiento central entre baffles;
 L_{bb} = Espacio casco – haz;

- L_{pl} = Expresa el efecto de *Bypass* en el espacio de partición de los tubos;
 $L_{tp,ef}$ = Paso efectivo, depende del arreglo de los tubos;
 N_{ss} = Número de platinas de sello en un bafle;
 NTB = Número de tubos en el bafle;
 L_{pp} = Distancia entre filas de tubos en la dirección del flujo;
 N_{tcc} = Numero de filas de tubos cruzados entre las puntas de baffles en una sección de baffles.

Factor de corrección por espaciamento desigual en la entrada y salida (J_s): Este factor de corrección se aplica cuando el espacio de entrada y salida entre el primer y último bafle es más largo en comparación con el espacio normal entre baffles (L_{bc}).

$$J_s = \frac{(N_b - 1) + (L_i^*)^{(1-n)} + (L_o^*)^{(1-n)}}{(N_b - 1) + (L_i^*) + (L_o^*)} \quad (4.27)$$

$$\text{Donde, } L_i^* = \frac{L_{bi}}{L_{bc}} \quad \text{y} \quad L_o^* = \frac{L_{bo}}{L_{bc}} \quad (4.28)$$

Los valores de la constante de aproximación. (n)

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

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

N_b : Número de baffles;

L_{bc} : Espaciamento entre baffles centrales;

L_{bi} : Espaciamento del primer bafle de entrada y la entrada del fluido, lado casco;

L_{bo} : Espaciamento entre el último bafle y la salida del fluido.

n: Constante de aproximación

Factor de corrección por gradientes de temperatura (J_R): Puede se calculado según el Número de Reynolds Re_s , según las siguientes expresiones:

Para: $Re_s \leq 20$

$$J_r = 1.51/(Nc)^{0.18} \quad (4.29)$$

Donde, $N_c = (N_b + 1) * NFB + (N_b + 2) * NFW$ (4.30)

Para: $20 \leq Re_s \leq 100$

$$J_R = \frac{1.51}{N_c^{0.18}} + \left[\frac{(20 - Re_s)}{80} \right] * \left[\left(\frac{1.51}{N_c^{0.18}} \right) - 1 \right] \quad (4.31)$$

Para $Re_s \leq 100$; Asumir: $J_R = 0.4$

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

- Nc : Número total de filas de tubos cruzadas en el intercambiador;
- Nb : Número de baffles;
- NFB : Número de filas entre puntas de baffles;
- NFW : Número de filas en la ventana;
- J_R : Factor de corrección por el número de filas cruzadas.

El coeficiente de transferencia de calor corregido (h_c) se halla del producto entre el coeficiente de transferencia de calor ideal (h_{ideal}) y el Factor total de corrección (J_{total}) el cual es calculado con la ecuación (4.16).

$$h_c = h_{ideal} * J_{total} ; \text{ donde } J_{total} = J_c J_l J_b J_s J_r \quad (4.32)$$

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

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

$$Re_t = \frac{\rho_v \cdot V_t \cdot d_i}{\mu_v} \quad (4.33)$$

$$Re > 40 \quad h'_t = 0,8 * Re_t^{-0,22} * \left[\frac{g \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\mu_l^2} \right]^{1/3} * k_l \quad (4.34)$$

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

k : conductividad térmica de tablas termodinámicas

PASO 7. Coeficiente global de transferencia de calor

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

$$\frac{1}{U_{condensación}} = \frac{1}{h_t} * \left(\frac{A_o}{A_i} \right) + Rf_i + \frac{1}{h_c} + Rf_o \quad (4.35)$$

PASO 8. Cálculo del Área de condensación

Para el cálculo del área requerida para la condensación se despejara de la Ecuación 4.6, teniendo ya el coeficiente global de transferencia de calor corregido.

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

4.1.3 Diseño Térmico: Zona de Subenfriamiento

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

$$Q_{subenfriado} = \dot{m}_t * c_{pt} * (T_{sat} - T_2) \quad (4.36)$$

$$Q_{agua} = \dot{m}_a * C_{p_c} * (t' - t_1) \quad (4.37)$$

$$Q = U * A_{subenfriado} * LTDM \quad (4.38)$$

$$LTDM = \frac{(T_{sat} - t') - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_{sat} - t')}{(T_2 - t_1)}} \quad (4.39)$$

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

PASO 1. Cantidad de calor a extraer en el Subenfriamiento

Para calcular el flujo de calor que desprenderá el condensado al enfriarse dentro de los tubos se utiliza la ecuación (4.36):

$$Q_{subenfriado} = \dot{m}_t * c_{pt} * (T_{sat} - T_2)$$

$Q_{subenfriado}$: Calor sensible del subenfriado.

\dot{m}_t : Flujo másico por el lado de los tubos.

c_{pt} : Calor específico¹⁸ por el lado de los tubos.

¹⁸ Propiedades del agua, Transferencia de calor Anthony F. Mills.

PASO 2. Temperatura intermedia.

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

$$Q_{subenfriado} = Q_{agua} \quad (4.40)$$

Despejando de la ecuación (4.37) obtenemos la temperatura de salida del agua de la zona de enfriamiento que debe ser la misma que la hallada para la entrada a la zona de condensación:

$$t' = \frac{Q_{agua}}{\dot{m}_c * C_{pc}} + t_1$$

PASO 3. Diferencia de temperatura media logarítmica

El procedimiento para calcular la Diferencia de temperatura media logarítmica es similar al realizado para la zona de condensación, utilizando la ecuación (4.39).

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

PASO 4. Cálculo de Área de subenfriamiento asumida.

De la ecuación (4.38) se calcula un área de transferencia de subenfriamiento a partir de un $U_{asumido}$ de $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, con esta área de subenfriamiento asumida calculamos los parámetros necesarios para corregir el $U_{asumido}$ mediante un proceso de prueba y error.

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

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

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

$$Re_c = \frac{d_e \dot{m}_s}{\mu} \quad (4.41)$$

$$h'_{ideal} = J_i \frac{(C_p)_s \dot{m}_s}{(Pr_s)^{2/3} (\phi_c)^{-r}} \quad (4.42)$$

$$h'_c = h'_{ideal} * (J_{total}) \quad (4.43)$$

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

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

$$Re_t = \frac{\rho \cdot V_t \cdot d_i}{\mu} \quad (4.44)$$

Donde: V_t es la velocidad del fluido en cada tubo.

$$V_t = \frac{4 \cdot \dot{m}_t}{N_{tt} \cdot \rho \cdot \pi \cdot d_i^2} \quad (4.45)$$

Si $Re_t < 2300$ entonces:

$$Nu_D = \left[3,66 + \frac{0,0668 \left(\frac{d}{L}\right) Re_t Pr_t}{1 + 0,04 \left(\left[\frac{d}{L}\right] Re_t Pr_t\right)^{2/3}} \right] * \phi \quad (4.46)$$

Si $Re_t > 10000$

$$Nu_D = 0,023 * Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{0,7} \cdot \phi \quad (4.47)$$

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

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

$$\Phi_t = \frac{\mu_t}{\mu_w} \quad (4.48)$$

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

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

$$h_t = \text{Nu} \cdot K / D \quad (4.49)$$

PASO 7. Coeficiente global de transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia se determina a partir del conocimiento de los coeficientes de convección de los fluidos caliente y frío, de los parámetros geométricos y de los factores de impureza Rf_i y Rf_o que son resistencias térmicas que dependen de la temperatura de operación, la velocidad del fluido y el tiempo de servicio del intercambiador.

$$\frac{1}{U_{subenfriado}} = \frac{1}{h_t} * \left(\frac{A_o}{A_i} \right) + Rf_i + \frac{1}{h_c} + Rf_o \quad (4.50)$$

PASO 8. Calculo del Área de subenfriamiento:

Tomando el calor a desalojar y el coeficiente global de transferencia de calor corregido podemos despejar el área requerida para la zona de subenfriamiento, a partir de la ecuación (4.38):

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

4.1.4 Área del condensador.

El cálculo del área total de transferencia de calor del condensador se obtiene sumando el área de condensación y el área de subenfriamiento:

$$A_{Total} = A_{condensación} + A_{Subenfriado} \quad (4.51)$$

$A_{condensación}$: Área necesaria en la zona de condensación;

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

A_{Total} : Área total de tubos.

Esta es el área total mínima necesaria para condensar el vapor y a la temperatura necesaria para que el aceite esencial se separe apropiadamente.

Con el área total se halla la longitud real de los tubos:

$$A_{Total} = A_{t1} * N_{tt} ; \text{Entonces } L_{real} = \frac{A_{t1}}{\pi * d_i} + 2 * L_{ts} \quad (4.52)$$

A_{t1} : Área de un tubo del condensador;

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

L_{ts} : Espesor de la placa porta tubos;

N_{tt} : Número total de tubos.

4.1.5 Caída de Presión en el condensador.

La caída de presión por el lado del casco se calcula mediante el procedimiento planteado en el HEDH¹⁹; la cual se compone de tres distintas partes:

$$\Delta P_c = \Delta P_f + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (4.53)$$

¹⁹ Capitulo 5, Sección 16.2 – pagina 285-286 del HEDH

Donde;

ΔP_f : Caída de presión del fluido cruzado entre los baffles;

ΔP_w : Caída de presión en la ventana del baffle;

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

Caída de presión del fluido cruzado entre los baffles.

Está basada en la caída de presión en el banco de tubos ideal.

$$\Delta P_f = \Delta P_{bi} * (N_b - 1)(R_b)(R_i) \quad (4.54)$$

R_b : Factor de corrección por *bypass*;

R_i : Factor de corrección de fugas;

ΔP_{bi} : Caída de Presión para el banco de tubos ideal.

ΔP_{bi} es basada en el banco de tubos ideal y se presenta entre los extremos de los baffles de cada compartimiento, donde el número de filas de tubos cruzados, $N_c = N_{tcc}$, y donde $(\Phi_s)^{-r}$ es el gradiente de viscosidad de pared del tubo.

$$\Delta P_{bi} = 2 \cdot f_i \cdot N_{tcc} \cdot \frac{(m_s)^2}{\rho_c} (\Phi_c)^{-r} \quad (4.55)$$

$$\text{Donde: } f_i = b_1 \left(\frac{1,33}{L_{tp}/D_t} \right)^b * (Re_c)^{b_2} ; b = \frac{b_3}{1+0,14(Re_c)^{b_4}} \quad (4.56)^{20}$$

Factor de corrección por fugas:

$$R_i = EXP(-1,33 * (1 + r_s) * r_{lm}^p); \text{ Donde } p = -0,15 * (1 + r_s) + 0,8 \quad (4.57)$$

²⁰ Los valores de b_1 , b_2 , b_3 y b_4 son tomados de la Tabla 28.

Factor de corrección por *bypass*:

$$R_b = EXP \left(C_{bp} \cdot F_{sbp} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{2r_{ss}} \right) \right); \text{ Si } r_{ss} > 1/2 \text{ entonces } R_b = 1 \quad (4.58)$$

Caída de presión en la ventana del bafle:

La caída de presión en la ventana del bafle está definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta p_w = N_b * \left[(2 + 0,6N_{tcw}) \frac{(\dot{m}_w)^2}{2\rho_c} \right] * R_l \quad (4.59)$$

Donde: $\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_c}{\sqrt{S_m S_w}} \times 10^6 \quad (4.60)$

$$S_w = S_{wg} - S_{wt} \quad (4.61)$$

$$S_{wt} = N_{tt} F_w \left(d_t^2 \pi / 4 \right) \quad (4.62)$$

$$S_{wg} = \left(D_c^2 \pi / 4 \right) \left(\theta_{ds} / 360 - \text{sen} / 2\pi \right) \quad (4.63)$$

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

Está determinada por la siguiente ecuación:

$$\Delta P_e = \Delta P_{bi} \cdot \left(1 + \frac{N_{tcw}}{N_{tcc}} \right) \cdot R_b \cdot R_s; \text{ Donde } R_s = \left(\frac{L_{bc}}{L_{bo}} \right)^{2-n} + \left(\frac{L_{bc}}{L_{bi}} \right)^{2-n} \quad (4.64)$$

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

4.1.6 Tabulación de datos para el diseño del condensador.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las zonas aplicando los pasos enunciados anteriormente.

Tabla 31. Diseño térmico de la zona de condensación (Primera Iteración)

| DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSACIÓN) Primera Iteración | | | | | |
|--|----------|--------------|---------|--------------------------|-------|
| DATOS DEL PROCESO | | | | | |
| Temp. Entrada del Casco (°C) | 31,3 | Cp (J/Kg-K) | 4175 | Presión Entrada (KPa) | 101,3 |
| Temp. Salida del Casco (°C) | 44 | Ma (Kg/s) | 1,1107 | | |
| Calor Transferido (W) | 58870,08 | | | | |
| Temp. Entrada de los Tubos (°C) | 100 | hfg (J/Kg-K) | 2257000 | Presión Entrada (KPa) | 101,3 |
| Temp. Salida de los Tubos (°C) | 100 | Mv (Kg/s) | 0,02608 | | |

| | |
|---------------------------------|-----|
| U (W/m ² -K) Asumido | 850 |
|---------------------------------|-----|

| DATOS GEOMÉTRICOS | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|-------------------|--------------------------|----------|---------|
| Lado de los Tubos | di (mm) | 10,9220 | Lado del Casco | Di (mm) | 161,4940 | Arreglo |
| | de (mm) | 12,7000 | | De (mm) | 168,3000 | |
| Lbb (m) | 0,0068 | Lbc (m) | 0,1013 | BC (%) | 29 | |
| Dotl (m) | 0,1397 | Lbi(m) | 0,1510 | NTT | 60 | |
| Dctl (m) | 0,1270 | Lbo (m) | 0,1510 | Ntw | 11 | |
| K _{arreglo 30°} | 0,8660 | Lpl (m) | 0,00635 | R _{fi} | 0,00035 | |
| Ltp (m) | 0,01588 | Lpp (m) | 0,01375 | R _{fo} | 0,00033 | |
| Ltp eff (m) | 0,01588 | Ltb | 0,800 | Sm (m ²) | 0,0033 | |
| Lsb (m) | 0,00225 | Lbc/Di | 0,627 | ms (Kg/m ² s) | 340,36 | |

| PROPIEDADES | | | | | | |
|---|------------------------|-----------|--|------------------------|----------|--|
| Lado de los Tubos Ts _{sat} =100°C (vapor) | r (Kg/m ³) | 0,5975 | Lado del Casco T=37,65°C (Agua) | r (Kg/m ³) | 993,1 | Temperatura de Pared (°C) (Supuesta) |
| | m (Kg/m-s) | 0,0001227 | | m (Kg/m-s) | 0,000687 | |
| | K (W/m-K) | 1 | | Pr | 4,585 | |
| T=100°C (Líquido) | r (Kg/m ³) | 958 | | K (W/m-K) | 0,62877 | 95 |
| | m (Kg/m-s) | 0,000282 | | Cp (J/Kg-K) | 4175 | |
| | K (W/m-K) | 0,681 | | | | |

| RESULTADOS (Primera Iteración) | | | | | |
|---|----------------|------------------------------------|-------|----------------|----------|
| Q total (W/m ² -K) | 58870,08 | LMTD | 62,13 | mw (Kg/m-s) | 0,000302 |
| A _{supuesta} (m ²) | 1,1147 | | | | |
| Número de tubos totales | 60 | Número de Re en el casco | | | 6292 |
| Longitud de los tubos (m) | 0,47 | Factor de Corrección prop. | | | 2,27 |
| Velocidad en los tubos (m/s) | 7,77 | Ji (Factor de Colburn) | | | 0,0092 |
| Número de Re en los tubos | 4130 | hi (W/m ² -K) del Casco | | | 5315 |
| h (W/m ² -K) de los tubos | 4220 | Factor total de Corrección hc | | | 0,5628 |
| | | h (W/m ² -K) del Casco | | | 2991,16 |
| U (W/m ² -K) Calculado | 711,484 | | | | |

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 32. Diseño térmico de la zona de condensación (Segunda Iteración)

| DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (CONDENSACIÓN) Segunda Iteración | | | | | |
|--|----------|--------------|---------|--------------------------|-------|
| DATOS DEL PROCESO | | | | | |
| Temp. Entrada del Casco (°C) | 31,3 | Cp (J/Kg-K) | 4175 | Presión Entrada (Kpa) | 101,3 |
| Temp. Salida del Casco (°C) | 44 | Mc (Kg/s) | 1,1107 | | |
| Calor Transferido (W) | 58870,08 | | | | |
| Temp. Entrada de los Tubos (°C) | 100 | hfg (J/Kg-K) | 2257000 | Presión Entrada (Kpa) | 101,3 |
| Temp. Salida de los Tubos (°C) | 100 | Mv (Kg/s) | 0,02608 | | |

| | |
|---------------------------------|---------|
| U (W/m ² -K) Asumido | 711,484 |
|---------------------------------|---------|

| DATOS GEOMÉTRICOS | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|-------------------|--------------------------|----------|---------|
| Lado de los Tubos | di (mm) | 10,9220 | Lado del Casco | Di (mm) | 161,4940 | Arreglo |
| | de (mm) | 12,7000 | | De (mm) | 168,3000 | 30° |
| Lbb (m) | 0,0068 | Lbc (m) | 0,1013 | BC (%) | 29 | |
| Dotl (m) | 0,1397 | Lbi(m) | 0,1510 | NTT | 60 | |
| Dctl (m) | 0,1270 | Lbo (m) | 0,1510 | Ntw | 11 | |
| K _{arreglo} 30° | 0,8660 | Lpl (m) | 0,00635 | R _{fi} | 0,00035 | |
| Ltp (m) | 0,01588 | Lpp (m) | 0,01375 | R _{fo} | 0,00033 | |
| Ltp eff (m) | 0,01588 | Ltb | 0,800 | Sm (m ²) | 0,0033 | |
| Lsb (m) | 0,00225 | Lbc/Di | 0,627 | ms (Kg/m ² s) | 340,36 | |

| PROPIEDADES | | | | | | |
|--|------------------------|------------|--|------------------------|----------|--|
| Lado de los Tubos T _{sat} =100°C (vapor) | r (Kg/m ³) | 0,5975 | Lado del Casco T=37,65°C (Agua) | r (Kg/m ³) | 993,1 | Temperatura de Pared (°C) (Supuesta) |
| | m (Kg/m-s) | 0,00001227 | | m (Kg/m-s) | 0,000687 | |
| | K (W/m-K) | 1 | | Pr | 4,585 | |
| T=100°C (Líquido) | r (Kg/m ³) | 958 | | K (W/m-K) | 0,62877 | 95 |
| | m (Kg/m-s) | 0,000282 | | Cp (J/Kg-K) | 4175 | |
| | K (W/m-K) | 0,681 | | | | |

| RESULTADOS (Segunda Iteración) | | | | | |
|---|----------|---|-------|----------------|--------------|
| Q total (W/m ² -K) | 58870,08 | LMTD | 62,13 | mw (Kg/m-s) | 0,000302 |
| A _{supuesta} (m ²) | 1,332 | | | | |
| Número de tubos totales | 60 | Número de Re en el casco | | | 6292 |
| Longitud de los tubos (m) | 0,56 | Factor de Corrección prop. | | | 2,27 |
| Velocidad en los tubos (m/s) | 7,77 | Ji (Factor de Colburn) | | | 0,0092 |
| Número de Re en los tubos | 4130 | hi (W/m ² -K) del Casco | | | 5315 |
| h (W/m ² -K) de los tubos | 4220 | Factor total de Corrección hc | | | 0,5628 |
| | | h (W/m ² -K) del Casco | | | 2991,16 |
| U (W/m ² -K) Calculado | 711,484 | A _{condensación} (m ²) | | | 1,332 |
| At1 | 0,022 | L _{real} (m) | | | 0,556 |

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 33. Diseño térmico de la zona de subenfriamiento (Primera Iteración)

| DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (SUBENFRIAMIENTO) Primera Iteración | | | |
|---|-----------|------------------------------------|--------|
| Propiedades del Fluido en los Tubos | | Propiedades del Fluido en el Casco | |
| Fluido | Vapor Liq | Fluido | Agua |
| Temp. Entrada en los Tubos (°C) | 100 | Temp. Entrada del Casco (°C) | 30 |
| Temp. Salida en los Tubos (°C) | 45 | Temp. Salida del Casco (°C) | 31,30 |
| Cpv (J/Kg-K) | 4217 | Cp (J/Kg-K) | 4175 |
| hfg (J/Kg-K) | 2257000 | | |
| mv (Kg/s) | 0,02608 | mt (Kg/s) | 1,1107 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| U (W/m ² -K) Asumido | 100 |
|---------------------------------|-----|

| DATOS GEOMÉTRICOS | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|----------------|--------------------------|----------|---------|
| Lado de los Tubos | di (mm) | 10,9220 | Lado del Casco | Di (mm) | 161,4940 | Arreglo |
| | de (mm) | 12,7000 | | De (mm) | 168,3000 | |
| Lbb (m) | 0,0068 | Lbc (m) | 0,1013 | BC (%) | 29 | |
| Dotl (m) | 0,1397 | Lbi(m) | 0,1510 | NTT | 60 | |
| Dctl (m) | 0,1270 | Lbo (m) | 0,1510 | Ntw | 11 | |
| K _{arreglo} 30° | 0,8660 | Lpl (m) | 0,00635 | R _{fi} | 0,00035 | |
| Ltp (m) | 0,01588 | Lpp (m) | 0,01375 | R _{fo} | 0,00033 | |
| Ltp eff (m) | 0,01588 | Ltb | 0,800 | Sm (m ²) | 0,0033 | |
| Lsb (m) | 0,00225 | Lbc/Di | 0,627 | ms (Kg/m ² s) | 340,36 | |

| PROPIEDADES | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--------|---------------------------------------|------------------------|----------|---|
| Lado de los Tubos T=72,5°C | r (Kg/m ³) | 976 | Lado del Casco T=30,65°C (Agua) | r (Kg/m ³) | 995,492 | Temperatura de Pared (°C) (Supuesta) |
| | m (Kg/m-s) | 0,0004 | | m (Kg/m-s) | 0,000783 | |
| | Pr | 2,52 | | Pr | 5,322 | |
| | K (W/m-K) | 0,665 | | K (W/m-K) | 0,61617 | |
| | Cp (J/Kg-K) | 4188 | | Cp (J/Kg-K) | 4176 | |

| RESULTADOS (Primera Iteración) | | | | | | |
|---|----------------|------------------------------------|-------|-------------|----------|--|
| Q total (W/m ² -K) | 6008,04 | LMTD | 35,29 | mw (Kg/m-s) | 0,000673 | |
| A _{supuesta} (m ²) | 1,7024 | | | | | |
| Numero de Tubos | 60,00 | Número de Re en el casco | | | 5521 | |
| Longitud de los tubos (m) | 0,71 | Factor de Corrección prop. | | | 1,16 | |
| Factor de Corrección prop. | 0,594 | Ji (Factor de Colburn) | | | 0,0098 | |
| Velocidad en los tubos (m/s) | 0,0048 | hi (W/m ² -K) del Casco | | | 4666 | |
| Número de Re en los tubos | 127 | Factor total de Corrección hc | | | 0,5943 | |
| Nusselt | 2,350 | h (W/m ² -K) del Casco | | | 2772,96 | |
| h (W/m ² -K) de los tubos | 143 | | | | | |
| U (W/m ² -K) Calculado | 107,719 | | | | | |

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 34. Diseño térmico de la zona de subenfriamiento (Segunda Iteración)

| DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (SUBENFRIAMIENTO) Segunda Iteración | | | | | | |
|---|------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|--------------|---|
| Propiedades del Fluido en los Tubos | | | Propiedades del Fluido en el Casco | | | |
| Fluido | Vapor Liq | | Fluido | | Agua | |
| Temp. Entrada en los Tubos (°C) | 100 | | Temp. Entrada del Casco (°C) | | 30 | |
| Temp. Salida en los Tubos (°C) | 45 | | Temp. Salida del Casco (°C) | | 31,30 | |
| Cpv (J/Kg-K) | 4217 | | Cp (J/Kg-K) | | 4175 | |
| hfg (J/Kg-K) | 2257000 | | | | | |
| mv (Kg/s) | 0,02608 | | mt (Kg/s) | | 1,1107 | |
| U (W/m ² -K) Asumido | | 107,719 | | | | |
| DATOS GEOMÉTRICOS | | | | | | |
| Lado de los Tubos | di (mm) | 10,9220 | Lado del Casco | Di (mm) | 161,4940 | Arreglo |
| | de (mm) | 12,7000 | | De (mm) | 168,3000 | |
| Lbb (m) | 0,0068 | Lbc (m) | 0,1013 | BC (%) | | 29 |
| Dotl (m) | 0,1397 | Lbi(m) | 0,1510 | NTT | | 60 |
| Dctl (m) | 0,1270 | Lbo (m) | 0,1510 | Ntw | | 11 |
| K _{arreglo} 30° | 0,8660 | Lpl (m) | 0,00635 | R _{fi} | | 0,00035 |
| Ltp (m) | 0,01588 | Lpp (m) | 0,01375 | R _{fo} | | 0,00033 |
| Ltp eff (m) | 0,01588 | Ltb | 0,800 | Sm (m ²) | | 0,0033 |
| Lsb (m) | 0,00225 | Lbc/Di | 0,627 | ms (Kg/m ² s) | | 340,36 |
| PROPIEDADES | | | | | | |
| Lado de los Tubos T=72,5°C | r (Kg/m ³) | 976 | Lado del Casco T=30,65°C (Agua) | r (Kg/m ³) | 995,492 | Temperatura de Pared (°C) (Supuesta) |
| | m (Kg/m-s) | 0,0004 | | m (Kg/m-s) | 0,000783 | |
| | Pr | 2,52 | | Pr | 5,322 | |
| | K (W/m-K) | 0,665 | | K (W/m-K) | 0,61617 | |
| | Cp (J/Kg-K) | 4188 | | Cp (J/Kg-K) | 4176 | 39 |
| RESULTADOS (segunda Iteración) | | | | | | |
| Q total (W/m ² -K) | 6008,04 | LMTD | 35,29 | mw (Kg/m-s) | 0,000673 | |
| A _{supuesta} (m ²) | 1,5804 | | | | | |
| Numero de Tubos | 60,00 | Número de Re en el casco | | | 5521 | |
| Longitud de los tubos (m) | 0,66 | Factor de Corrección prop. | | | 1,16 | |
| Factor de Corrección prop. | 0,594 | Ji (Factor de Colburn) | | | 0,0098 | |
| Velocidad en los tubos (m/s) | 0,0048 | hi (W/m ² -K) del Casco | | | 4666 | |
| Número de Re en los tubos | 127 | Factor total de Corrección hc | | | 0,5943 | |
| Nusselt | 2,362 | h (W/m ² -K) del Casco | | | 2772,96 | |
| h (W/m ² -K) de los tubos | 144 | | | | | |
| U (W/m ² -K) Calculado | 108,220 | A _{subenfriamiento} (m ²) | | | 1,573 | |
| At1 | 0,026 | L _{real} (m) | | | 0,657 | |

Fuente: Autores del proyecto

Área de transferencia de calor requerida:

Tabla 35. Cálculo de la longitud real de los tubos.

| | | |
|--|---------|----------------|
| $A_{Total} = A_{condensación} + A_{Subenfriado}$ | 2.905 | M ² |
| $A_{t1} = A_{Total} / N_{tt}$ | 0.04842 | M ² |
| $L_{real} = A_{t1} / (\pi * d_t) + 2 * L_{ts}$ | 1.242 | M |

Fuente: Autores del proyecto.

El haz de tubos estará conformado por 60 tubos de ½” en acero inoxidable de una longitud de 1.242 m, en un arreglo a 30 grados.

Caída de presión en el condensador:

Tabla 36. Cálculo de la caída de presión en el condensador.

| CAÍDA DE PRESIÓN EN EL CONDENSADOR POR EL LADO DEL CASCO | | | | |
|--|-----------------|-------------|---------------------|--|
| Factor | Factor | Factor | Und | Descripción |
| ΔP_f | b | 0,614 | -- | Constante para el cálculo de f_i para un arreglo de 30 grados. |
| | f_i | 0,1792 | -- | Factor de fricción banco de tubos ideal. |
| | ΔP_{bi} | 196 | Pa | Caída de Presión banco de tubos ideal. |
| | P | 0,603 | -- | Constante para el cálculo del factor de corrección de fugas. |
| | RI | 0,39 | -- | Factor de corrección de fugas. |
| | Rb | 1 | -- | Factor de corrección por bypass. |
| | ΔP_f | 691 | Pa | Caída de presión del fluido cruzado entre los bafles |
| ΔP_w | Swg | 4930 | mm ² | |
| | Swt | 1393 | mm ² | |
| | Sw | 3537 | mm ² | |
| | Mw | 326,9 | kg/m ² s | |
| | Ntcw | 1,72 | Und | |
| | ΔP_w | 637 | Pa | Caída de presión en la ventana del bafle. |
| ΔP_e | Rs | 0,975 | -- | |
| | ΔP_e | 258 | Pa | Caída de presión al final de las zonas (espaciamiento en el primer y último bafle). |
| ΔP_c | ΔP_c | 1586 | Pa | Caída de Presión en el condensador. |

Fuente: Autores del proyecto

4.2 DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico del condensador considera el dimensionamiento de todas las piezas mecánicas que hacen parte integral del condensador, teniendo en cuenta los esfuerzos y presiones de trabajo a las que están sometidas.

4.2.1 Partes del intercambiador de calor.

Un intercambiador de calor de casco y tubos consta de las siguientes partes:

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

Cuerpo del Intercambiador: Es por donde circula uno de los fluidos y dentro del cual ocurre la transferencia de calor, también alberga en su interior el haz de tubos; por otra parte el cuerpo del intercambiador puede ser fabricado con laminas enrolladas, cuerpos tipo “*pipe*” o tubo en donde el cuerpo es un tubo enterizo.

Cabezal Posterior: se le llama así al cabezal por donde sale el fluido del lado de los tubos. Consta de una brida y una cubierta soldadas entre sí.

Boquillas de entrada y de salida de los fluidos: Es por donde ingresan o salen los fluidos.

Baffles: Son dispositivos mecánicos, a manera de compuertas transversales, que se insertan a lo largo del cuerpo del intercambiador. Con las pantallas, se produce un incremento de la velocidad del fluido que pasa por el casco, aumentando así su velocidad de película pero aumentando también la caída de presión.

Por otra parte direccionan el fluido del lado del cuerpo para que en lo posible sea de forma perpendicular a los tubos, incrementando así el coeficiente de transferencia de calor y aumentando el recorrido del fluido en el cuerpo.

Haz de tubos: Es el conjunto de tubos que se albergan dentro del casco y en sus extremos están soportados por placas portatubos, y su fijación se hará por expansión del tubo dentro de la placa.

Placa portatubos: Es una placa metálica perforada según el arreglo del haz de tubos y sirve para sostener los tubos en el cuerpo del intercambiador de calor, el tipo a usar será de cabezal flotante.

Sellos: Están ubicados en todas las uniones entre las bridas, evitando las fugas.

4.2.2 Clasificación y designación de intercambiadores de calor.

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

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

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

CLASE B - Son intercambiadores usados en la industria química.

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

Designación de intercambiadores de calor: Según la norma TEMA el intercambiador a utilizar para la extracción de aceites esenciales será de casco y tubos con cabezal frontal tipo B, cuerpo tipo E, con 6.36 pulgadas de diámetro interno, cabezal posterior tipo M, tubos de 1.25 m (49.21 pulgadas) de longitud, un paso cuerpo y un paso por los tubos, clase C: Por tanto, su designación sería: **CLASE C, 6-49, TIPO BEM 1-1.**

Donde el 6-49 corresponde al diámetro interno del cuerpo en pulgadas y a la longitud de los tubos en pulgadas, redondeados al número entero más cercano; la letras BEM identifican el tipo de cabezal frontal, cuerpo y cabezal posterior los cuales se muestran en la Figura 8, y por otra parte el 1-1 corresponde al número de pasos, el primer número identificará el número de pasos en el lado del cuerpo y el segundo por el lado de los tubos.

Luego de clasificar el intercambiador de calor a usar, es necesario seguir las recomendaciones de las normas TEMA, para la selección, diseño y consideraciones especiales de cada una de las partes de éste.

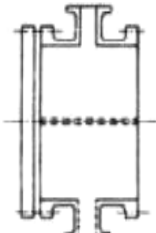
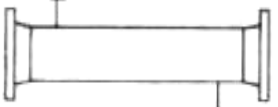
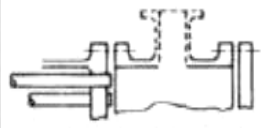
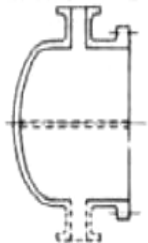
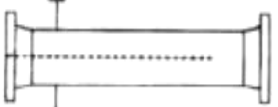
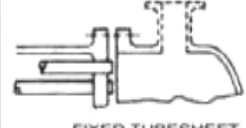
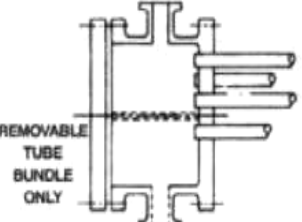
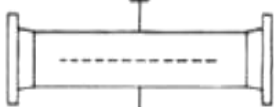

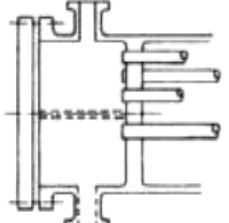
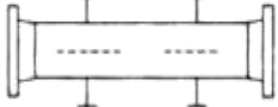
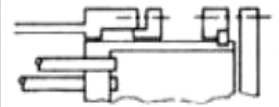
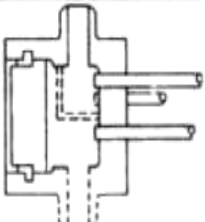
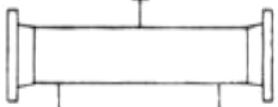
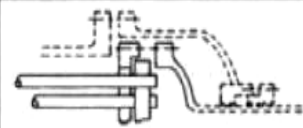
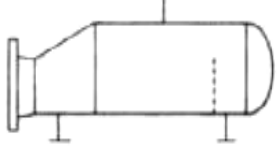
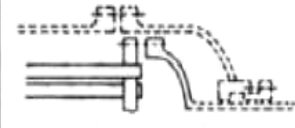
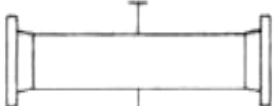
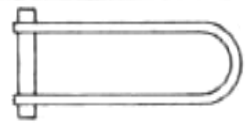

| | FRONT END STATIONARY HEAD TYPES | | SHELL TYPES | | REAR END HEAD TYPES |
|----------|---|----------|---|----------|--|
| A |  CHANNEL AND REMOVABLE COVER | E |  ONE PASS SHELL | L |  FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD |
| B |  BONNET (INTEGRAL COVER) | F |  TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE | M |  FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD |
| C |  REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER | G |  SPLIT FLOW | N |  FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD |
| N |  CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER | H |  DOUBLE SPLIT FLOW | P |  OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD |
| D |  SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE | J |  DIVIDED FLOW | S |  FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE |
| | | K |  KETTLE TYPE REBOILER | T |  PULL THROUGH FLOATING HEAD |
| | | X |  CROSS FLOW | U |  U-TUBE BUNDLE |
| | | | | W |  EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET |

Figura 50. Designación de intercambiadores.

Fuente: Capítulo 5, Sección 14.1 – Pagina 256 del HEDH Criterios de Diseño.

Aplicación y requerimientos generales:

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

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

Materiales. Por las condiciones requeridas del proceso se requiere que el casco y los tubos sean en acero inoxidable ASME SA 240 grado 304.

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

4.2.3 Diseño del casco del condensador.

El material seleccionado para la construcción del casco es acero inoxidable SA240 grado 304 debido a los requerimientos y condiciones del proceso. Para la determinación del espesor del casco se usaron las fórmulas de diseño del código ASME sección VIII pero en ningún caso el espesor nominal del casco debía ser menor que el mostrado en la siguiente tabla. Para este cálculo es necesario definir los siguientes parámetros:

Presión de operación (Po): Presión a la que trabaja el equipo en condiciones nominales del sistema.

Máxima presión de operación (Mpo): Es la mayor presión de trabajo en el sistema.

Presión de diseño (Pd): Se selecciona la mayor entre las siguientes:

$$Pd = 1.1 * Mpo \quad \text{o} \quad Pd = Mpo + 25 \text{ (psi)} \quad (4.65)$$

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

Una bomba capaz de suministrar el flujo de agua necesario para el enfriamiento tendrá un máximo de 25 psi (Mpo), por lo tanto:

Tabla 37. Cálculo de la presión de diseño en el casco.

| Pd= 1.1 * Mpo | Pd= Mpo + 25 (psi) |
|--|---------------------------|
| Pd = 1.1*(25psi) = 27.5 psi. | Pd = 25psi + 25 = 50 psi. |
| Por lo tanto la Presión de diseño será: Pd = 50 psi (344.8 kPa) | |

Fuente: Código ASME sección VIII.

El espesor mínimo del casco se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{P_d * R}{S * E - 0.6 P_d} \quad (4.66)$$

Donde:

- t : Mínimo espesor requerido para el casco;
- Pd : Presión de diseño en kPa;
- R : Radio interior del casco;
- S : Máximo valor de esfuerzo admisible 158600 kPa;
- E : 0.6 la eficiencia de la junta.

De allí, se obtiene que $t = 0.293$ mm. El espesor nominal no debe ser menor que el mostrado en la siguiente tabla; Como el espesor obtenido por fórmula es menor entonces el espesor mínimo a utilizar será el de la tabla tomado para el casco de

6" el cual es de 1/8" (3.175mm). Comercialmente se consigue tubería de 6" y Sch 10 (3.403 mm) el cual es mayor que el mínimo requerido según la norma TEMA.

Tabla 38. Espesores mínimos de cascos de intercambiadores.

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

Fuente: Norma TEMA sección C-3.13.

4.2.4 Diseño de los tubos del condensador.

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

Tabla 39. Calculo de la presión de diseño en los tubos.

| | |
|--|---------------------------|
| Pd= 1.1 * Mpo | Pd= Mpo + 25 (psi) |
| Pd = 1.1*(3psi) = 3.3 psi. | Pd = 3psi + 25 = 28 psi. |
| Por lo tanto la Presión de diseño será: Pd = 28 psi (193 kPa) | |

Fuente: Código ASME sección VIII.

Usando la ecuación (4.66):
$$t = \frac{P_d * R}{S * E - 0,6 P_d}$$

Se obtiene que t = 0.011 mm.

Comercialmente se encuentra tubería tipo *tubing* en acero inoxidable de 1/2" con un espesor de 0.035 in (0.889 mm), siendo mayor que el mínimo requerido.

4.2.5 Diseño de los Bafles del condensador.

Corte de los Bafles: El corte del bafle se expresa como un parámetro adimensional

$$\text{definido por la siguiente relación: } B_c = \left(\frac{L_{bc}}{D_c} \right) * 100 \quad (4.67)$$

L_{bc} : Separación entre bafles centrales.

D_c : El diámetro interno del casco.

El valor adecuado para diseño del parámetro B_c , se puede obtener, a partir de la siguiente gráfica, lo que garantiza una distribución del flujo en la zona transversal del banco de tubos y en la ventana del bafle sin recirculaciones ni canalizaciones.

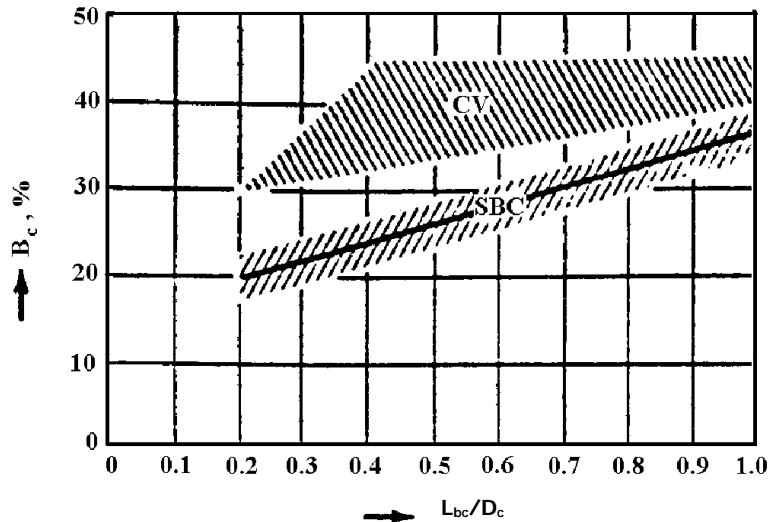


Figura 51. Valores recomendados del corte del bafle

Fuente: Sección 3.3.5 del HEDH

Los bafles a utilizar son bafles segmentados con un porcentaje de corte de bafle de (BC) igual a 29 % debido a que la relación L_{bc}/D_c es igual 0.627.

4.2.6 Diseño de los cabezales del condensador.

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

4.2.7 Selección de los empaques.

Los empaques seleccionados son de silicona de una sola pieza; debido a que este material ofrece una temperatura máxima de operación de 130°C la cual es superior a la máxima del sistema (100°C), y químicamente no reacciona con el aceite esencial, lo cual es favorable para la no contaminación del mismo.

4.2.8 Diseño de la placa portatubos.

El espesor de la placa dependerá de la mayor presión a la que esté sometida, bien sea por la presión del fluido del lado casco o la del fluido por el lado de los tubos, para nuestro caso, la mayor presión se presenta por el lado del casco. Para determinar el espesor de la placa portatubos se debe calcular por tres métodos, flexión, cizallamiento, y por norma, y se selecciona el mayor entre ellos.

Espesor por Flexión:

$$t_p = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{S}} \quad (4.68)$$

En donde:

- t_p = Espesor efectivo de placa portatubos por flexión;
- F = En placas portatubos estacionarias es igual a 1;
- G = Diámetro medio de empaque de la placa portatubos;
- P = Presión hidrostática para lado casco;
- S = Esfuerzo de trabajo permisible.

Espesor por cizallamiento:

$$t_p = \frac{0,31DL}{\left(1 - \frac{D_t}{p}\right)} * \left(\frac{P}{S}\right) \quad (4.69)$$

En donde:

- t_p = Espesor efectivo de placa portatubos por cizallamiento;

- DL = Diámetro equivalente (perímetro límite =4*A/C);
 C = Perímetro exterior del banco de tubos;
 A = Área encerrada por el perímetro exterior del banco de tubos;
 D_t = Diámetro exterior del tubo;
 P = Espacio entre tubos centro a centro;
 P = Presión hidrostática lado casco;
 S = Esfuerzo de trabajo a tensión permitida.

Espesor por Norma:

La norma TEMA (C7.121) recomienda que el espesor de la placa portatubos no debe ser menor de ¾ del diámetro externo de los tubos.

El cálculo del espesor de la placa portatubos y sus variables lo podemos encontrar en la siguiente tabla.

Tabla 40. Cálculo de la placa portatubos.

| Por Flexión | <i>tp</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>P(Kpa)</i> | <i>S(Kpa)</i> |
|--|-----------|---------------------------|--|--------------------------------|-----------------|
| $T = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{S}}$ | 4,23 | 1 | 177 | 276 | 120660 |
| Por Cizallamiento | <i>tp</i> | <i>A (mm²)</i> | <i>C (mm)</i> | <i>D_L = 4*(A/C)</i> | <i>p (paso)</i> |
| $T = \frac{0.31 DL}{(1 - \frac{do}{p})} * (\frac{P}{S})$ | 0,57 | 19260,27 | 476,4005 | 161,71 | 15,88 |
| POR NORMA | <i>tp</i> | <i>D_t (mm)</i> | Seleccionando y normalizando el mayor tp = 12,7 mm | | |
| $t_p = 3/4 * D_t$ | 9,53 | 12,7 | | | |

Fuente: Autores del proyecto

Se selecciona el calculado por norma, ya que es el mayor de los tres, éste, a su vez, se aproxima a ½" (12.7 mm) con el fin de normalizar la medida.

4.2.9 Diseño de las Bridas.

El uso de las bridas en el intercambiador de calor permitirá el fácil desarme y remoción de sus partes internas, con el fin de hacer más práctico el mantenimiento

del mismo ya sea el cambio de piezas o realizar limpieza; las bridas se pueden clasificar en tres tipos: Integral, Suelto y Opcional; y su diseño se basó en el código ASME²¹. Por lo que se hace necesaria la definición de los siguientes parámetros:

Condiciones de Diseño:

- P : Presión de diseño;
- T : Temperatura de diseño;
- S_{fo} : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura de operación;
- S_{fa} : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura ambiente;
- S_b : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura de operación;
- S_a : Esfuerzo admisible en el perno a la temperatura ambiente.²²

Características del empaque²³:

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

Determinación del número de pernos:

Se deben calcular las cargas que actúan sobre la brida y se utilizara el mayor A_m; el número de pernos se aproximará a un número de pernos múltiplo de cuatro.

$$N_{per} = \frac{Am}{Ai} \quad (4.70)$$

²¹ *Desing of process equipment – selec topics (1979), Kanti K. Mahajan, Sección 2.*

²² Valores de los esfuerzos tomados de la Tabla UHA 23 Sección VIII CODE ASME. Anexo D.

²³ Ver Anexo C.

$$A_m = \frac{Wm_1}{Sb} \text{ ó } \frac{Wm_2}{Sa} \quad (4.71)$$

$$Wm_1 = H + Hp = \frac{\pi}{4} G^2 P + 2b\pi GmP \quad (4.72)$$

$$Wm_2 = b\pi Gy \quad (4.73)$$

Donde:

A_m : Área de pernos requerida por operación o asentamiento;

A_i : Área de la raíz del perno;

W_{m1} : Carga en condición de operación;

W_{m2} : Carga en condición de asentamiento;

H : Fuerza hidrostática total;

H_p : Carga total del contacto de la junta.

Determinación del diámetro del círculo de los pernos:

$$C_1 = B + 2g_1 + 2R \quad (4.74)$$

Donde:

C : Diámetro del círculo de pernos;

g_o : Espesor de la pared del cuerpo;

B : Diámetro interno;

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

Momentos de operación y de asentamiento:

El cálculo del momento total de operación y el de asentamiento están determinados por las siguientes ecuaciones:

$$M_O = M_D + M_T + M_G \quad ; \quad M_A = W \frac{(C - G)}{2} \quad (4.75)$$

Donde:

M_o : Momento en Operación;

M_A : Momento de Asentamiento;

- M_D : Momento de brida igual a $H_D \times h_D$;
- M_G : Momento de brida igual a $H_G \times h_G$;
- M_T : Momento de brida igual a $H_T \times h_T$;
- H_D : Fuerza hidrostática sobre el área interna de la brida;
- H_G : Carga del sello del sello;
- H_T : Diferencia entre H y H_D ;
- h_D : Distancia desde el círculo de pernos hasta donde actúa H_D ;
- h_G : Distancia radial desde la reacción del sello al círculo de pernos;
- h_T : Distancia desde el círculo de pernos hasta donde actúa H_T .

En los cálculos de los esfuerzos se utiliza un momento modificado M_{FO} o M_{FA} para tener en cuenta un mayor valor de la separación mínima entre pernos. Los cuales se determinan de la siguiente manera:

$$M_{FO} = \frac{M_O * C_f}{B} ; \quad M_{FA} = \frac{M_A * C_f}{B} \quad (4.76)$$

Donde:

- M_{FO} : Momento modificado de operación;
- M_{FA} : Momento modificado de asentamiento;
- C_f : factor de corrección para el espaciamiento de pernos.

Este factor de corrección sólo se aplica, cuando $C_f > 1$

$$CF = \sqrt{\frac{E_p}{(2d_b + 25.4)}} \quad (4.77)$$

- E_p : Espaciamiento entre pernos;
- d_b : Diámetro de la raíz del perno;.
- t : Espesor asumido de la brida.

Esfuerzos en la brida:

Suponemos un espesor (t), el cual, al ser reemplazado en las ecuaciones de esfuerzo deberá dar un esfuerzo menor al permisible del material de la brida.

En condiciones de operación:

$$S_H = f M_{FO} / \lambda g_1^2 \quad (4.78)$$

$$S_R = \beta M_{FO} / \lambda t^2 \quad (4.79)$$

$$S_T = (M_{FO} Y / t^2) - Z S_R \quad (4.80)$$

$$S_{fo} = 0,5*(S_H + S_R) \quad \text{o} \quad 0,5*(S_H + S_T) \quad (4.81)$$

En condiciones de asentamiento:

$$S_H = f M_{FA} / \lambda g_1^2 \quad (4.82)$$

$$S_R = \beta M_{FA} / \lambda t^2 \quad (4.83)$$

$$S_T = (M_{FA} Y / t^2) - Z S_R \quad (4.84)$$

$$S_{fo} = 0,5*(S_H + S_R) \quad \text{o} \quad 0,5*(S_H + S_T) \quad (4.85)$$

Se selecciona el mayor momento de operación S_{fo} y el de asentamiento S_{fa} .

Donde:

S_H : Esfuerzo longitudinal;

S_R : Esfuerzo radial;

S_T : Esfuerzo tangencial.

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

Bridas en el casco: Las bridas en el casco son tipo opcional, a continuación, se presenta una tabla de resumen de los cálculos realizados durante el diseño:

Tabla 41. Cálculo de la brida en el casco

| CONDICIONES DE DISEÑO | | | | | Proyecto: | Diseño y construcción de una planta para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 300 kg de material vegetal. | | | | |
|---|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------|--|---|-----------------------------------|---------------------------------------|---------|----|
| Presión de Diseño, P | | 344643 | | pa | Autores: | Edinson López Arenales | | | | |
| Temperatura de Diseño | | 45 | | °C | | Jose Manuel Carvajal Albarracín | | | | |
| Material de la Brida | | SAE - 304 | | | DISEÑO MECANICO BRIDAS EN EL LADO DEL CASCO TIPO OPCIONAL | | | | | |
| Material de los Tornillos | | SA-193_B7 | | | | | | | | |
| Esfuerzo Permissible | Tornillos | a Temp de Diseño | S_b | 120,66 | Mpa | Revisó | Ing. Omar Gelvez | | | |
| | | a Temp Ambiente | S_a | 120,66 | Mpa | | Aprobó Dra. Elena E. Stashenko | | | |
| | Bridas | a Temp de Diseño | S_{fo} | 158,6 | Mpa | CALCULOS DEL SELLO Y TORNILLOS | | | | |
| | | a Temp Ambiente | S_{fa} | 158,6 | Mpa | | | | | |
| | | | | | Material | | Neopreno Siliconado | | | |
| | | | | | N (mm) | | 6 | b (mm) | 3 | |
| | | | | | γ (Kpa) | | 11031,612 | m | 2 | |
| | | | | | db (mm) | | 12,7 | g ₁ (mm) | 5,105 | |
| | | | | | R (mm) | | 19,0500 | C (mm) | 210 | |
| | | | | | E (mm) | | 15,8750 | A (mm) | 242 | |
| | | | | | B (mm) | | 161,494 | G (mm) | 178 | |
| | | | | | g ₀ (mm) | | 3,403 | | | |
| | | | | | $W_{m2} = \pi b G \gamma$ | | | | 18507 | N |
| | | | | | $H_p = 2\pi b G m P$ | | | | 2313 | N |
| $H = G^2 \pi P / 4$ | | | | 8576 | N | | | | | |
| $W_{m1} = H_p + H$ | | | | 10889 | N | | | | | |
| A_{m1} | 90,2 | A_{m2} | 153,4 | A_m | 153,4 | mm ² | | | | |
| N_{per} | 8 | A_i | 19,17 | db | 4,941 | mm | | | | |
| db(in) | 1/2 | A_{ib} (mm ²) | 81,29 | Ab | 650,3 | mm ² | | | | |
| $W = (A_m + A_b) S_a / 2$ | | | | 39234 | N | | | | | |
| $N_{min} = A_b S_a / 2 \gamma \pi G$ | | | | 5,41 | mm | | | | | |
| Fuerza de operación en la Brida | | | Brazo de Palanca | | | Momentos de Operación | | | | |
| $H_D = 0,7854 B^2 P$ | 7059 | N | $h_d = R + g_1 / 2$ | 12,077 | mm | $M_D = H_D h_D$ | 85,26 | N-M | | |
| $H_G = W_{m1} - H$ | 2313 | N | $h_G = (C - G) / 2$ | 15,902 | mm | $M_G = H_G h_G$ | 36,78 | N-M | | |
| $H_T = H - H_D$ | 1517 | N | $h_T = (R + g_1 + h_G) / 2$ | 20,028 | mm | $M_T = H_T h_T$ | 30,38 | N-M | | |
| | | | | | | $M_O = M_D + M_T + M_G$ | 152,41 | N-M | | |
| Fuerza de Asemtamiento del sello | | | Brazo de Palanca | | | Momento de Asentamiento | | | | |
| $H_G = W$ | 39234 | N | $h_G = (C - G) / 2$ | 15,902 | mm | $M_A = W h_G$ | 623,88 | N-M | | |
| Si el espacio entre pernos (Ep) excede $2 * db + 25,4$, aplicar factor de corrección | | $CF = (Ep / (2 * db + 25,4))^{1/2}$ | | 1,3 | | $M_{FO} = M_{FC} / B$ | 1201,90 | N-M | | |
| | | | | | | $M_{FA} = M_{AC} / B$ | 4919,79 | N-M | | |
| FACTORES DE FORMA | | | | | CALCULO DE ESFUERZOS - OPERACIÓN | | | | | |
| $K = A/B$ | 1,496 | h/h_0 | 0,218 | | Esfuerzos Permisibles (Mpa) | $1,5 S_{fo}$ | 237,9 | $S_H = f M_{FO} / \lambda g_1^2$ | 45,508 | OK |
| T | 1,71 | F | 0,89 | | | S_{fo} | 158,6 | $S_R = \beta M_{FO} / \lambda t^2$ | 8,506 | OK |
| Z | 2,616 | V | 0,416 | | | S_{fo} | 158,6 | $S_T = (M_{FO} \gamma / t^2) - Z S_R$ | 14,949 | OK |
| Y | 4,99 | f | 1,42 | | | S_{fo} | 158,6 | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_R)$ | 27,007 | |
| U | 5,482 | $e = F/h_0$ | 37,9648 | | | | | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_T)$ | 30,229 | |
| g_1/g_0 | 1,5 | $d = (U/V) h_0 g_0^2$ | 0,00000358 | | | | | S_{fo} | 30,229 | OK |
| $h_0 = (B g_0)^{1/2}$ | 0,02344 | | | | CALCULO DE ESFUERZOS - ASENTAMIENTO | | | | | |
| t (asumido) | 12,7 | | | | Esfuerzos Permisibles (Mpa) | $1,5 S_{fa}$ | 237,9 | $S_H = f M_{FA} / \lambda g_1^2$ | 186,281 | OK |
| $\alpha = t e + 1$ | 1,482 | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_R = \beta M_{FA} / \lambda t^2$ | 34,816 | OK |
| $\beta = (4/3) t e + 1$ | 1,643 | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_T = (M_{FA} \gamma / t^2) - Z S_R$ | 61,191 | OK |
| $\delta = t^3/d$ | 0,573 | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_R)$ | 110,549 | |
| $\gamma = \alpha / T$ | 0,867 | | | | | | | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_T)$ | 123,736 | |
| $\lambda = \gamma + \delta$ | 1,439 | | | | | | | S_{fo} | 123,736 | OK |

Fuente: Autores del Proyecto.

Bridas en los cabezales: Las bridas son tipo suelto, a continuación, se presenta una tabla de resumen de los cálculos realizados durante el diseño:

Tabla 42. Cálculo de la brida en los cabezales

| CONDICIONES DE DISEÑO | | | | Proyecto: | Diseño y construcción de una planta para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 300 kg de material vegetal. | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------------------------|-------------------------------------|--|---|---|------------------------------------|---------------------|-------|-----------------------------------|---|--|--|
| Presión de Diseño, P | | 344643 pa | | Autores: | | Edinson López Arenales Jose Manuel Carvajal Albarracin | | | | | | | |
| Temperatura de Diseño | | 45 °C | | | | | | | | | | | |
| Material de la Brida | | SAE - 304 | | | | | | | | | | | |
| Material de los Tornillos | | SA-193_B7 | | DISEÑO MECANICO BRIDAS EN LOS CABEZALES TIPO OPCIONAL | | | | | | | | | |
| Esfuerzo Permissible | Tornillos | a Temp de Diseño | S_b | 120,66 | Mpa | Revisó Ing. Omar Gelvez | | | | | | | |
| | | a Temp Ambiente | S_a | 120,66 | Mpa | | | | | Aprobó Dra. Elena E. Stashenko | | | |
| | Bridas | a Temp de Diseño | S_{fo} | 158,6 | Mpa | | | | | | | | |
| | | a Temp Ambiente | S_{fa} | 158,6 | Mpa | | | | | | | | |
| | | | | CALCULOS DEL SELLO Y TORNILLOS | | | | | | | | | |
| | | | | Detalles del Sello | | Material | | Neopreno Siliconado | | | | | |
| | | | | | | N (mm) | 6 | b (mm) | 3 | | | | |
| | | | | | | γ (Kpa) | 11031,612 | | | m | 2 | | |
| | | | | Geometria | | db (mm) | 12,7 | g ₁ (mm) | 5,080 | | | | |
| | | | | | | R (mm) | 19,0745 | C (mm) | 210 | | | | |
| | | | | | | E (mm) | 15,8750 | A (mm) | 242 | | | | |
| | | | | | | B (mm) | 161,494 | G (mm) | 178 | | | | |
| | | | | | | g ₀ (mm) | 3,175 | | | | | | |
| | | | | $W_{m2} = \pi b G \gamma$ | | | | 18507 | | N | | | |
| $H_p = 2\pi b G m P$ | | | | 2313 | | N | | | | | | | |
| $H = G^2 \pi P / 4$ | | | | 8576 | | N | | | | | | | |
| $W_{m1} = H_p + H$ | | | | 10889 | | N | | | | | | | |
| A_{m1} | 90,2 | A_{m2} | 153,4 | A_m | 153,4 | mm ² | | | | | | | |
| N_{per} | 8 | A_i | 19,17 | db | 4,941 | mm | | | | | | | |
| db(in) | 1/2 | A_{ib} (mm ²) | 81,29 | Ab | 650,3 | mm ² | | | | | | | |
| $W = (A_m + A_b) S_a / 2$ | | | | 39234 | | N | | | | | | | |
| $N_{min} = A_b S_a / 2 \gamma \pi G$ | | | | 5,41 | | mm | | | | | | | |
| Fuerza de operación en la Brida | | | Brazo de Palanca | | | Momentos de Operación | | | | | | | |
| $H_p = 0,7854 B^2 P$ | 7059 | N | $h_d = (C - B) / 2$ | 24,155 | mm | $M_D = H_p h_D$ | 170,52 | N-M | | | | | |
| $H_G = W_{m1} - H$ | 2313 | N | $h_G = (C - G) / 2$ | 15,902 | mm | $M_G = H_G h_G$ | 36,78 | N-M | | | | | |
| $H_T = H - H_p$ | 1517 | N | $h_T = (h_D + h_G) / 2$ | 20,028 | mm | $M_T = H_T h_T$ | 30,38 | N-M | | | | | |
| | | | | | | $M_o = M_D + M_T + M_G$ | 237,67 | N-M | | | | | |
| Fuerza de Asemtamiento del sello | | | Brazo de Palanca | | | Momento de Asemtamiento | | | | | | | |
| $H_G = W$ | 39234 | N | $h_G = (C - G) / 2$ | 15,902 | mm | $M_A = W h_G$ | 623,88 | N-M | | | | | |
| Si el espacio entre pernos (Ep) excede 2*db+25,4, aplicar factor de corrección | | | $CF = (Ep / (2 * db + 25,4))^{1/2}$ | | 1,3 | $M_{FO} = M_o C_F / B$ | 1874,24 | N-M | | | | | |
| | | | | | | $M_{FA} = M_A C_F / B$ | 4919,79 | N-M | | | | | |
| FACTORES DE FORMA | | | | CALCULO DE ESFUERZOS - OPERACIÓN | | | | | | | | | |
| $K = A/B$ | 1,496 | h/h_o | 0,210 | Esfuerzos Permisibles (Mpa) | $1,5 S_{fo}$ | 237,9 | $S_H = f M_{FO} / \lambda g_1^2$ | 75,876 | OK | | | | |
| T | 1,71 | F | 0,89 | | S_{fo} | 158,6 | $S_R = \beta M_{FO} / \lambda t^2$ | 12,638 | OK | | | | |
| Z | 2,616 | V | 0,4 | | S_{fo} | 158,6 | $S_T = (M_{FO} Y / t^2) - Z S_R$ | 24,949 | OK | | | | |
| Y | 4,99 | f | 1,6 | | S_{fo} | 158,6 | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_R)$ | 44,257 | | | | | |
| U | 5,482 | $e = F/h_o$ | 39,3043 | | | | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_T)$ | 50,413 | | | | | |
| g_1/g_o | 1,6 | $d = (U/V) h_o g_o^2$ | 0,00000313 | | | | S_{fo} | 50,413 | OK | | | | |
| $h_o = (B g_o)^{1/2}$ | 0,02264 | | | | CALCULO DE ESFUERZOS - ASENTAMIENTO | | | | | | | | |
| t (asumido) | 12,7 | | | | | | | | | | | | |
| $\alpha = t e + 1$ | 1,499 | | | | | | | | | | | | |
| $\beta = (4/3) t e + 1$ | 1,666 | | | | | | | | | | | | |
| $\delta = t^3/d$ | 0,655 | | | | | | | | | | | | |
| $\gamma = \alpha / T$ | 0,877 | | | | | | | | | | | | |
| $\lambda = \gamma + \delta$ | 1,531 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Esfuerzos Permisibles (Mpa) | $1,5 S_{fa}$ | 237,9 | $S_H = f M_{FA} / \lambda g_1^2$ | 199,172 | OK | | | | |
| | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_R = \beta M_{FA} / \lambda t^2$ | 33,173 | OK | | | | |
| | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_T = (M_{FA} Y / t^2) - Z S_R$ | 65,489 | OK | | | | |
| | | | | | S_{fa} | 158,6 | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_R)$ | 116,172 | | | | | |
| | | | | | | | $S_{fo1} = 0,5(S_H + S_T)$ | 132,330 | | | | | |
| | | | | | | S_{fo} | 132,330 | OK | | | | | |

Fuente: Autores del Proyecto.

4.3 CONSTRUCCIÓN DEL CONDENSADOR

Para la construcción se le suministraron al constructor los planos respectivos según los resultados de la etapa de diseño, todo esto teniendo en cuenta los requerimientos mínimos exigidos por las normas TEMA.

Todas las piezas del condensador se construirán en acero inoxidable con el fin de no contaminar el aceite a extraer del proceso de destilación.

Placa Portatubos:

Se cortaron los discos según especificaciones de los planos, una vez hecho esto, se realizó en el Centro de Mecanizado CNC la elaboración de los agujeros que alojaran al haz de tubos y las varillas de sujeción de los baffles; el utilizar el Centro de Mecanizado nos garantizó que los tubos no entraran forzados, lo cual no permitió que los tubos se dañaran; luego de tener fabricado los agujeros se verificaron las medidas y, luego, se llevaron al rectificado final.



Figura 52. Construcción placas portatubos.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

Haz de tubos:

Se utilizó tubería tipo *tubing* en acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ", esta tubería viene en tramos de 3 m de donde se cortaron dos tubos según las medidas requeridas; los tubos fueron acoplados con los baffles y las placas portatubos, los tubos fueron soldados a las placas portatubos para su respectiva fijación.



Figura 53. Construcción Haz de tubos.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

Baffles:

Los baffles son tipo segmentado y son de acero inoxidable, éstos fueron cortados y luego se perforados en el CNC; los baffles son sujetados por medio de tres varillas roscadas en acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " de diámetro, para evitar que el fluido refrigerante los arrastre.



Figura 54. Construcción baffles.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

Cuerpo o Casco:

El casco se construyó a partir de un tubo de acero inoxidable de 6" de diámetro cedula 10; al casco se le soldaron las bridas y las conexiones para la entrada y salida del liquido refrigerante.



Figura 55. Construcción casco condensador.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

Cabezales:

Los cabezales son en acero inoxidable y tienen soldado a su cuerpo su brida y su conexión para la entrada o salida de la mezcla aceite-vapor.



Figura 56. Construcción Cabezales.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

Soldadura:

La soldadura fue utilizada para fijar las bridas al casco y cabezales, los tubos a las placas portatubos y las conexiones de entrada y salida de los fluidos que intervienen en proceso de transferencia de calor, el tipo de soldadura usada fue con electrodo de tungsteno y protección a gas TIG usando como material de aporte: acero inoxidable 308 L.

Acero base: acero inoxidable.



Figura 57. Proceso de soldadura de bridas y conexiones.

Fuente: Industrias metalmecánicas acuña – Autores del Proyecto

Pruebas hidrostáticas:

Se realizaron las respectivas pruebas hidrostáticas y neumáticas para detectar posibles fugas por alguna de las uniones soldadas; siendo positivo el resultado de las pruebas. Las pruebas se hicieron teniendo en cuenta los lineamientos del código ASME sección VIII, utilizando una presión de prueba (PP) igual a 1,5 veces la presión de diseño:

$$PP = 1.5 P_d$$

$$PP = 1.5 * (50 \text{ psi})$$

$$PP = 75 \text{ psi. (517106 Pa)}$$



Figura 58. Pruebas Hidrostáticas.

Fuente: Industrias Metalmecánicas Acuña – Autores del Proyecto

5 EQUIPOS AUXILIARES

5.1 TUBERÍAS DE VAPOR

La tubería a utilizar para el transporte de vapor, irá desde la salida de la Biocaldera hasta el distribuidor de vapor que se encuentra dentro del destilador; la tubería utilizada es de acero al carbón ANSI B 16.9 A 106 cédula 40.

El diámetro de la tubería se determina a partir de la velocidad del vapor, la cual debe garantizar que las pérdidas de presión sean mínimas; como la longitud es de aproximadamente 5 m, entonces se utiliza una velocidad de 30 m/s, la cual es una velocidad común para el transporte de vapor saturado en donde la tubería no sea grande.

Parámetros a tener en cuenta para el dimensionamiento de la tubería:

- $M_v = 93.9 \text{ kg/h}$
- $P_{\text{cald}} = 38 \text{ PSI (2.62 Bar)}$

De la siguiente gráfica al entrar con el dato de presión normal de trabajo de la Biocaldera ($P_{\text{cald}}=2.62 \text{ bar}$), buscando la curva que corresponda al flujo másico de vapor del proceso ($M_v=93.9 \text{ kg/h}$) y, por último, se cruza con la curva de velocidad del vapor ($V=30 \text{ m/s}$), teniendo así el valor del diámetro mínimo de la tubería.

De la gráfica se seleccionó un diámetro de una pulgada (1").

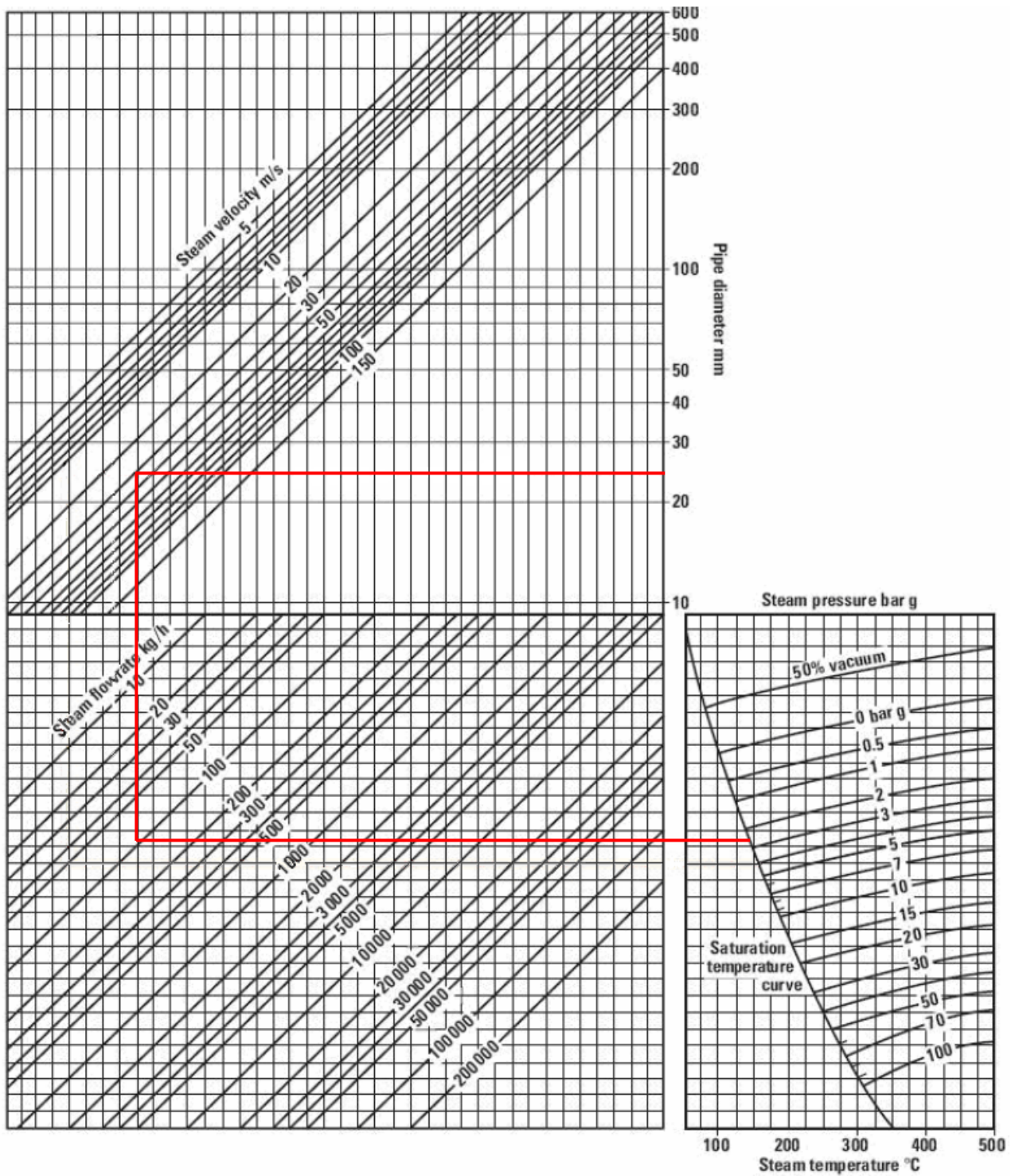


Figura 59. Gráfica de dimensionamiento de tubería para Vapor – Velocidad

Fuente: Catalogo Spirax Sarco. *Hook-Up Designs Steam & Fluid Systems*, 6th Ed., 1981.

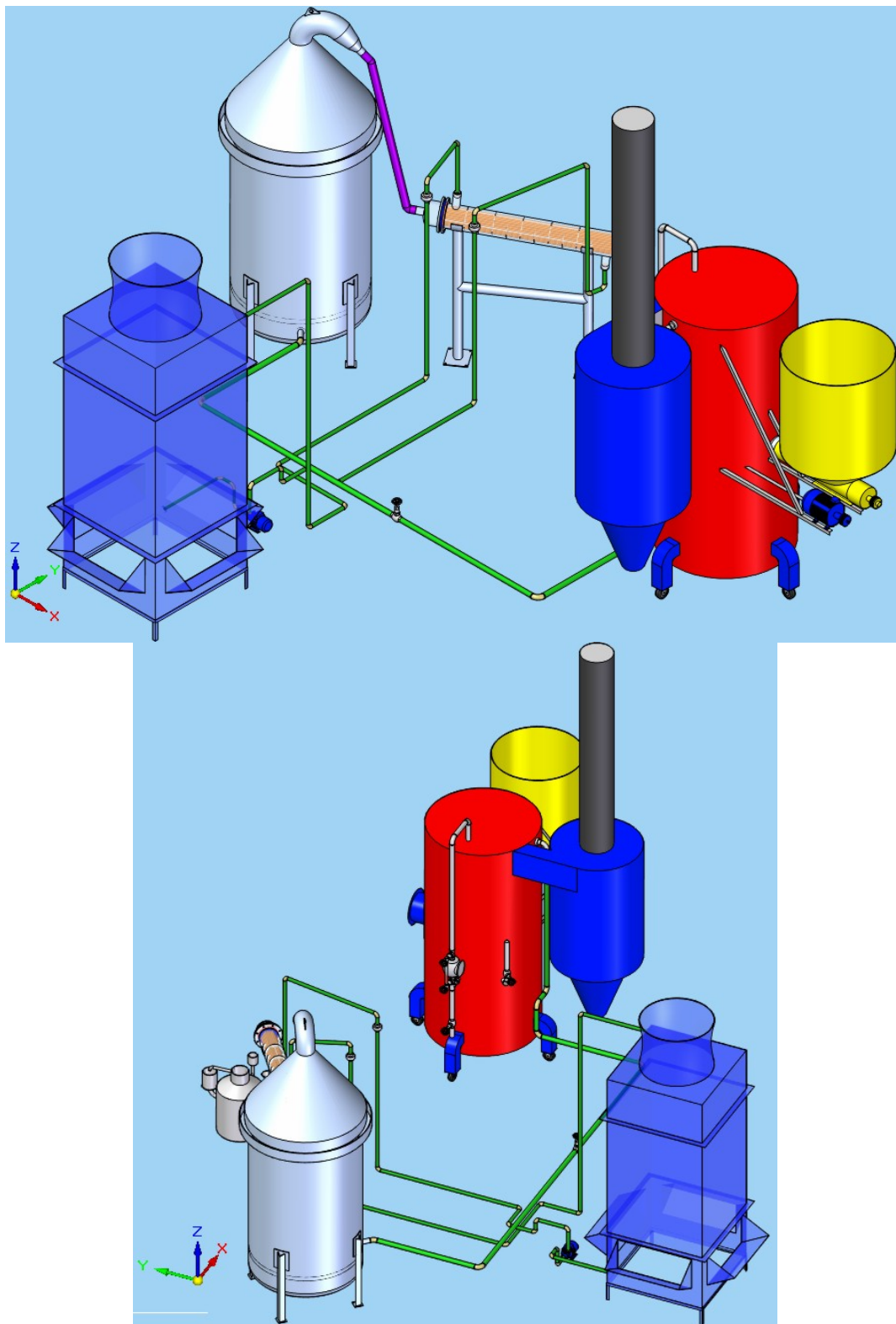


Figura 60. Sistema de tuberías u accesorios.
Fuente: Autores del Proyecto.

5.2 ACCESORIOS

La línea de distribución de vapor adicional a la tubería como tal, también requiere de otra serie de elementos o accesorios para el correcto control y funcionamiento del sistema.

De acuerdo con el esquema mostrado en la anterior gráfica los accesorios a utilizar en la línea de distribución son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 43. Listado de accesorios.

| ACCESORIO | DESCRIPCIÓN | CANT/UND |
|------------------------------------|----------------------------------|----------|
| Tubería de Vapor | 1" Acero al Carbono, 150 psi | 5,3 m |
| Tubería de PVC | 1/2" PVC | 13,7 m |
| Manguera Flexible | 1 1/2" Acero inoxidable | 2 m |
| Codo a 90° | 1" Acero inoxidable, 150 psi | 6 |
| | 1 1/2" Acero inoxidable, 150 psi | 1 |
| | 1/2" PVC | 20 |
| Codo a 45° | 1" Acero inoxidable, 150 psi | 1 |
| Válvula de globo | 1" Acero al carbono, 150 psi | 4 |
| Válvula de compuerta ²⁴ | 1" Acero inoxidable, 150 psi | 3 |
| Válvula de bola | 1 1/2" Acero inoxidable, 150 psi | 1 |
| | 1/2" Acero inoxidable, 150 psi | 1 |
| Unión universal | 1" Acero inoxidable, 150 psi | 1 |
| | 1/2" PVC | 6 |
| Manómetro de caratula | 0 – 125 psi | 1 |
| Termómetro | 0 – 200°C | 1 |

Fuente: Autores del Proyecto

5.3 AISLAMIENTO TÉRMICO

Con el fin de reducir las pérdidas de calor, que se producen tanto en la tubería de vapor y el cuerpo del destilador, se hace necesario aislarla térmicamente mediante fibra de vidrio ya que es un material que nos proporciona excelentes resultados, con esto logramos además de un ahorro energético el tener superficies frías, lo

²⁴ Ver Anexo F.

cual es conveniente desde el punto de vista ambiental y de seguridad industrial, y permite disminuir emisiones de calor al ambiente y reducir el riesgo de quemaduras en las personas.

5.3.1 Aislamiento de las Tubería para el transporte de vapor.

Para el aislamiento de la tubería se seleccionó la referencia CAÑUELA AMPLIO RANGO²⁵, y el espesor de la fibra de vidrio a utilizar se obtuvo de la siguiente tabla, la cual fue suministrada por el fabricante.

Tabla 44. Espesor óptimo de la fibra de vidrio para tuberías.

| | | Diámetro nominal de la tubería (Pulgadas) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------------|---|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1/2 | 3/4 | 1 | 1 1/4 | 1 1/2 | 2 | 2 1/2 | 3 | 3 1/2 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 30 | 36 | |
| Temperatura de servicio | Espesor recomendado pg | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | |
| | | 150°F | 89 | 90 | 90 | 90 | 91 | 91 | 91 | 88 | 88 | 88 | 88 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 89 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 |
| | | (65°C) | Q | 22 | 25 | 29 | 33 | 36 | 42 | 48 | 45 | 50 | 54 | 64 | 73 | 91 | 110 | 127 | 138 | 156 | 141 | 151 | 182 | 226 |
| Temperatura de servicio | Espesor recomendado pg | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | |
| | | 250°F | 103 | 96 | 97 | 98 | 98 | 94 | 95 | 95 | 96 | 96 | 97 | 94 | 94 | 95 | 95 | 95 | 93 | 93 | 93 | 93 | 93 | 94 |
| | | (121°C) | Q | 57 | 55 | 62 | 71 | 77 | 77 | 87 | 98 | 108 | 116 | 136 | 135 | 166 | 197 | 227 | 246 | 242 | 265 | 290 | 342 | 416 |

Convenciones: Ts=Temperatura superficial

Q =Pérdidas de calor, BTU/h*m

ϵ = Emisividad (0,2 con acabado metálico brillante)

Fuente: FIBERGLASS Colombia S. A.

Como el diámetro de la tubería es de una pulgada (1”) y la temperatura de trabajo máxima es de 100°C, entonces tenemos que el espesor mínimo recomendado para aislar la tubería es de una pulgada y media (1.5”).

En la siguiente figura, se puede apreciar el tipo de fibra a utilizar.

²⁵ Según clasificación de FIBERGLASS COLOMBIA S. A. – Aislamiento de tuberías.

CAÑUELA AMPLIO RANGO

DESCRIPCIÓN

Lána de vidrio rígida, preformada en forma de medias cañas para aislar tuberías calientes y frías, con temperaturas hasta 454°C (850°F) y con diámetro nominal desde ½" hasta 12".

Disponibile con y sin laminado de foil de aluminio FRK.

USO

Para aislar sistemas de tuberías, incluyendo las de transporte de vapor, calefacción, enfriamiento, agua para uso doméstico caliente, fría, sistemas sanitarios y tuberías especializadas en plantas de potencia y procesos industriales.

DIMENSIONES

Diámetro: Desde ½" "hasta 12" en espesores de aislamiento desde 1" a 3".

Para especificar mayores espesores, diferentes a los nominales: Hasta 4", se puede usar 1 ó varias capas anidadas.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Conductividad térmica

0,035 W/°C.m². Valor típico (0,24 BTU.in/h.°f.ft²) a 75°F ASTM C518.

Temperatura máxima de aplicación

hasta 454 °C(850 °F) ASTM C411

Características de quemado superficial

Sin recubrimiento: FS/SD = 25/50
Con foil expuesto: FS/SD = 5/0

ABSORCIÓN DE LA HUMEDAD

Máximo 0,2% en volumen en 96 horas a 49°C (120°F) y 95% de humedad relativa.

EMPAQUE

Tapas de cartón con termoencogible



Figura 61. Fibra de vidrio tipo cañuela amplio rango.

Fuente: Catalogo FIBERGLASS.

5.3.2 Aislamiento del Destilador.

Para el destilador se seleccionó fibra de vidrio tipo Lana AW,²⁶ con espesor de una pulgada (2"), según recomendaciones del fabricante.

²⁶ Según clasificación de FIBERGLASS COLOMBIA S. A. – Aislamiento de Equipos.

Tabla 45. Espesores recomendados de fibra de vidrio tipo Lana AW.

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

Cálculos realizados para: Velocidad de viento = 0
 Emisividad Exterior = 0,2
 Temperatura ambiente = 86°F (30°C)

Ts = Temperatura superficial en °F

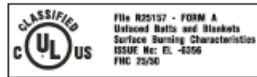
Q = Pérdidas de calor en BTU/h*ft²

Fuente: FIBERGLASS Colombia S. A.



Figura 62. Fibra de vidrio tipo lana AW.

Fuente: Catalogo FIBERGLASS.



DESCRIPCION

La Lana AW de FiberGlass es un aislamiento térmico fabricado con lanas de fibra de vidrio inorgánicas y elásticas, aglomeradas con resina termo-resistente. Su elasticidad garantiza llenar completamente todos los espacios con el aislamiento, asegurando alta eficiencia en el funcionamiento de los equipos.

USO

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

DIMENSIONES

Largo: 600 " Ancho: 48 " Espesores: 1", 1.5 " y 2 " .

EMPAQUE

1 Rollo en polietileno termoencogible.

ESPECIFICACIONES TECNICAS

| | | |
|--|----------------------------------|--|
| Conductividad térmica | Temperatura máxima de aplicación | Características de quemado superficial |
| 0,039 W/°C.m² Valor típico (0,27 BTU. in./hr. °F. ft²) | 540 °C (1000 °F) | ASMT E 84 FS/SD 25/50. |

Figura 63. Características de la fibra de vidrio tipo lana AW.

Fuente: Catálogo FIBERGLASS.

5.4 SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA.

El agua de alimentación de la caldera debe estar libre de impurezas y con el pH adecuado para el correcto funcionamiento de la caldera, por tal razón es que se hace necesario el uso de un suavizador para el agua de alimentación.

Lo que se busca al utilizar un suavizador es mejorar la calidad del agua en lo que tiene que ver con el control de dureza, control de sílice, la alcalinidad, el pH, sólidos disueltos totales, la materia orgánica y los gases disueltos.

5.4.1 Control de la dureza del agua.

La dureza se compone de calcio y magnesio. La dureza en las aguas naturales variará considerablemente, dependiendo de la fuente de donde se obtenga el agua. Las secciones del país que tienen formaciones de piedra caliza generalmente tienen un alto contenido de dureza en el agua. Dado que las aguas superficiales son diluidas por las lluvias, el agua de pozo en la misma área

normalmente tendrá una dureza mucho más alta que la del agua superficial, dado que el flujo es subterráneo sobre capas de rocas.

Nunca debe suponerse el grado de dureza en una ubicación dada. Deben hacerse todos los esfuerzos posibles para obtener un análisis del agua en el sitio de la instalación. Esto garantizará la precisión en el proceso de selección.

Estos minerales no son deseados en la operación de las calderas ya que crean escamas, incrustaciones y corrosión sobre la superficie de la caldera, lo cual afectaría su correcto funcionamiento.

A continuación, se muestra la clasificación de la dureza según la ASTM (*American Society For Test And Materials*):

Tabla 46. Clasificación de dureza del agua.

| RANGO | CLASIFICACIÓN |
|--------------|----------------------|
| 1-60 ppm | Suave |
| 61-120 ppm | Moderadamente Dura |
| 121-180 ppm | Dura |
| >180 ppm | Muy Dura |

Fuente: Rodríguez G, Gonzalo. Operación de calderas industriales, Ecoe Ediciones, Bogotá, abril de 2000.

5.4.2 Cálculos para la selección del suavizador

Con el fin de seleccionar un suavizador adecuado, se tienen en cuenta diferentes aspectos; tales como el análisis del agua, la potencia de la caldera en HP y el volumen de reposición de agua.

Como primera medida, en el proceso de selección, se determina la cantidad de dureza del agua, la cual se expresada comúnmente en los reportes de análisis de agua en partes por millón (PPM) y deben ser pasarse a granos por galón (GPG), cuando se trabaje con sistema inglés, con el fin de poder seleccionar el tamaño de

un sistema suavizador. Para pasar de PPM a GPG, se debe dividir PPM entre 17,1.

Determinación del volumen de agua de reposición: La cantidad máxima de agua de reposición, se puede determinar con base en la potencia de la caldera; teniendo que para un caballo de fuerza, HP, se necesita un volumen de agua de alimentación de 16 L/h (4.25 gal/h). La capacidad de la caldera se da en kg/h (lb/h) de vapor y, para convertir a caballos de fuerza, HP, se debe dividir entre 15,7 y 34,5, respectivamente.

El vapor durante el proceso está en contacto con el aceite esencial y, debido a esto el ciclo del agua de la caldera es abierto, lo cual quiere decir que no habrá retornos de condensados hacia la caldera y que se necesita un volumen de agua de reposición del 100%.

Horas de trabajo de la caldera: El tiempo por proceso de extracción es de aproximadamente 40 min y el tiempo estimado para el cargue y descargue del material vegetal es de otros cuarenta minutos, por lo que en una jornada de 8 horas la caldera funcionará sólo cuatro horas.

Dureza del agua: El dato sobre la dureza del agua fue consultado a la Empresa Pública de Aipe EPA S. A. ESP la cual es la encargada de prestar el servicio de acueducto en el municipio de Aipe, y la cual corresponde a 44 ppm.

$$44 \text{ ppm} \div 17.1 = 2.5731 \text{ GPG}$$

HP de la caldera: La capacidad de la caldera es de 882 Lb/h de vapor, y los requerimientos de diseño son de 206,58 Lb/h de vapor; como la caldera sólo se va a utilizar para este proceso, y nos permite ocho niveles de graduación del flujo de

vapor, se decidió operarla en el segundo nivel obteniendo una capacidad de 259 Lb/h de vapor; con este valor se realizan los cálculos de HP.

$$117,73 \text{ kg/h (259 lb/h)} \div 15.7 (34.5) = 7,5 \text{ HP}$$

Flujo máximo de agua de relleno en L/h (Gal/h): Tomando la capacidad de la caldera de 7,5 HP, se determina el flujo de agua de relleno en L/h y gal/h.

$$7.5 \text{ HP} \times 16 = 120 \text{ L/h}$$

$$7.5 \text{ HP} \times 4.25 = 31,88 \text{ gal/h}$$

Como no se tiene agua de retorno, debido a que el sistema es abierto, el requerimiento neto de agua de relleno es de 120 L/h (31,88 gal/h).

Requerimiento total diario de agua de relleno: La caldera operara cuatro horas diarias y el requerimiento neto de agua de relleno es de 120 L/h (31,88 gal/h), entonces tenemos que el requerimiento diario de agua de relleno es:

$$120 \text{ L/h} \times 4 \text{ h} = 480 \text{ L}$$

$$31,88 \text{ gal/h} \times 4 \text{ h} = 127,52 \text{ gal}$$

Cálculo de los gramos como CaCO₃ (o granos) de dureza totales que deberán ser removidos diariamente. Para el cálculo de los gramos o granos de CaCO₃, se toma el requerimiento total diario de agua de relleno y se multiplica por la dureza del agua.

$$\text{Agua de reposición} = 480 \text{ L/día (127,52 gal/día)}$$

$$\text{Dureza: } 44 \text{ ppm} = 44 \text{ mg/lit} = 0.044 \text{ g/lit} = 2.5731 \text{ GPG}$$

- Gramos de CaCO₃ = 480 L/día x 0.044 gr/L = 21,12 gr de dureza seca a ser removidos diariamente.

- Granos de $\text{CaCO}_3 = 127,52 \text{ gal/día} \times 2.5731 \text{ GPG} = 328,12$ granos de dureza seca a ser removidos diariamente.

Con el fin de ser conservativos y de garantizar que la caldera tenga un agua de alimentación suave se aplica un factor de seguridad del 15%:

$21,12 \text{ g (328,12 granos)} \times 1.15 = 24,3 \text{ g (377,34 granos)}$ de dureza seca a ser removidos diariamente.

5.4.3 Selección del suavizador

Con los cálculos que se obtuvieron en la Sección anterior, se le solicitó al ingeniero William Larrota Picón, quien es profesor de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, cotizará el equipo suavizador, ya que él es una persona con una amplia experiencia en la fabricación de sistemas de tratamiento de aguas para equipos industriales y quien fabricó el suavizador que se encuentra instalado en la planta piloto del CENIVAM.

Especificaciones del sistema suavizador

- Suavizador en PVC tipo pesado, en dos columnas de 5" de diámetro y 1,20 m de altura.
- Resina catiónica *Lewatit S 100*.
- Capacidad de la resina de $30000 \text{ granos/ft}^3$.
- Volumen del suavizador de 1 ft^3 .
- Capacidad en tiempo²⁷ de 91,4 días.
- Estructura en acero al carbono con pintura electrostática.

²⁷ Cumplido este tiempo se debe hacer una regeneración de la resina, agregando 15 kg de sal aproximadamente.

- Pre-filtro de cartucho y coraza transparente de 10" (10 micras).



Figura 64. Tipo de sistema de suavizador a utilizar

Fuente: CENIVAM. Planta piloto.

5.4.4 Control de sílice

La sílice forma en las superficies de la caldera escamas duras, para controlar el efecto de la sílice presente en el agua sobre la caldera es necesario realizar purgas continuas al sistema, esto evita que se formen estas incrustaciones.

5.4.5 pH y Alcalinidad

La alcalinidad de un agua es debida al contenido de sales del ácido carbónico (bicarbonatos, carbonatos) e hidróxidos, es una medida o indicación de los componentes básicos del agua. La alcalinidad de las aguas naturales suele deberse a los carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio y potasio y en algunos casos también se debe en pequeño grado a boratos, silicatos y fosfatos. El bicarbonato es el componente que más contribuye a la alcalinidad. La importancia de la alcalinidad es significativa en los fenómenos de coagulación y

ablandamiento, así como en la prevención de la corrosión. La alcalinidad da un índice de la resistencia del agua a bajar su pH cuando se le añade ácido.

El pH es una medida de la acidez de una sustancia, el rango de medida del pH va desde 0 a 14 siendo una sustancia acida de 1 a 7 y de 7 a 14 básica. En las calderas es conveniente tener un agua por encima de 7, ya que el ácido tiende a ser corrosivo para las superficies de la misma, por lo que al garantizar la alcalinidad del agua se asegura que el pH no baje 7 y éste en el rango básico.

5.5 TORRE DE ENFRIAMIENTO

El agua que se utiliza en el intercambiador de calor como líquido refrigerante gana temperatura a través del proceso; por lo que se hace necesario retirarle el calor ganado, mediante el uso de una torre de enfriamiento, obteniendo así un sistema que opera a flujo constante en un circuito cerrado.

El enfriamiento del agua caliente proveniente del condensador, se logra al hacerla pasar (dispersa en gotas finas) en contracorriente con un caudal de aire frío, aumentando el tiempo de contacto directo entre los mismos mediante un relleno de plástico multicelda de PVC, ubicado en la parte media de la torre de enfriamiento, aumentando el tiempo de residencia y el área de contacto, logrando la reducción de la temperatura del agua a medida que descende y quedando lista para ser bombeada nuevamente hacia el condensador.

5.5.1 Definición y clasificación de las torres de enfriamiento²⁸

Una torre de enfriamiento es una máquina capaz de enfriar grandes volúmenes de agua, poniéndola en contacto con aire atmosférico. Un pequeño porcentaje del

²⁸ www.airetecnica.com.co/PDF%B4s/TAYCOPANO.pdf , Enero 09 de 2009

agua es evaporado, expulsando consigo el calor a la atmósfera, como aire caliente y húmedo. La temperatura del agua desciende hacia el límite llamado **temperatura húmeda**, designada en inglés **WBT**, y en español, **TH**.

Existen varios tipos de torres: las primeras fueron las "atmosféricas", voluminosas y de bajo rendimiento, desprovistas de ventilador o motor. Las de tiro mecánico, provistas de ventiladores y motores, son las más comunes, y pueden ser de **TIRO FORZADO** (con ventiladores inyectando aire en su parte baja), o de **TIRO INDUCIDO** (con los ventiladores expulsando aire en su parte alta). Las hiperbólicas, de tamaño gigantesco, se han usado en plantas de energía nuclear.

En cuanto a conformación interna, las torres pueden ser de **FLUJO CRUZADO**, las más comunes en el pasado, y de **CONTRAFLUJO**. Las torres de **FLUJO CRUZADO y TIRO INDUCIDO**, tradicionalmente han sido construidas con estructura y evaporadores de madera, y utilizan riego por gravedad. Su ventaja principal es la menor presión estática del aire y del agua y el consiguiente ahorro de energía, importante en tamaños grandes. El agua fluye diagonalmente hacia abajo, y el aire en dirección horizontal, del exterior hacia el interior de la torre.

Ventajas: uso más eficiente del aire, mejor aspersion con sistema de boquillas a presión, menor exposición de sus elementos internos al sol con menos problemas de algas, etc. Es hoy en día el tipo de torre que más se está fabricando a nivel mundial.

Las torres de **TIRO FORZADO**, operan en contraflujo. Inicialmente las más populares y sencillas, se usan hoy solamente en aplicaciones especiales, en pequeños y medianos tamaños, especialmente para aire acondicionado, o en sitios donde es indispensable el montaje en el interior de un edificio, con ductos para la descarga del aire húmedo. Tiene la ventaja de que los ventiladores mueven aire seco, y son generalmente más accesibles para mantenimiento. Su

principal desventaja es la baja velocidad de descarga del aire húmedo, que se presta a **RECIRCULACIÓN**.

Otra desventaja inherente al **TIRO FORZADO** es el ensuciamiento o incrustación de las aletas de los ventiladores, al entrar en contacto con el aire, usualmente cargado de impurezas. En cambio, en el **TIRO INDUCIDO**, el aire entra primero en contacto con el agua, que ejerce un efecto de lavado, manteniendo las aletas limpias.

5.5.2 Selección de la torre de enfriamiento

Se optó por una torre de enfriamiento modelo PP 40 S de Industrias Proton LTDA, la cual satisface los requerimientos de diseño.

Tabla 47. Condiciones de Operación

| CONDICIONES DE OPERACIÓN | | |
|----------------------------------|------------------------|--------------------|
| Caudal de agua | 4 m ³ /hora | 17,6 GPM |
| Temperatura de entrada del agua. | 45°C | 113°F |
| Temperatura de salida del agua. | 30°C | 86°F |
| Temperatura de bulbo húmedo. | 26°C | 78,8°C |
| Rango de enfriamiento. | 15°C | 27°F |
| Aproximación. | 4°C | 7,2°F |
| Potencia térmica efectiva | 60000 kcal/h | 238080Btu/h; 19 TR |

Fuente: Cotización Industrias PROTON LTDA. Enero 16 de 2009.

Características de la torre:

Modelo: PP 40 S.

Descripción general: Torre de tiro inducido en contraflujo, marca PROTON, en poliéster reforzado con fibra de vidrio, relleno tipo fílmico multicelda, diseñadas bajo parámetros del CTI (*COOLING TOWER INSTITUTE*) .

Construcción: Estructura en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) según normas ASTM C-582 e INCONTEC 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 y Alto 3200 mm.

Peso aproximado: 0.3 Ton en vacío
0.6 Ton en operación

Relleno: Plástico multicelda de P.V.C. modular, fácilmente desmontable para mantenimiento, auto-extinguible, origen EE.UU.

Eliminador de gota: En PVC para alta temperatura, tipo celular de tres (3) pasos, modular, fácilmente desmontable para mantenimiento y limpieza, auto-extinguible, origen EE.UU.

Ventilador: Uno axial modelo VA-600, balanceado dinámicamente, con bajo nivel de ruido, acoplado directamente al motor.

Motor: Uno de 1 HP 3x220/440V. 60 Hz, con aislamiento especial de bobinados, sello entre los escudos y la carcasa así como entre la caja de conexiones y el motor, adecuado para operar en ambientes húmedos. El motor es a prueba de explosión y 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. (10 psi.)

Tanque: Incluido de 250 L de capacidad útiles en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Costo: \$5'260.000 + IVA = \$6'101.600; este valor es puesto en las instalaciones de Industrias Proton en Bogotá.

5.6 DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

5.6.1 Conceptos básicos²⁹

La distribución en planta hace relación a la ordenación física de los elementos industriales. Esta ordenación, debe incluir, tanto los espacios necesarios para el movimiento de materiales o materia prima, almacenamiento, trabajadores indirectos y todas las otras actividades o servicios, así como el equipo de trabajo y el personal de taller.

Su objetivo primordial es el de hallar una ordenación de las áreas de trabajo y del equipo, que sea la más económica para el trabajo, al mismo tiempo más segura y satisfactoria para los empleados.

Otros de los objetivos que debe lograr la distribución en planta son:

- La reducción del riesgo para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores;
- La elevación de la moral y satisfacción del obrero;
- El incremento de la producción;
- La disminución en los retrasos de la producción;

²⁹ <http://www.mitecnologico.com/Main/DefinicionDeDistribucionDePlanta>

- El ahorro de área ocupada;
- La reducción del material en proceso;
- El acortamiento del tiempo de fabricación;
- La disminución de la congestión o confusión;
- Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.

Una buena distribución en planta debe cumplir con seis principios los cuales se listan a continuación:

- Principio de la Integración de conjunto. La mejor distribución es la que integra las actividades auxiliares, así como cualquier otro factor, de modo que resulte el compromiso mejor entre todas las partes;
- Principio de la mínima distancia recorrida a igual de condiciones. Es siempre mejor la distribución que permite que la distancia a recorrer por el material entre operaciones sea más corta;
- Principio de la circulación o flujo de materiales. En igualdad de condiciones, es mejor aquella distribución o proceso que este en el mismo orden a secuencia en que se transforma, tratan o montan los materiales;
- Principio de espacio cúbico. La economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto vertical como horizontal;
- Principio de la satisfacción y de la seguridad. A igual de condiciones, será siempre más efectiva la distribución que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los productores;
- Principio de la flexibilidad. A igual de condiciones, siempre será más efectiva la distribución que pueda ser ajustada o reordenada con menos costo o inconvenientes.

Tipos de distribución de planta

Fundamentalmente, existen siete sistemas de distribución en planta:

1. Movimiento de material: Probablemente el elemento más comúnmente movido. El material se mueve de un lugar de trabajo a otro, de una operación a la siguiente.
2. Movimiento del hombre: Los operarios se mueven de un lugar de trabajo al siguiente, llevando a cabo las operaciones necesarias sobre cada pieza.
3. Movimiento de maquinaria: El trabajador mueve diversas herramientas o máquinas dentro de un área de trabajo para actuar sobre una pieza grande.
4. Movimiento de material y de hombres: El hombre se mueve con el material llevando a cabo una cierta operación en cada máquina o lugar de trabajo.
5. Movimiento de material y de maquinaria: Los materiales y la maquinaria o herramientas van hacia los hombres que llevan a cabo la operación. Raramente práctico, excepto en lugares de trabajo individuales.
6. Movimiento de hombres y de maquinaria: Los trabajadores se mueven con la herramienta y el equipo generalmente alrededor de una gran pieza fija.
7. Movimiento de materiales, hombres y maquinaria: Generalmente es demasiado caro e innecesario el mover los tres elementos.

Existen otros cuatro tipos clásicos de distribución, que son:

- 1) Distribución por posición fija: Se trata de una distribución en la que el material o el componente permanecen en lugar fijo. Todas las herramientas, maquinaria, hombres y otras piezas del material concurren a ella.
- 2) Distribución por proceso o por Fusión: En ella todas las operaciones del mismo proceso están agrupadas.

- 3) Distribución por producción en cadena, en línea o por producto: En esta, producto o tipo de producto se realiza en un área, pero al contrario de la distribución fija. El material está en movimiento.
- 4) Distribución por grupo o por células de fabricación: La distribución por células de fabricación consiste en la agrupación de las distintas máquinas dentro de diferentes centros de trabajo, denominadas celdas o células, donde se realizan operaciones sobre múltiples productos con formas y procesos similares.

5.6.2 Determinación de la distribución en planta

Para la determinación de la distribución de las distintas áreas de trabajo y de los equipos, se tuvieron en cuenta los requerimientos del proceso, zonas de circulación de materiales y de personal, y el bienestar del personal involucrado en el proceso.

En el análisis del proceso de extracción del aceite esencial se identificaron los siguientes pasos, los cuales se tuvieron en cuenta a la hora de definir las áreas de trabajo:

- Acopio del material vegetal;
- Preparación del material vegetal;
- Cargue del material vegetal picado en el destilador;
- Proceso de extracción del aceite esencial contenido en el material vegetal;
- Recolección del aceite esencial extraído;
- Descargue del destilador.

De igual manera, fueron tenidos en cuenta el espacio de circulación del personal alrededor de las áreas de trabajo y de cada uno de los equipos, las condiciones mínimas de seguridad para su operación y su tamaño.

La distribución espacial de los equipos se basó en el sistema de distribución “Movimiento de material y de hombres”, ya que los equipos permanecen fijos y el material vegetal y el operador son los que realizan los desplazamientos a cada una de las etapas del proceso de extracción.

A continuación, se ilustra un diagrama de la distribución en planta propuesta:

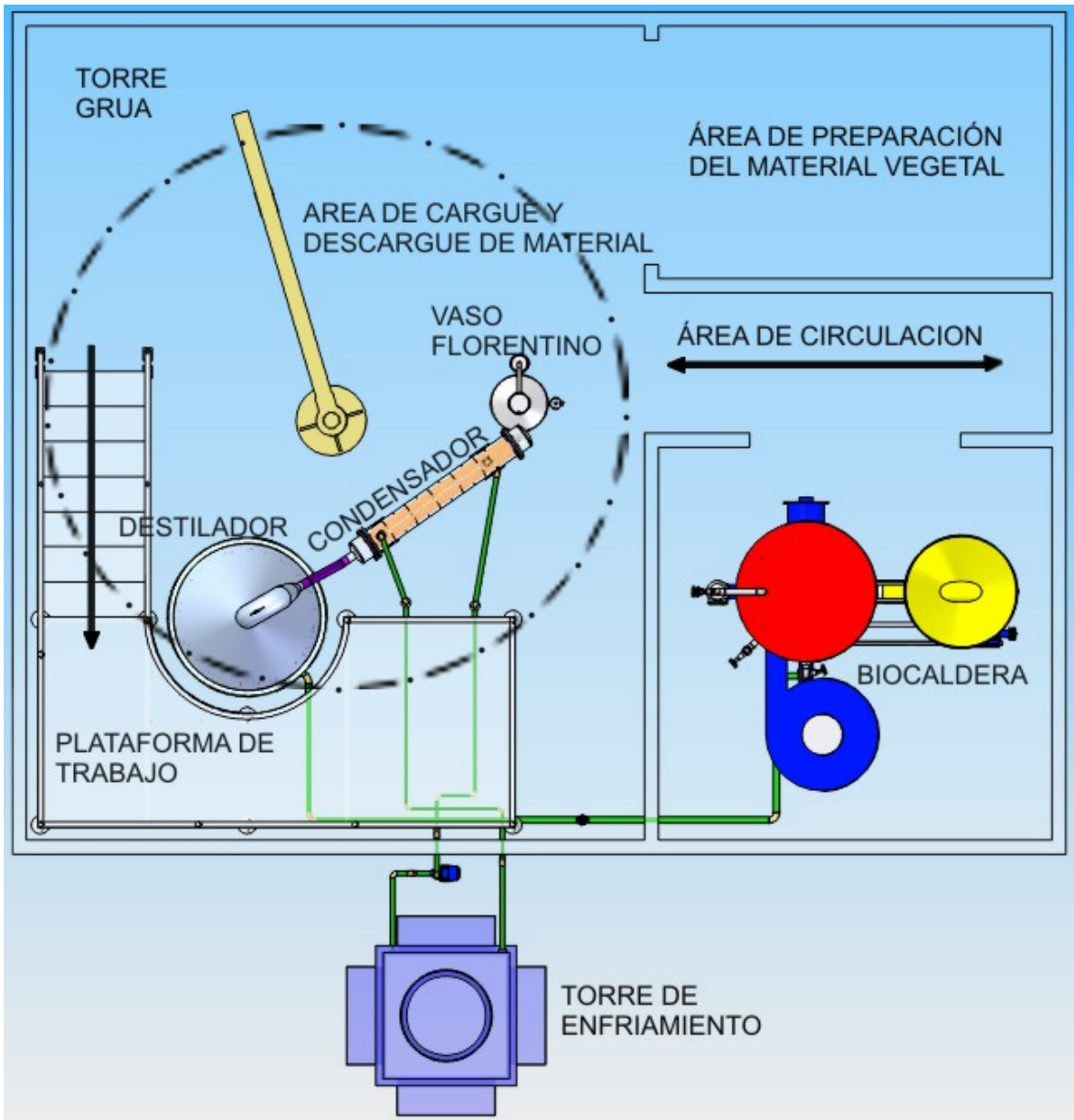


Figura 65. Distribución en Planta Propuesta.

Fuente: Autores del Proyecto

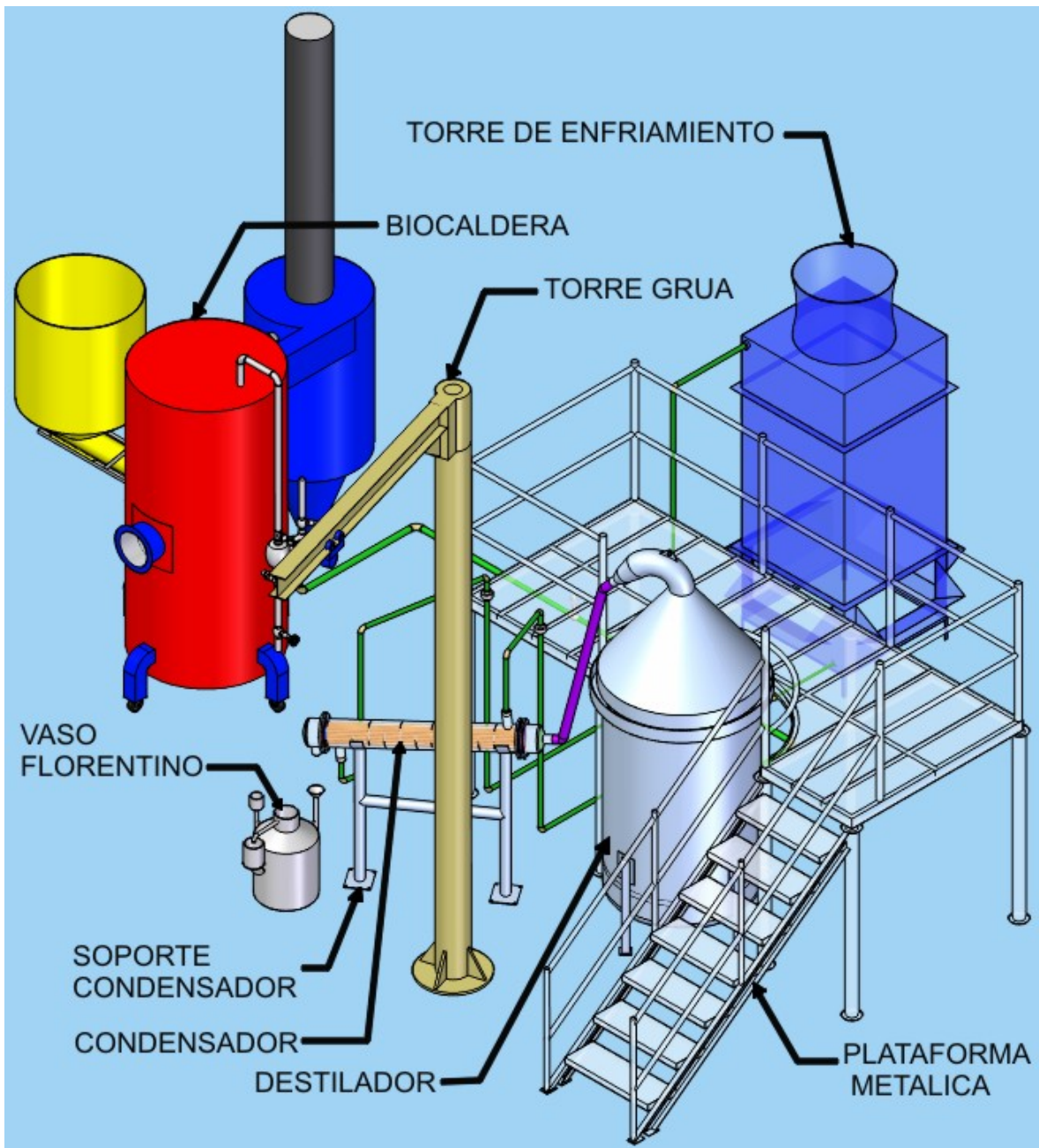


Figura 66. Vista isométrica de la distribución propuesta.
 Fuente: Autores del Proyecto

CONCLUSIONES

- De las pruebas preliminares llevadas a cabo en la planta piloto del CENIVAM, se concluye que el material vegetal debe estar fresco y picado, ya que así se puede obtener un mejor rendimiento; tal y como se pudo apreciar en estas pruebas experimentales.
- El uso de acero inoxidable para la construcción de todos los equipos que entran en contacto con el aceite esencial, mejora su calidad en comparación con la que se obtuvo en las pruebas experimentales realizadas en la planta piloto del CENIVAM.
- El equipo fue diseñado con una capacidad para procesar 300 kg de material vegetal a una densidad de empaquetado de 350 kg/m^3 , pero por la facilidad de utilizar una densidad de empaquetado mayor, obteniendo así un aumento en la capacidad de proceso del destilador.
- La influencia del flujo de vapor sobre el proceso, está relacionada inversamente con el tiempo de proceso; de tal manera que al aumentar o disminuir el flujo de vapor se obtendrá un tiempo de proceso menor o mayor.
- Se realizaron cambios en la forma de hacer el sello del destilador, a un sello de tipo de agua, que es lo que se está utilizando hoy en día en los equipos de las grandes industrias a nivel mundial; con esto se logra una mayor practicidad en el momento de realizar las operaciones de carga y descarga.
- Los diseños de los equipos, están basados en las plantas de extracción a nivel mundial y en las pruebas experimentales que se realizaron en la planta piloto a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado.

RECOMENDACIONES

- Para obtener una reducción en el tiempo de cargue y descargue del destilador, se recomienda el construir otro cartucho, para que mientras se lleva a cabo el proceso el otro cartucho se va cargando de tal manera que al terminar el proceso ya se tiene el otro cartucho cargado y no es más sino reemplazarlo.
- Debido al tamaño de los equipos y el peso del cartucho cargado, se hace necesario diseñar y construir un sistema para la manipulación de carga; así como una plataforma de trabajo que garantice un plano óptimo de trabajo para los operarios de los equipos.
- Con el fin de obtener un ahorro energético y obtener un proceso de extracción más eficiente, se recomienda adquirir y poner en funcionamiento la torre de enfriamiento seleccionada y, aislar la tubería de vapor.
- Para garantizar un correcto funcionamiento de la caldera y evitar una disminución en su operatividad, se recomienda el uso del sistema suavizador de agua seleccionado; hay que tener en cuenta que cada 3 meses aproximadamente se debe hacer un ciclo de regeneración de la resina agregándole 15 kg de sal.
- Se recomienda poner en acción un plan de mantenimiento preventivo en los equipos, con el fin de garantizar la continuidad del proceso evitando paradas inesperadas.

- Cuando la planta dure varios días en *Stand-by*, se requiere que los equipos sean purgados y limpiados al terminar el último proceso de extracción, ya que en el interior quedan residuos de aceite, los cuales se van a oxidar convirtiéndose en un agente contaminante para los siguientes procesos.

- Si se desea operar los equipos a un flujo de condensado mayor a 550 mililitros por minuto, se debe adaptar un sistema de sujeción a la tapa ya que al aumentar el flujo de vapor también se incrementan las pérdidas en el cambio de sección de la tapa, y esa pequeña presión al multiplicarla por el área proyectada de la tapa genera una fuerza de empuje que tiende a levantarla.

- Para futuras pruebas y con el ánimo de seguir experimentando y desarrollando una mejor teoría en la extracción de aceites esenciales, se recomienda a la entrada de vapor del destilador, ubicar un medidor de caudal para obtener un valor más exacto del flujo de vapor y compararlo con el condensado aforado en las probetas a la salida del condensador, reduciendo así la incertidumbre que se genera dentro del destilador.

BIBLIOGRAFÍA

- *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Rules for construction of Pressure Vessels Division 1 y 2. 1968 Edition.*
- BANDONI, Arnaldo. Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores. Argentina: Red de editoriales universitarias, 2000.
- *HEAT EXCHANGER DESIGN HANDBOOK.* T Kuppan. Marcel Dekker, Inc 2000.
- CENGEL Yunus A. BOLES Michael A. Termodinámica. Mc. Graw-Hill 2003.
- II Segundo Congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Octubre 19-21 de 2006.
- *Field distillation for herbaceous oils.* Denny, McKenzie Associates. Tercera edición, Mayo de 2001.
- CRANE. Flujo de Fluidos. En válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill. México. 1998
- LEÓN Estrada, Juan Manuel. Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión. Editorial Inglesa. México. 2001. Figura 81 y Figura 83.
- Normas T.E.M.A. Edición 2001.
- MILLS, Anthony F. transferencia de calor. University of California, Los Angeles. Mc. Graw-Hill/Irwin .1999

- Manual de fórmulas de ingeniería. Rafael García Díaz. Limusa Noriega Editores 2006.

- *Desing of process equipment*. Kanti k. Mahajan. 1979.

- Rodríguez G, Gonzalo. Operación de calderas industriales, Ecoe ediciones, Bogotá, Abril de 2000.

- <http://www.fragrantica.com>

- <http://thales.cica.es>

- <http://www.trocarradiadores.com>

- <http://iqtma.cps.unizar.es>

- <http://www.me.metu.edu.tr/courses/me421/me421mat.html>

- www.airetecnica.com.co/PDF%20B4s/TAYCOPANO.pdf , Enero 09 de 2009

ANEXOS

ANEXO A. TIEMPO DE EXTRACCIÓN HERBÁCEAS MUY ABSORBENTES CON ACEITE SUPERFICIAL

En herbáceas con aceites esenciales muy absorbentes, el tiempo de extracción³⁰ depende de dos parámetros, cuyo valor numérico es específico de cada herbácea. Estos son:

- El **tiempo básico** designado como ***t***, requerido para destilar un parche³¹ 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 $a=\pi*r^2$, ver figura A.1.

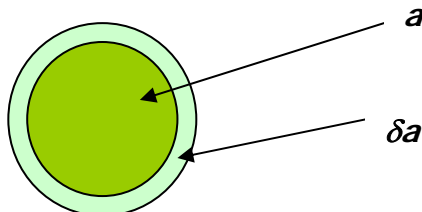


Figura A.1. Parche de aceite y su incremento

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:

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

³⁰ 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.

³¹ El parche es una glándula de aceite que se reventó debido al calor suministrado por el vapor y se deposita sobre la superficie de la herbácea.

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:

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

Para dos cargas de prueba observadas con densidades de empacado 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 formula 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:

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

ANEXO B. ANALISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE SOFTWARE CAE

Para fortalecer el desarrollo del diseño de la planta de extracción de aceites esenciales, se hizo necesario utilizar herramientas tipo CAE (Ingeniería Asistida por Computador), para determinar aquellos esfuerzos en elementos, que por su compleja geometría y la disposición de las fuerzas actuantes se tornan complicados de analizar. La herramienta que se utilizó en este proyecto es ANSYS WORKBENCH 10.0, el cual realiza simulaciones basados en elementos finitos.

B.1 FONDO DEL CARTUCHO

En la figura B1 se aprecia las condiciones a la cual está sometido el fondo del cartucho, para generar la simulación se tiene que:

- El peso del material vegetal es de (5000N) y se ejerce sobre la parrilla de fondo.
- El cartucho se apoya fijamente sobre su base de fondo formada por una brida en ángulo de $1 \frac{1}{4}'' \times 1 \frac{1}{4}'' \times \frac{1}{4}''$. En la simulación no se tiene en cuenta la lámina perforada debido a la complejidad de análisis por parte del software.

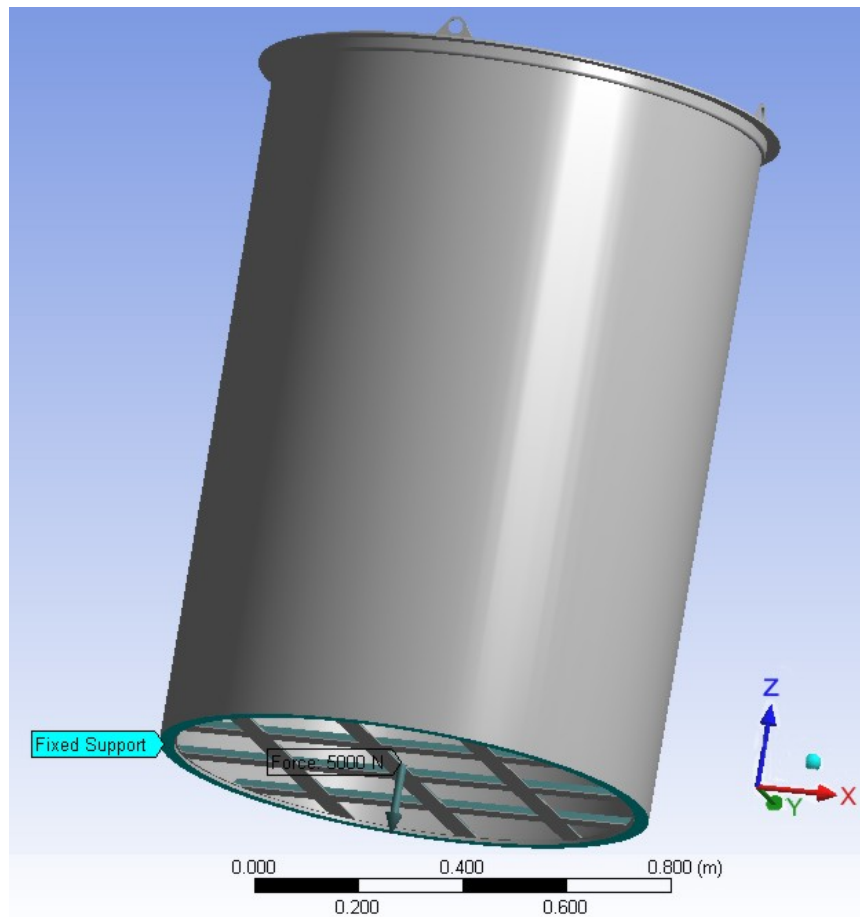


Figura B 1. Condiciones de carga en fondo del cartucho.

En la figura B2 se puede observar los esfuerzos generados por las condiciones de carga. El esfuerzo máximo obtenido en el análisis del software es de $3,9 \times 10^7$ Pa, el cual está por debajo del máximo esfuerzo permisible del material y se localiza en los extremos de los ángulos centrales de la parrilla. Los análisis de esfuerzos se tomaron según el criterio de Von Mises.

La figura B3 muestra la deformación sufrida en el cartucho debido a las fuerzas actuantes, se puede observar que la máxima deformación tiene un valor de 0,484 mm y esta ubicado en el centro de la parrilla del cartucho.

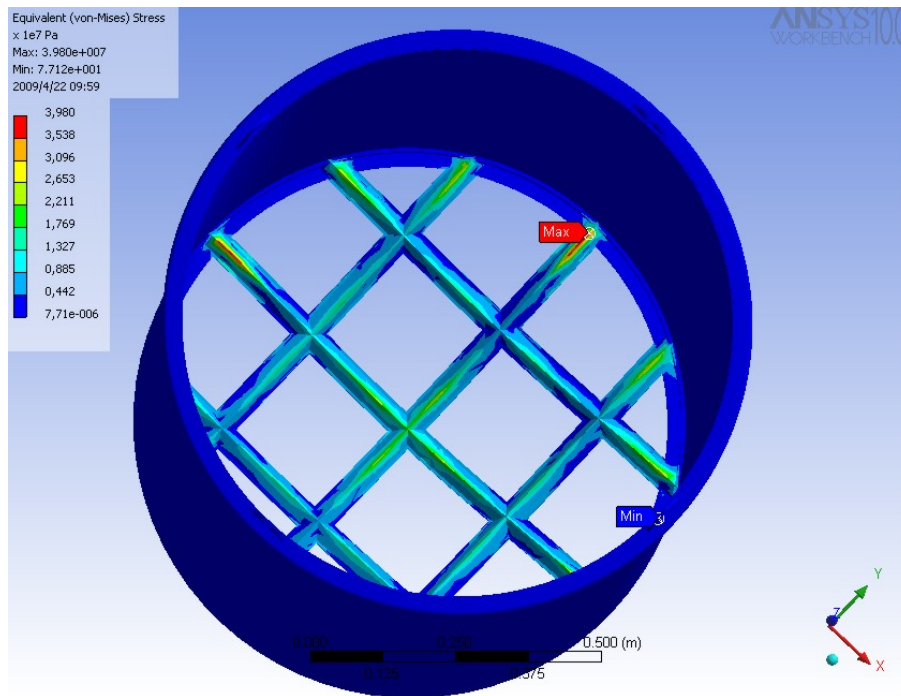


Figura B 2. Esfuerzos generados en el fondo del cartucho.

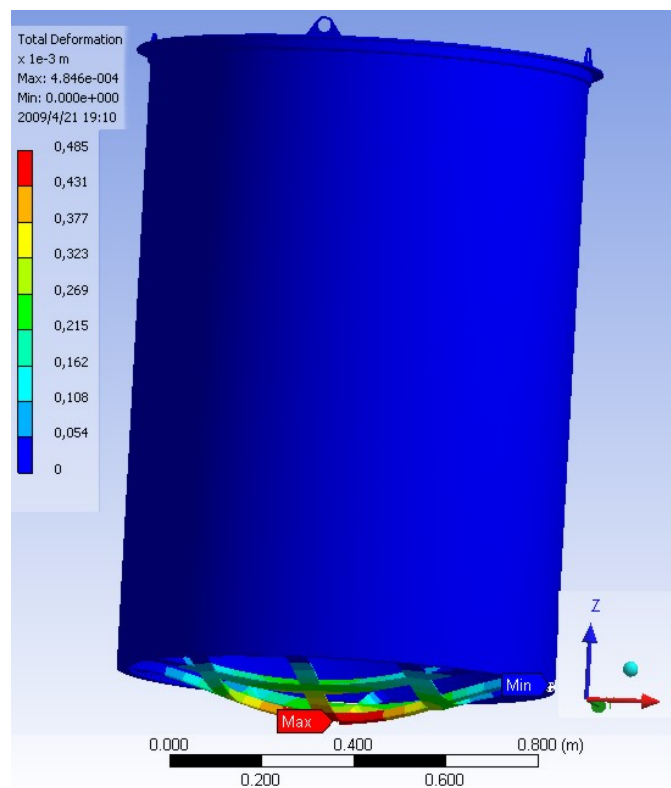


Figura B 3. Deformaciones generadas en el fondo del cartucho.

En la figura B4 se muestra el factor de seguridad del fondo del cartucho, el cual su valor mínimo es de 5,2 ubicado en la zona crítica del cartucho (zona con mayor esfuerzo).

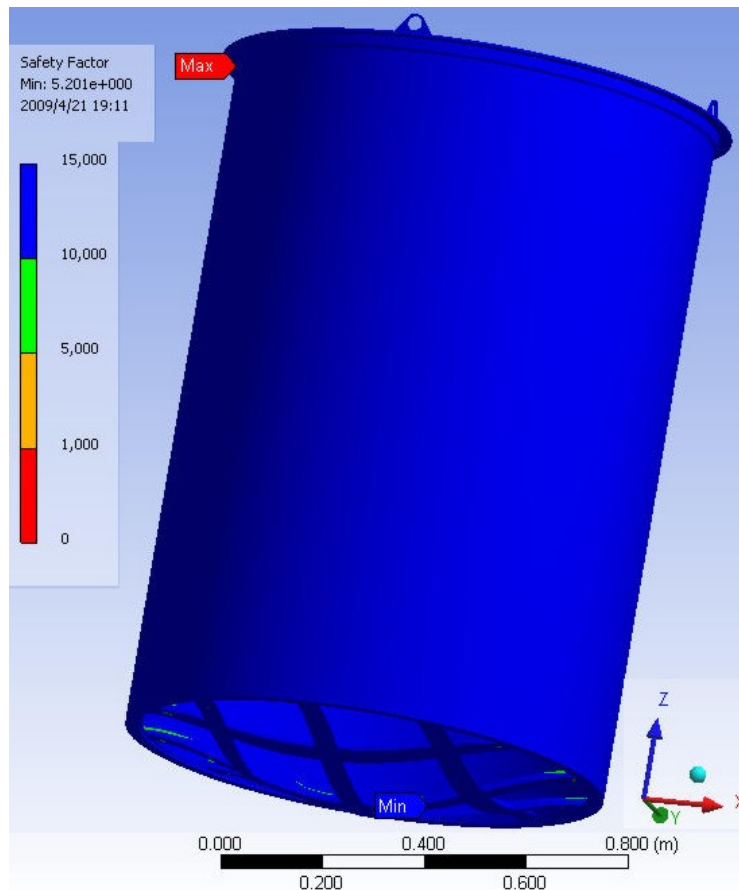


Figura B 4. Factor de seguridad en el fondo del cartucho.

B.2 CUERPO DEL DESTILADOR

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 cuerpo del destilador.

Para la simulación se tomaron las siguientes consideraciones:

- La fuerza que ejerce el peso del material vegetal y el cartucho suman 6160N, y se ubica sobre la cara circunferencial de la brida en ángulo de 1

½" X ¼", que esta soldada en el interior de la pared del cuerpo del destilador.

- La fuerza que ejerce el peso de la tapa del destilador es de 420N, y se ubica sobre la cara circunferencial del canal de agua en el destilador.

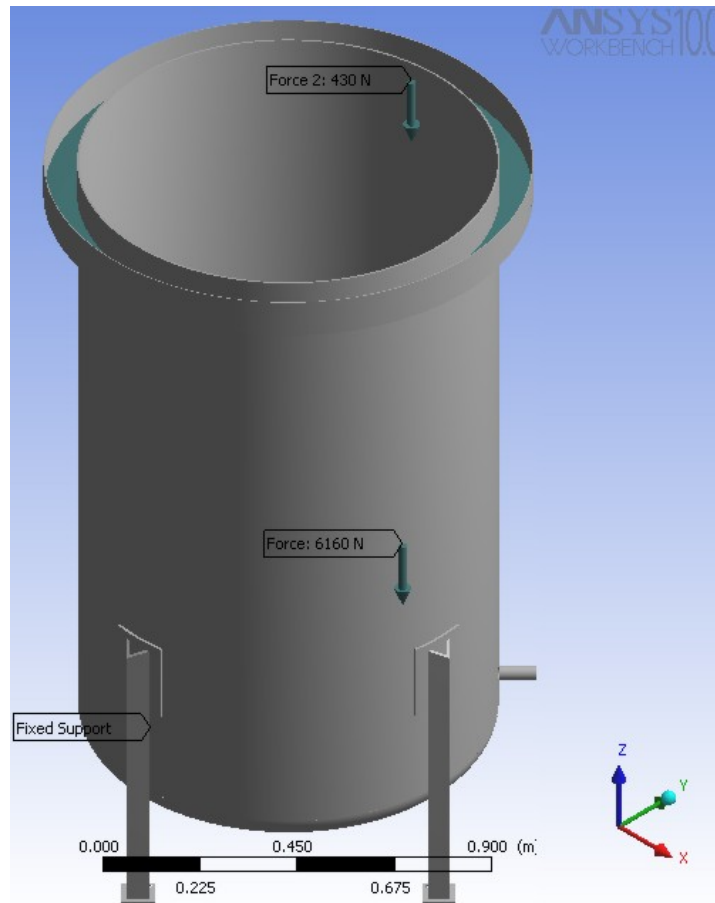


Figura B 5 Condiciones de carga en cuerpo del destilador.

En la figura B6 se aprecian los resultados del análisis, el cual muestra un esfuerzo equivalente máximo igual a $4,7 \times 10^6$ Pa que se encuentra por debajo del esfuerzo máximo permisible del material bajo condiciones de operación. La deformación total del soporte se muestra en la figura B7 con un valor máximo de 0,0172 mm.

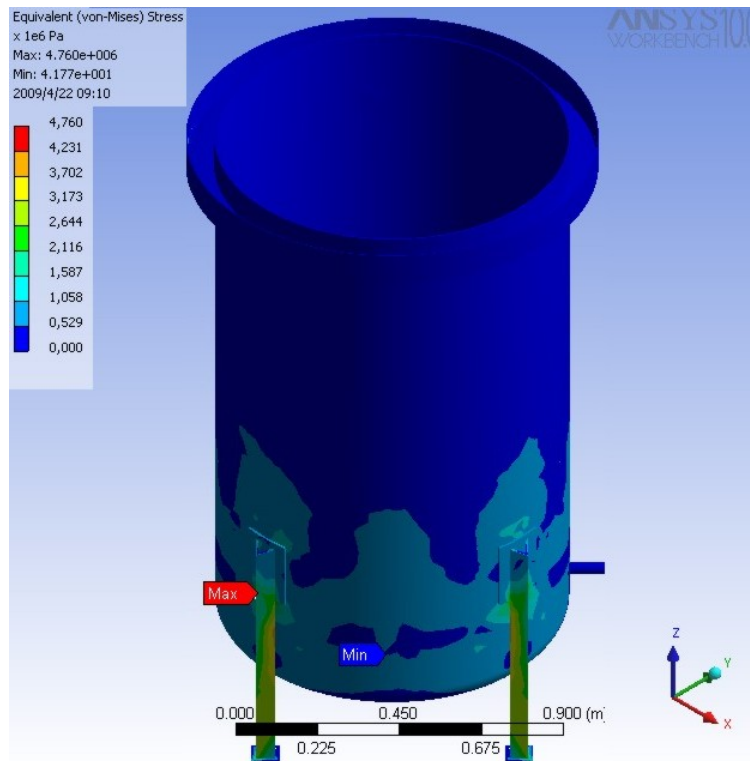


Figura B 6. Esfuerzos generados en el cuerpo del destilador.

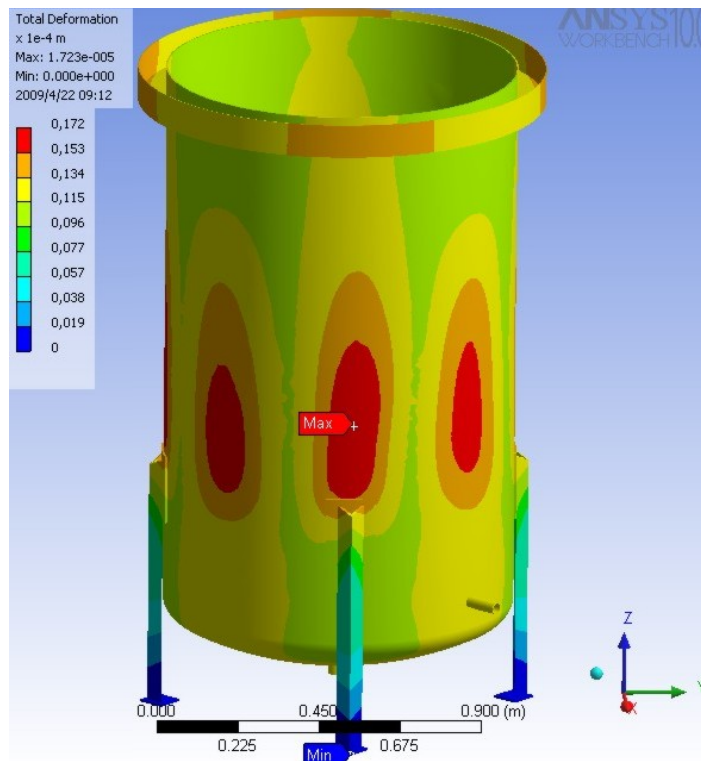


Figura B 7. Deformaciones generadas en el cuerpo del destilador.

El factor de seguridad de este elemento basado en el esfuerzo del limite elástico del material en las condiciones de trabajo es 15 lo que asegura un buen funcionamiento del elemento ver figura B.8.

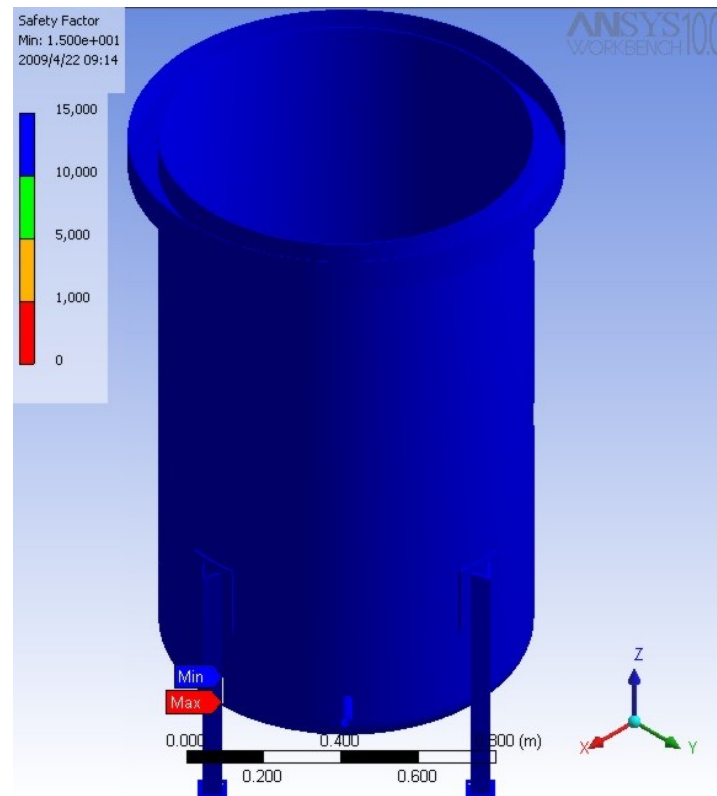


Figura B 8. Factor de seguridad en el cuerpo del destilador.

B.3 OREJA DE SUJECION CARTUCHO

En las figuras B.10 a B.13 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 la oreja de sujeción en el cartucho. Para la simulación se tomaron las siguientes recomendaciones:

- Como el cartucho es izado por medio de 4 orejas soldadas en la brida superior de este, entonces la fuerza sobre cada oreja es igual a 1540N.
- La Fuerza se toma vertical debido a que el cartucho se levanta por medio de una cruceta como se muestra en la figura B9

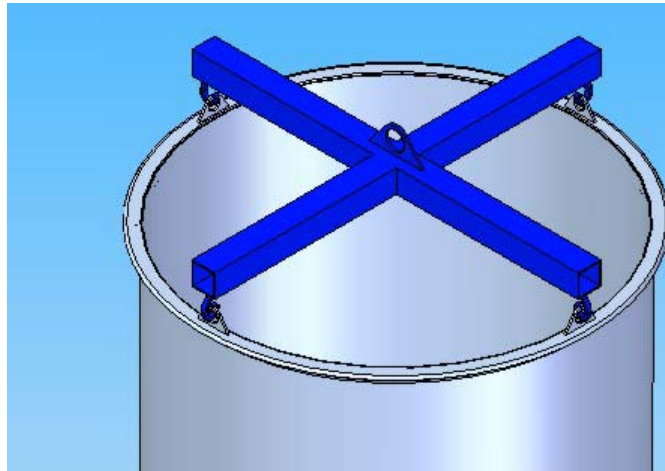


Figura B 9. Mecanismo de levantamiento del cartucho

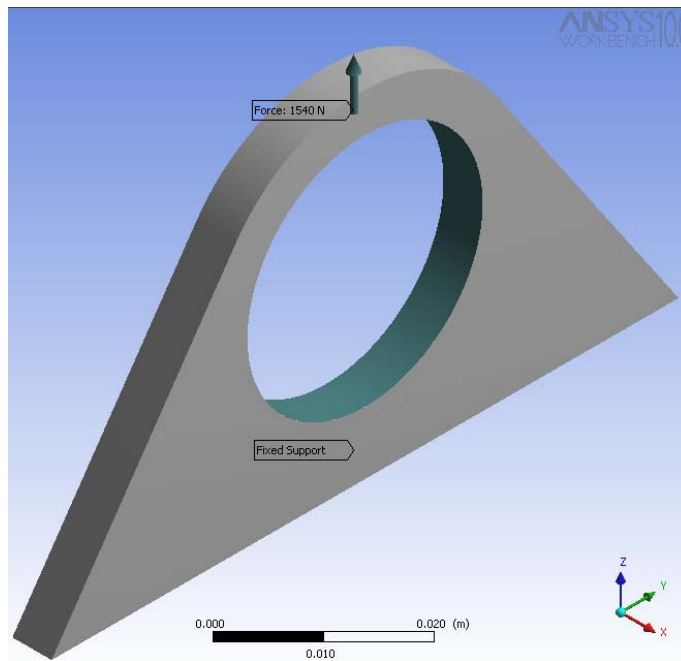


Figura B 10. Condiciones de carga en la oreja del cartucho.

En la figura B10 se aprecian los resultados del análisis, el cual muestra un esfuerzo equivalente máximo igual a $2,31 \times 10^7$ Pa que se encuentra por debajo del esfuerzo máximo permisible del material bajo condiciones de operación. La deformación total del soporte se muestra en la figura B7 con un valor máximo de 0,0383 mm.

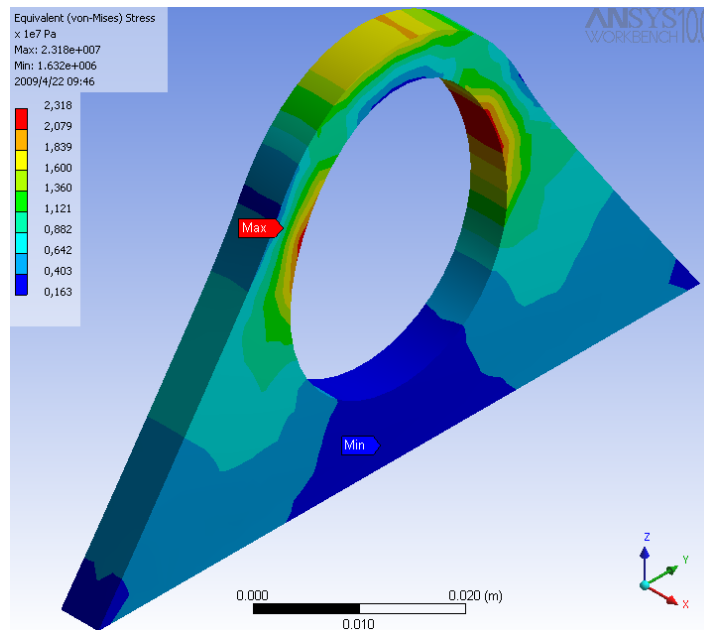


Figura B 11. Esfuerzos generados en la oreja del cartucho.

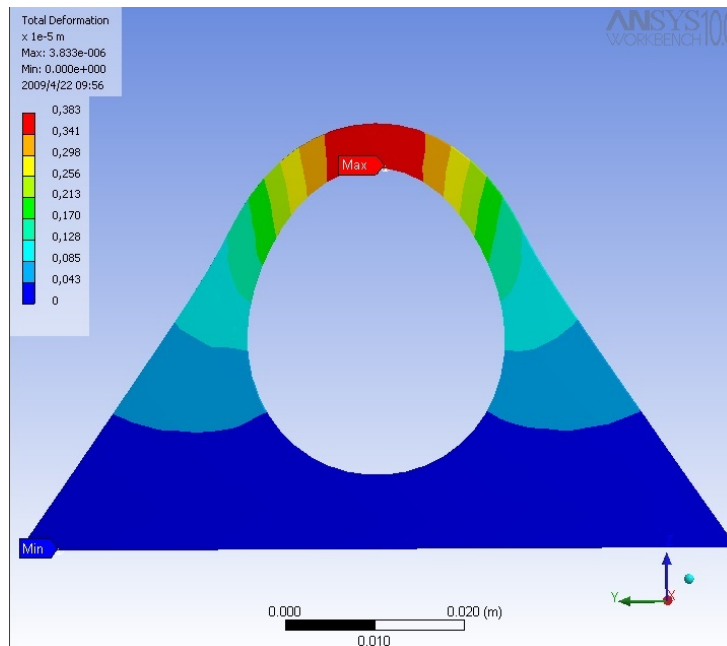


Figura B 12. Deformaciones generadas en la oreja del cartucho.

En la figura B13. Se puede apreciar el mínimo valor para el factor de seguridad el cual es de 8,9 con lo que se asegura el buen funcionamiento del elemento.

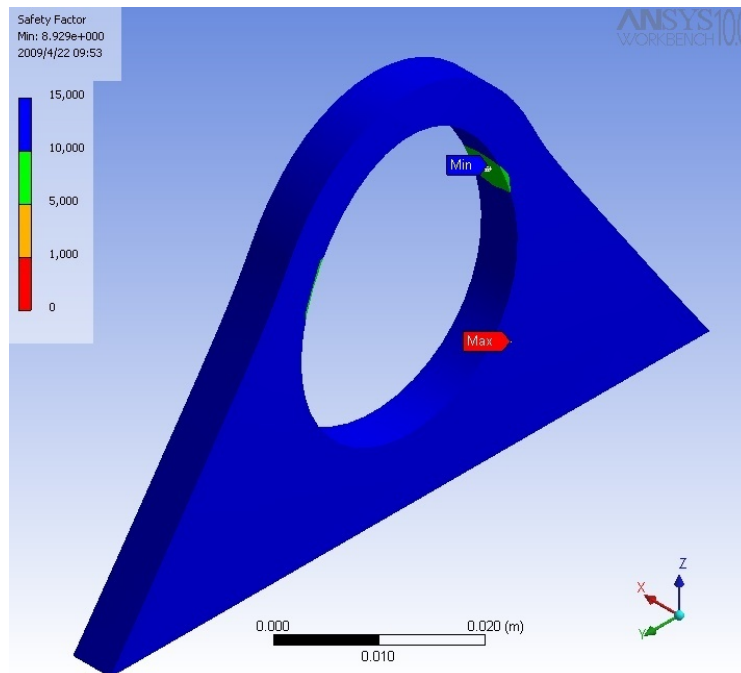


Figura B 13. Factor de seguridad en la oreja del cartucho.

ANEXO C. PROPIADES DE LOS SELLOS O EMPAQUES

| MATERIAL DEL EMPAQUE | FACTOR DE EMPAQUE m | ESFUERO DE Y* | FORMA Y TIPO | REFERIDO A LA FORMA DE CARA | TABLA 2 USE COLUMNA |
|---|------------------------------|---------------|--------------|-----------------------------|---------------------|
| HULE SIN TEJER O UN ALTO PORCENTAJE DE FIBRA DE ASBESTO | CON DUREZA SHORE MENOR DE 75 | 0.50 | 0 | | 1(a,b,c,d) 4,5 |
| | CON DUREZA SHORE 75 Y MAYOR | 1.00 | 200 | | |
| ASBESTO CON UN LIGADO ACEPTABLE PARA LAS CONDICIONES DE OPERACION | 1/8 ESPESOR | 2.00 | 1600 | | |
| | 1/16 ESPESOR | 2.75 | 3700 | | |
| | 1/32 ESPESOR | 3.50 | 6500 | | |
| HULE CON TEJIDO DE ALGODON INSERTADO | 1.25 | 400 | | | |
| HULE CON TEJIDO DE ASBESTO INSERTADO CON O SIN REFUERZO DE ALAMBRE | 3 JUEGOS | 2.26 | 2200 | | |
| | 2 JUEGOS | 2.50 | 2900 | | |
| | 1 JUEGO | 2.75 | 3700 | | |
| FIBRAS VEGETALES | 1.75 | 1100 | | | |
| METAL DEVANADO ESPIRAL CON ACERO AL CARBON ASBESTO ACERO INOX. O MONEL | 2.50 | 2900 | | 1(a,b) | |
| | 3.00 | -4500 | | | |
| METAL CORRUGADO CON ASBESTO INSERTADO O METAL CORRUGADO CON ALMA DE ACERO | ALUMINIO SUAVE | 2.50 | 2900 | | |
| | COBRE SUAVE BRONCE | 2.75 | 3700 | | |
| | HIERRO O ACERO SUAVE | 3.00 | 4500 | | |
| | MONEL O 4-5 % Cr. | 3.25 | 5500 | | |
| | ACERO INOX. | 3.50 | 6500 | | |
| METAL CORRUGADO CON: | ALUMINIO SUAVE | 2.75 | 3700 | | |
| | COBRE SUAVE BRONCE | 3.00 | 4500 | | |
| | HIERRO O ACERO SUAVE | 3.25 | 5500 | | |
| | MONEL O 4-5 % Cr. | 3.50 | 6500 | | |
| | ACEROS INOXIDABLES | 3.75 | 7600 | | |
| METAL PLANO CON ALMA DE ASBESTO | ALUMINIO SUAVE | 3.25 | 5500 | | |
| | COBRE SUAVE O BRONCE | 3.50 | 6500 | | |
| | HIERRO O ACERO SUAVE | 3.75 | 7600 | | |
| | MONEL | 3.50 | 8000 | | |
| | 4-6 % Cr. | 3.75 | 9000 | | |
| | ACEROS INOXIDABLES | 3.75 | 9000 | | |
| METAL RANURADO | ALUMINIO SUAVE | 3.25 | 5500 | | |
| | COBRE SUAVE O BRONCE | 3.50 | 6500 | | |
| | HIERRO O ACERO SUAVE | 3.75 | 7600 | | |
| | MONEL O 4-6 % Cr. | 3.75 | 9000 | | |
| | ACEROS INOXIDABLES | 4.25 | 10100 | | |
| | | | | | |
| METAL SOLIDO DE PLACA | ALUMINIO SUAVE | 4.00 | 8800 | | |
| | COBRE SUAVE O BRONCE | 4.75 | 13000 | | |
| | HIERRO O ACERO SUAVE | 5.50 | 18000 | | |
| | MONEL O 4-6 % Cr. | 6.00 | 21800 | | |
| | ACEROS INOXIDABLES | 6.50 | 26000 | | |
| | | | | | |
| JUNTA REDONDA | HIERRO O ACERO SUAVE | 5.50 | 18000 | | |
| | MONEL O 4-6 % Cr. | 6.00 | 21800 | | |
| | ACEROS INOXIDABLES | 6.50 | 26000 | | |

II

I

ANEXO D. VALORES DE ESFUERZOS PERMITIDOS, UHA 23

Sección VIII Código ASME

Table UHA-23

SECTION VIII - DIVISION 1 PRESSURE VESSELS

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

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

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

ANEXO E. FACTORES GEOMÉTRICOS INVOLUCRADOS EN EL CÁLCULO DE ESFUERZOS SOBRE LAS BRIDAS

FLANGE DESIGN

TABLE 4 - FACTORS INVOLVING K (Continued)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.434 | 1.74 | 2.89 | 5.56 | 6.10 | 1.75 | 1.60 | 1.97 | 3.64 | 4.00 |
| 1.438 | 1.74 | 2.87 | 5.52 | 6.05 | 1.76 | 1.60 | 1.95 | 3.61 | 3.96 |
| 1.442 | 1.74 | 2.85 | 5.48 | 6.01 | 1.77 | 1.60 | 1.94 | 3.57 | 3.93 |
| 1.446 | 1.74 | 2.83 | 5.44 | 5.97 | 1.78 | 1.59 | 1.92 | 3.54 | 3.89 |
| 1.450 | 1.73 | 2.81 | 5.40 | 5.93 | 1.79 | 1.59 | 1.91 | 3.51 | 3.85 |
| 1.454 | 1.73 | 2.80 | 5.36 | 5.89 | 1.80 | 1.58 | 1.89 | 3.47 | 3.82 |
| 1.458 | 1.73 | 2.78 | 5.32 | 5.85 | 1.81 | 1.58 | 1.88 | 3.44 | 3.78 |
| 1.462 | 1.73 | 2.76 | 5.28 | 5.80 | 1.82 | 1.58 | 1.86 | 3.41 | 3.75 |
| 1.466 | 1.73 | 2.74 | 5.24 | 5.76 | 1.83 | 1.57 | 1.85 | 3.38 | 3.72 |
| 1.470 | 1.72 | 2.72 | 5.20 | 5.71 | 1.84 | 1.57 | 1.84 | 3.35 | 3.69 |
| 1.475 | 1.72 | 2.70 | 5.16 | 5.66 | 1.85 | 1.56 | 1.83 | 3.33 | 3.65 |
| 1.480 | 1.72 | 2.68 | 5.12 | 5.61 | 1.86 | 1.56 | 1.81 | 3.30 | 3.62 |
| 1.485 | 1.72 | 2.66 | 5.08 | 5.57 | 1.87 | 1.56 | 1.80 | 3.27 | 3.59 |
| 1.490 | 1.72 | 2.64 | 5.04 | 5.53 | 1.88 | 1.55 | 1.79 | 3.24 | 3.56 |
| 1.495 | 1.71 | 2.62 | 5.00 | 5.49 | 1.89 | 1.55 | 1.78 | 3.22 | 3.54 |
| 1.500 | 1.71 | 2.60 | 4.96 | 5.45 | 1.90 | 1.54 | 1.77 | 3.19 | 3.51 |
| 1.505 | 1.71 | 2.58 | 4.92 | 5.41 | 1.91 | 1.54 | 1.75 | 3.17 | 3.48 |
| 1.510 | 1.71 | 2.56 | 4.88 | 5.37 | 1.92 | 1.54 | 1.74 | 3.14 | 3.45 |
| 1.515 | 1.71 | 2.54 | 4.84 | 5.33 | 1.93 | 1.53 | 1.73 | 3.12 | 3.43 |
| 1.520 | 1.70 | 2.53 | 4.80 | 5.29 | 1.94 | 1.53 | 1.72 | 3.09 | 3.40 |
| 1.525 | 1.70 | 2.51 | 4.77 | 5.25 | 1.95 | 1.53 | 1.71 | 3.07 | 3.38 |
| 1.530 | 1.70 | 2.49 | 4.74 | 5.21 | 1.96 | 1.52 | 1.70 | 3.05 | 3.35 |
| 1.535 | 1.70 | 2.47 | 4.70 | 5.17 | 1.97 | 1.52 | 1.69 | 3.03 | 3.33 |
| 1.540 | 1.69 | 2.46 | 4.66 | 5.13 | 1.98 | 1.51 | 1.68 | 3.01 | 3.30 |
| 1.545 | 1.69 | 2.44 | 4.63 | 5.09 | 1.99 | 1.51 | 1.68 | 2.98 | 3.28 |
| 1.55 | 1.69 | 2.43 | 4.60 | 5.05 | 2.00 | 1.51 | 1.67 | 2.96 | 3.26 |
| 1.56 | 1.69 | 2.40 | 4.54 | 4.99 | 2.01 | 1.50 | 1.66 | 2.94 | 3.23 |
| 1.57 | 1.68 | 2.37 | 4.48 | 4.92 | 2.02 | 1.50 | 1.65 | 2.92 | 3.21 |
| 1.58 | 1.68 | 2.34 | 4.42 | 4.86 | 2.04 | 1.49 | 1.63 | 2.88 | 3.17 |
| 1.59 | 1.67 | 2.31 | 4.36 | 4.79 | 2.06 | 1.48 | 1.62 | 2.85 | 3.13 |
| 1.60 | 1.67 | 2.28 | 4.31 | 4.73 | 2.08 | 1.48 | 1.60 | 2.81 | 3.09 |
| 1.61 | 1.66 | 2.26 | 4.25 | 4.67 | 2.10 | 1.47 | 1.59 | 2.78 | 3.05 |
| 1.62 | 1.65 | 2.23 | 4.20 | 4.61 | 2.12 | 1.46 | 1.57 | 2.74 | 3.01 |
| 1.63 | 1.65 | 2.21 | 4.15 | 4.56 | 2.14 | 1.46 | 1.56 | 2.71 | 2.97 |
| 1.64 | 1.65 | 2.18 | 4.10 | 4.50 | 2.16 | 1.45 | 1.55 | 2.67 | 2.94 |
| 1.65 | 1.65 | 2.16 | 4.05 | 4.45 | 2.18 | 1.44 | 1.53 | 2.64 | 2.90 |
| 1.66 | 1.64 | 2.14 | 4.01 | 4.40 | 2.20 | 1.44 | 1.52 | 2.61 | 2.87 |
| 1.67 | 1.64 | 2.12 | 3.96 | 4.35 | 2.22 | 1.43 | 1.51 | 2.58 | 2.84 |
| 1.68 | 1.63 | 2.10 | 3.92 | 4.30 | 2.24 | 1.42 | 1.50 | 2.56 | 2.81 |
| 1.69 | 1.63 | 2.08 | 3.87 | 4.26 | 2.26 | 1.41 | 1.49 | 2.53 | 2.78 |
| 1.70 | 1.63 | 2.06 | 3.83 | 4.21 | 2.28 | 1.41 | 1.48 | 2.50 | 2.75 |
| 1.71 | 1.62 | 2.04 | 3.79 | 4.17 | 2.30 | 1.40 | 1.47 | 2.48 | 2.72 |
| 1.72 | 1.62 | 2.02 | 3.75 | 4.12 | 2.32 | 1.40 | 1.46 | 2.45 | 2.69 |
| 1.73 | 1.61 | 2.00 | 3.72 | 4.08 | 2.34 | 1.39 | 1.45 | 2.43 | 2.67 |
| 1.74 | 1.61 | 1.99 | 3.68 | 4.04 | 2.36 | 1.38 | 1.44 | 2.40 | 2.64 |

ANEXO F. CATALOGO VALVULA DE COMPUERTA

VÁLVULAS DE COMPUERTA



Servicio Recomendado

LAS VÁLVULAS DE COMPUERTA WALWORTH® UTILIZAN CUANDO SE REQUIERE UN DISPOSITIVO QUE PERMITA INTERRUPIR O CORTAR EL PASO DE UN FLUIDO EN UNA LINEA.

NO DEBEN SER USADAS PARA REGULAR EL PASO DE UN FLUIDO, PORQUE LA VELOCIDAD DEL MISMO A TRAVÉS DE LA VÁLVULA

PARCIALMENTE ABIERTA, OCACIONARÁ UN DESGASTE EXCESIVO EN LA CUÑA Y EN LOS ASIENTOS.

POR LO TANTO, BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN NORMALES, LA VÁLVULA DEBE PERMANECER TOTALMENTE ABIERTA O TOTALMENTE CERRADA. SU INSTALACIÓN ES INDEPENDIENTE DEL SENTIDO DE FLUJO.

VÁSTAGO NO GIRATORIO DE TIPO ASCENDENTE, CON ROSCA STUB ACE DE PRECISIÓN DE DOBLE ENTRADA PARA UNA RÁPIDA OPERACIÓN. HILOS DE LA ROSCA "ROLADOS" NO "CORTADOS" PARA ELIMINAR CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS EN LA RAÍZ DE LA ROSCA.

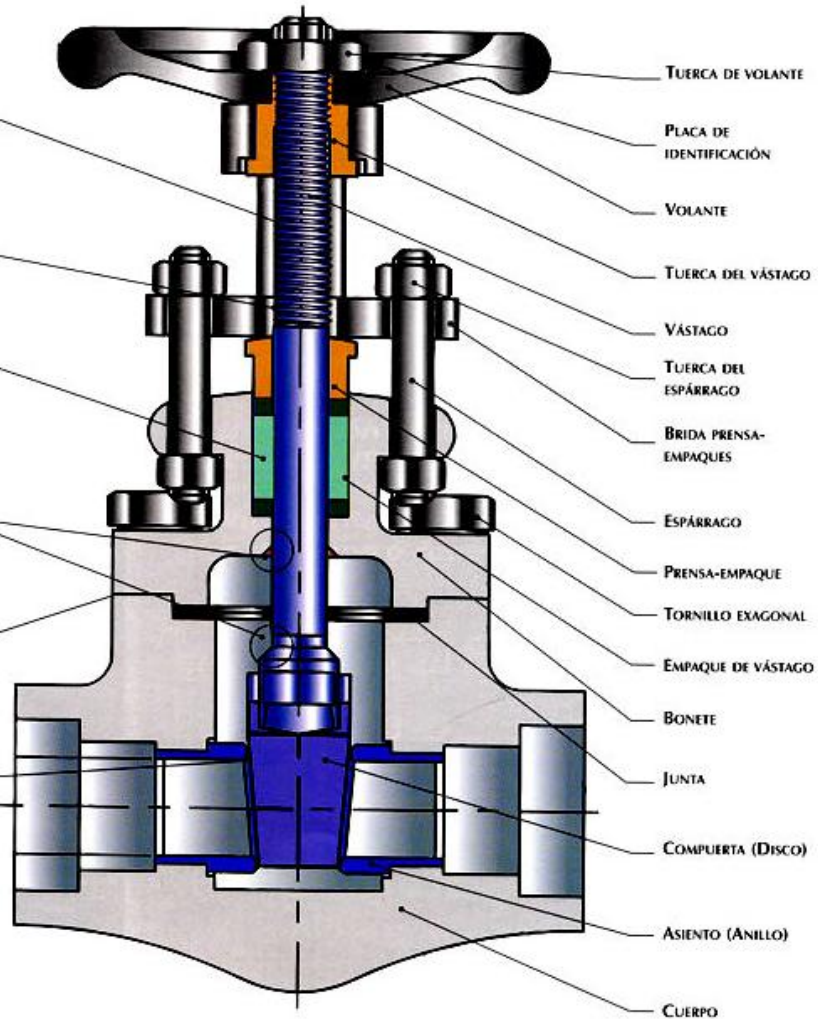
ENSAMBLE VÁSTAGO-COMPUERTA-TUERCA DE VÁSTAGO, DISEÑADO PARA QUE FALLE FUERA DE LA CAJA DE EMPAQUES EN CASO DE QUE LA COMPUERTA SE ATASQUE.

EMPAQUE DE VÁSTAGO, PERMITE UN CONTROL ÓPTIMO DE EMISIONES FUGITIVAS A LA ATMÓSFERA. FACTORES ESENCIALES COMO: CLAROS DIAMETRALES REDUCIDOS, RECTITUDES CONTROLADAS Y ACABADOS FINOS EN EL VÁSTAGO INCREMENTAN LA CAPACIDAD DE SELLO DE LOS MISMOS.

SUPERFICIE DE SELLO POSTERIOR (BACKSEAT), PERMITE EL CAMBIO DE LOS EMPAQUES DE VÁSTAGO CUANDO LA VÁLVULA ESTÁ ABIERTA TOTALMENTE Y EL INTERIOR ESTÁ PRESURIZADO.

UNIÓN CUERPO BONETE, CON UNA COMPRESIÓN CONTROLADA QUE ASEGURA UN SELLO CORRECTO DE LA JUNTA.

RECUBRIMIENTO DE ESTELITE EN LOS ASIENTOS, INCREMENTA LA RESISTENCIA AL DESGASTE PROVOCADO POR LA ABRASIÓN Y EROSIÓN DE LAS SUPERFICIES DE SELLO DURANTE EL PASO DE FLUIDOS CON SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.



VÁLVULAS COMPUERTA ACERO FORJADO

Lista de Partes y Materiales

| No | DESCRIPCIÓN | API TRIM 8 (UT) | API TRIM 5 (HF) | API TRIM 12 (3HF) |
|----|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | CUERPO | ASTM A 105N | ASTM A 105N | ASTM A 105N |
| 2 | ASIENTOS (ANILLOS) | ASTM A 276 TIPO 410 +ST6 | ASTM A 276 TIPO 410 +ST6 | ASTM A 276 TIPO 316 +ST6 |
| 3 | CUÑA/DISCO/COMPUERTA | ASTM A 217 CA15 | ASTM A 217 CA15 +ST6 | ASTM A 351 CF8M |
| 4 | JUNTA | GRAFITO / INOXIDABLE 304 | GRAFITO / INOXIDABLE 304 | GRAFITO / INOXIDABLE 304 |
| 5 | BONETE | ASTM A 105N | ASTM A 105N | ASTM A 105N |
| 6 | EMPAQUE DE VASTAGO | GRAFITO | GRAFITO | GRAFITO |
| 7 | TORNILLO HEXAGONAL | ASTM A 193 GR B7 | ASTM A 193 GR B7 | ASTM A 193 GR B7 |
| 8 | PRENSA EMPAQUE | ASTM A 108 TIPO 1018 | ASTM A 108 TIPO 1018 | ASTM A 108 TIPO 1018 |
| 9 | ESPÁRRAGO | ASTM A 582 TIPO 416 | ASTM A 582 TIPO 416 | ASTM A 582 TIPO 416 |
| 10 | BRIDA PRENSA EMPAQUES | ASTM A 36 | ASTM A 36 | ASTM A 36 |
| 11 | TUERCA DEL ESPÁRRAGO | ASTM A 194 GR 8 | ASTM A 194 GR 8 | ASTM A 194 GR 8 |
| 12 | VASTAGO | ASTM A 276 TIPO 410 | ASTM A 276 TIPO 410 | ASTM A 276 TIPO 316 |
| 13 | TUERCA DEL VASTAGO | ASTM A 582 TIPO 416 | ASTM A 582 TIPO 416 | ASTM A 582 TIPO 416 |
| 14 | VOLANTE | ASTM A 536 GR 65 45 12 | ASTM A 536 GR 65 45 12 | ASTM A 536 GR 65 45 12 |
| 15 | PLACA DE IDENTIFICACIÓN | ALUMINIO | ALUMINIO | ALUMINIO |
| 16 | TUERCA DEL VOLANTE | ASTM A 108 TIPO 1018 | ASTM A 108 TIPO 1018 | ASTM A 108 TIPO 1018 |

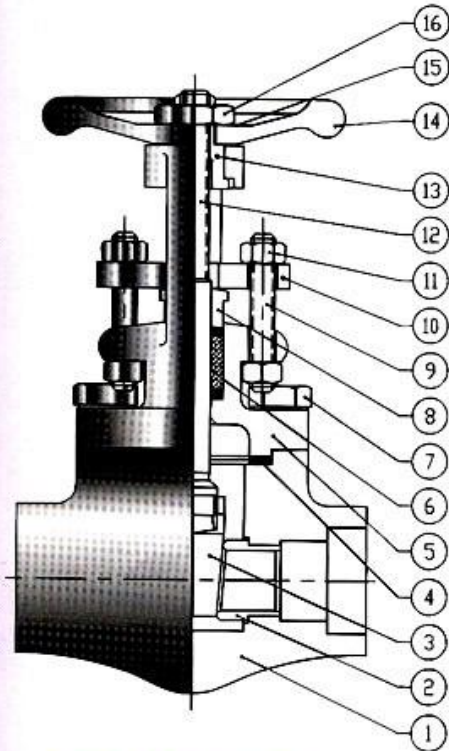


Fig. 950SW, Fig. 1950SW
Fig. 958SW, Fig. 1951SW

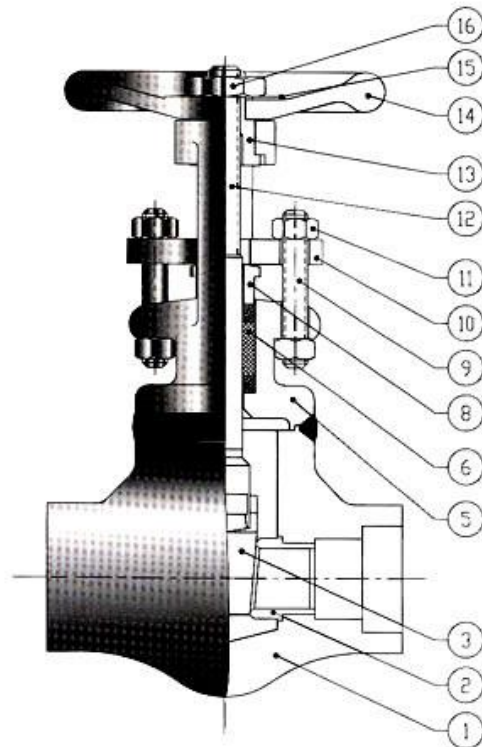


Fig. 957SW, Fig. 1957SW
Fig. 959SW, Fig. 1958SW
Fig. 952SW, Fig. 962SW

VÁLVULAS COMPUERTA ACERO FORJADO CLASE 150/300/600



Características de Diseño

- BONETE BRIDADO ATORNILLADO
- CUÑA SÓLIDA
- API 602 & ASME B16.34
- VÁSTAGO CON CUERDA AL EXTERIOR (OS&Y)
- PREENSA-EMPAQUE BRIDADO Y ATORNILLADO
- PASO ESTÁNDAR O COMPLETO
- EXTREMOS BRIDADOS (CARA REALZADA O JUNTA TIPO ANILLO)
- BRIDAS UNIDAS CON SOLDADURA (PENETRACIÓN COMPLETA)
- ASIENTOS RENOVABLES ESTELITIZADO

| PASO | CLASE | FIGURAS | TIPOS DE EXTREMOS |
|----------|-------|---------|----------------------------|
| ESTÁNDAR | 150 | 9515RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| | | 9515RJ | BRIDADOS JUNTA TIPO ANILLO |
| | | 9518RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| ESTÁNDAR | 300 | 9530RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| | | 9530RJ | BRIDADOS JUNTA TIPO ANILLO |
| | | 9538RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| ESTÁNDAR | 600 | 9560RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| | | 9560RJ | BRIDADOS JUNTA TIPO ANILLO |
| | | 9568RF | BRIDADOS CARA REALZADA |
| COMPLETO | | 9568RJ | BRIDADOS JUNTA TIPO ANILLO |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 9515RF PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------------|-------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|---------|
| A (1/16RF) | PULG. | 4 1/4 | 4 5/8 | 5 | 6 1/2 (a) | 6 1/2 | 7 |
| | MM | 108 | 118 | 127 | 165 | 165 | 178 |
| A (RJ) | PULG. | 4 1/4 | 4 5/8 | 5 1/2 | 7 (a) | 7 | 7 1/2 |
| | MM | 108 | 118 | 140 | 178 | 178 | 191 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 1/2 | 9 1/2 | 10 3/8 |
| | MM | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 264 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 |
| | MM | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 159 |
| D | PULG. | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 7/16 |
| | MM | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 36.5 |
| PESO (RF) | LB. | 5.62 | 8.26 | 12.70 | 19.30 | 22.00 | 31.30 |
| | KG. | 1.9 | 3.5 | 7.2 | 8.7 | 8.7 | 12.4 |

(a) POR DISEÑO INTERNO DE WALWORTH (NO CUMPLE CON ANSI B16.10)

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 9530RF PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------------|-------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|---------|
| A (1/16RF) | PULG. | 5 1/2 | 6 | 6 1/2 | 7 | 7 1/2 | 8 1/2 |
| | MM | 140 | 152 | 165 | 178 | 191 | 216 |
| A (RJ) | PULG. | 5 1/2 | 6 | 7 | 7 1/2 | 8 | 9 |
| | MM | 140 | 152 | 178 | 191 | 216 | 229 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 1/2 | 9 1/2 | 10 3/8 |
| | MM | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 264 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 |
| | MM | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 159 |
| D | PULG. | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 7/16 |
| | MM | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 36.5 |
| PESO (RF) | LB. | 8.04 | 10.47 | 15.21 | 24.3 | 25.00 | 33.06 |
| | KG. | 3.65 | 4.75 | 6.90 | 11.04 | 11.35 | 15.00 |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 9560RF PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------------|-------------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|---------|
| A (1/4RF) | PULG. | 6 1/2 | 7 1/2 | 8 1/2 | 9 | 9 1/2 | 11 1/2 |
| | MM | 165 | 191 | 216 | 228 | 241 | 292 |
| A (RJ) | PULG. | 6 1/2 | 7 1/2 | 9 | 9 1/2 | 10 | 12 |
| | MM | 165 | 191 | 228 | 241 | 254 | 305 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 | 9 1/2 | 10 3/8 |
| | MM | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 26 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 |
| | MM | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 159 |
| D | PULG. | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 7/16 |
| | MM | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 36.5 |
| PESO (RF) | LB. | 8.9 | 11.0 | 13.0 | 27.6 | 30.4 | 41 |
| | KG. | 4.05 | 5.00 | 5.90 | 12.50 | 13.80 | 18.60 |

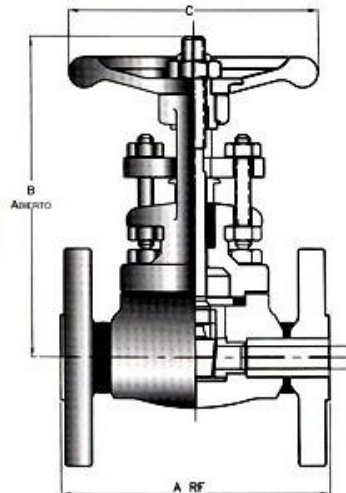


FIG. 9515RF
FIG. 9530RF
FIG. 9560RF

VÁLVULAS COMPUERTA ACERO FORJADO CLASE 800



Características de Diseño

- BONETE BRIDADO ATORNILLADO O SOLDADO
- JUNTA DEL BONETE ESPIROTÁLICA
- CUÑA SÓLIDA
- API 602 & ASME B16.34
- VÁSTAGO CON CUERDA AL EXTERIOR (OS&Y)
- PRENSA-EMPAQUE BRIDADO Y ATORNILLADO
- PASO ESTÁNDAR O COMPLETO
- EXTREMOS ROSCADOS, CON CAJA PARA SOLDAR O MIXTOS
- ASIENTOS RENOVABLES ESTELITIZADOS

| PASO | CLASE | FIGURAS | TIPOS DE EXTREMOS |
|----------|---|---------|-----------------------------|
| ESTÁNDAR | 800 BONETE BRIDADO | 950SC | ROSCADOS |
| ESTÁNDAR | | 950SW | CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | | 950SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 958SC | ROSCADOS |
| COMPLETO | | 958SW | CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 958SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | 800 BONETE SOLDADO | 957SC | ROSCADOS |
| ESTÁNDAR | | 957SW | CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | | 957SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 959SC | ROSCADOS |
| COMPLETO | | 959SW | CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 959SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 950 PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|----------|
| A | PULG. | 3 5/16 | 3 5/16 | 3 5/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 4 3/4 | 5 1/8 |
| | MM | 84 | 84 | 84 | 90 | 113 | 121 | 121 | 130 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 3/4 | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 1/2 | 9 1/2 | 10 13/16 |
| | MM | 146 | 146 | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 262 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 7/16 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 36.5 |
| PESO | LB. | 4 | 4 | 3.7 | 4.2 | 7.5 | 15.7 | 15.7 | 18.3 |
| | KG. | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 3.4 | 7.1 | 7.1 | 8.3 |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 958 PASO COMPLETO)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|----------|
| A | PULG. | 3 5/16 | 3 5/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 4 3/4 | 5 1/8 | 6 1/2 |
| | MM | 84 | 84 | 90 | 113 | 121 | 121 | 130 | 165 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 1/2 | 9 1/2 | 10 5/16 | 10 13/16 |
| | MM | 146 | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 262 | 275 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 8 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 203 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 29/32 | 1 1/8 | 1 7/16 | 1 29/32 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 22.8 | 28.6 | 36.5 | 48.2 |
| PESO | LB. | 4.0 | 3.7 | 4.2 | 7.5 | 15.7 | 15.7 | 18.3 | 21.0 |
| | KG. | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 3.4 | 7.1 | 7.1 | 8.3 | 9.5 |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 957 PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|----------|
| A | PULG. | 3 5/16 | 3 5/16 | 3 5/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 4 3/4 | 5 1/8 |
| | MM | 84 | 84 | 84 | 90 | 113 | 121 | 121 | 130 |
| B | PULG. | 5 3/4 | 5 3/4 | 5 3/4 | 5 7/8 | 7 1/8 | 9 1/2 | 9 1/2 | 10 13/16 |
| | MM | 146 | 146 | 146 | 149 | 181 | 241 | 241 | 262 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 7/16 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 36.5 |
| PESO | LB. | 4 | 4 | 3.7 | 4.2 | 7.5 | 15.7 | 15.7 | 18.3 |
| | KG. | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 3.4 | 7.1 | 7.1 | 8.3 |

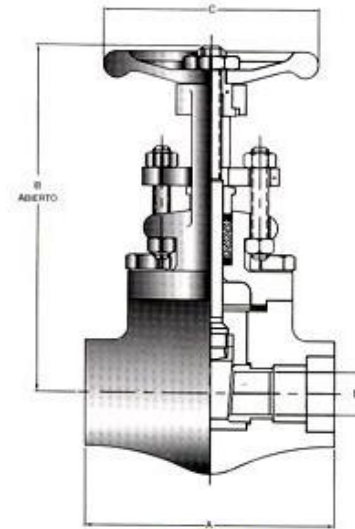


FIG. 950SW
FIG. 958SW

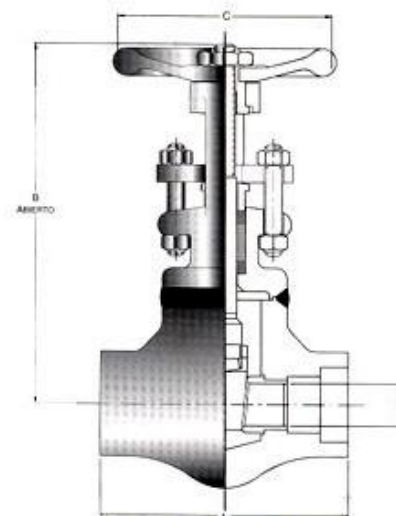


FIG. 957SW
FIG. 959SW

VÁLVULAS COMPUERTA ACERO FORJADO CLASE 1500



Características de Diseño

- BONETE BRIDADO ATORNILLADO
- JUNTA DEL BONETE ESPIROITALICA
- CUÑA SÓLIDA
- API 602 & ASME B16.34
- VÁSTAGO CON CUERDA AL EXTERIOR (OS&Y)
- PRENSA-EMPAQUE BRIDADO Y ATORNILLADO
- PASO ESTÁNDAR O COMPLETO
- EXTREMOS ROSCADOS, CON CAJA PARA SOLDAR O MIXTOS
- ASIENTOS RENOVABLES ESTELITIZADOS

| PASO | CLASE | FIGURAS | TIPOS DE EXTREMOS |
|----------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ESTÁNDAR | 1500 BONETE BRIDADO | 1950SC | ROSCADOS |
| ESTÁNDAR | | 1950SW | CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | | 1950SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 1951SC | ROSCADOS |
| COMPLETO | | 1951SW | CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | 1500 BONETE SOLDADO | 1951SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | | 1957SC | ROSCADOS |
| ESTÁNDAR | | 1957SW | CAJA PARA SOLDAR |
| ESTÁNDAR | | 1957SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR |
| COMPLETO | | 1958SC | ROSCADOS |
| COMPLETO | 1958SW | CAJA PARA SOLDAR | |
| COMPLETO | 1958SSW | ROSCADOS X CAJA PARA SOLDAR | |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 1950 PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|----------|
| A | PULG. | 3 9/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 5 1/8 | 5 1/8 | 5 1/8 | 6 1/2 |
| | MM | 90 | 90 | 113 | 121 | 130 | 130 | 130 | 165 |
| B | PULG. | 5 7/8 | 5 7/8 | 5 7/8 | 7 3/16 | 9 13/16 | 10 21/32 | 10 21/32 | 11 11/32 |
| | MM | 149 | 149 | 149 | 182 | 249 | 271 | 271 | 288 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 8 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 203 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 13/32 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 35.7 |
| PESO | LB. | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 7.8 | 15.9 | 19.2 | 19.2 | 27.5 |
| | KG. | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 3.5 | 7.2 | 8.7 | 8.7 | 12.4 |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 1951 PASO COMPLETO)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|
| A | PULG. | 3 9/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 5 1/8 | 5 1/8 | 6 1/2 |
| | MM | 90 | 90 | 113 | 121 | 130 | 130 | 165 |
| B | PULG. | 5 7/8 | 5 7/8 | 7 3/16 | 9 13/16 | 10 21/32 | 10 21/32 | 11 11/32 |
| | MM | 149 | 149 | 182 | 249 | 271 | 271 | 288 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 8 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 203 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 13/32 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 35.7 |
| PESO | LB. | 4.2 | 4.2 | 7.8 | 15.9 | 19.2 | 19.2 | 27.5 |
| | KG. | 1.9 | 1.9 | 3.5 | 7.2 | 8.7 | 8.7 | 12.4 |

DIMENSIONES Y PESOS (FIG. 1957 PASO ESTÁNDAR)

| TAMAÑO | PULG. MM | 1/4 6 | 3/8 10 | 1/2 13 | 3/4 19 | 1 25 | 1 1/4 32 | 1 1/2 38 | 2 51 |
|--------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|----------|
| A | PULG. | 3 9/16 | 3 9/16 | 3 9/16 | 4 7/16 | 4 3/4 | 5 1/8 | 5 1/8 | 6 1/2 |
| | MM | 90 | 90 | 90 | 113 | 121 | 130 | 130 | 165 |
| B | PULG. | 5 7/8 | 5 7/8 | 5 7/8 | 7 3/16 | 9 13/16 | 10 21/32 | 10 21/32 | 11 11/32 |
| | MM | 149 | 149 | 149 | 182 | 249 | 271 | 271 | 288 |
| C | PULG. | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 6 1/4 | 8 |
| | MM | 102 | 102 | 102 | 102 | 159 | 159 | 159 | 203 |
| D | PULG. | 5/16 | 3/8 | 3/8 | 1/2 | 3/4 | 1 1/8 | 1 1/8 | 1 13/32 |
| | MM | 7.9 | 9.5 | 9.5 | 12.7 | 19.1 | 28.6 | 28.6 | 35.7 |
| PESO | LB. | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 7.8 | 15.9 | 19.2 | 19.2 | 27.5 |
| | KG. | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 3.5 | 7.2 | 8.7 | 8.7 | 12.4 |

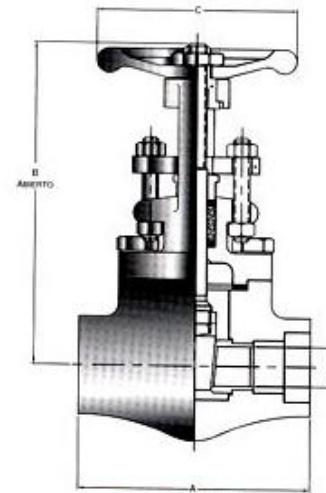


FIG. 1950SW
FIG. 1951SW

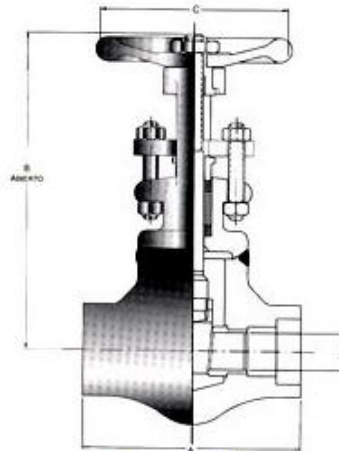


FIG. 1957SW
FIG. 1958SW