

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

"Diseño y Construcción de un Equipo Liofilizador para la Carrera de
Ingeniería en Alimentos"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Jonathan Xavier Alarcón Olarte.

Wilson Floresmilo Herrera Loor.

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, a nuestros padres, familiares, compañeros y amigos de esta prestigiosa institución, a quienes nos guiaron y aconsejaron, a los doctores Clotario Tapia Bastidas, Patricia García Mora y Emérita Delgado por su colaboración en el desarrollo del proyecto, y a los ingenieros César Arizaga y César Coloma por su ayuda en la construcción del presente proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Jonathan Xavier Alarcón Olarte

Wilson Floresmilo Herrera Loo

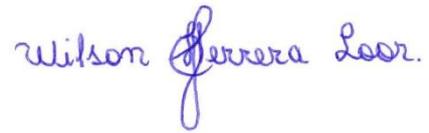
Clotario Tapia Bastidas, Ph.D.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Jonathan Alarcón Olarte

Autor 1



Wilson Herrera Loo

Autor 2



Clotario Tapia Bastidas, Ph.D.

Tutor de Materia Integradora

RESUMEN

En el campo de la investigación y desarrollo de la industria alimenticia, una de las herramientas usadas para la conservación de muestras es la liofilización, la misma que permite la deshidratación de muestras, bajo condiciones de bajas presiones y temperatura, favoreciendo de esta manera que las mismas mantengan sus propiedades estables durante más tiempo. Como parte de este trabajo final de graduación se diseñará y construirá un equipo liofilizador con sistema de monitoreo de presión y temperatura, para la carrera de ingeniería en alimentos. Este proyecto multidisciplinario fue previsto que sea desarrollado en dos fases durante dos semestres académicos, cuya primera fase correspondiente al componente a la carrera de ingeniería en mecánica es descrita en el presente documento.

El equipo liofilizador está formado por dos sistemas, uno de vacío y otro de refrigeración. Para el diseño del sistema de vacío se realizó una selección de componentes como la bomba de vacío y acoples NPT, también se calcularon las cámaras de vacío utilizando la norma ASME Sección VIII para obtener el espesor óptimo de los recipientes. Asimismo, se dimensionó el sistema de refrigeración empleando conceptos de transferencia de calor y masa.

Como resultado de este trabajo final de graduación se ha diseñado y construido de manera exitosa un equipo para liofilización capaz de deshidratar muestras sólidas y que posee una capacidad nominal de extracción de 0.5 kg de agua. Un componente fundamental para el funcionamiento del liofilizador es el correcto dimensionamiento de la trampa de frío, misma que debe capturar el agua sublimada durante el proceso de liofilización. Un prototipo de trampa de frío con un serpentín de enfriamiento que opera a una temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un área efectiva de 0.22 metros cuadrados ha sido construido; adicionalmente el espesor de pared de esta trampa de frío ha sido fijado en 2 milímetros con el fin de soportar la presión de operación de 3 Pa (0.03 mbar).

Palabras Claves: Liofilización, deshidratación, sistema de vacío, sistema de refrigeración

ABSTRACT

In the field of research and development for the food industry, one of the tools used for the preservation of samples is the freeze-drying technique, which allows the dehydration of samples, at low pressure and temperature; hence enabling to keep their properties longer. As part of this graduation project, a freeze-dryer will be designed and constructed, having included temperature and pressure monitoring systems for the food engineering career. This multidisciplinary project was foresaw to be finished in two phases, during two academic semesters, whose first phase corresponding to the mechanical engineering component is described in the present document.

The freeze-dryer is compounded by two systems, a vacuum and a refrigeration system. While designing the vacuum system, the selection of components, such as vacuum pump and NPT couplings was performed, likewise the vacuum chambers were calculated by using the ASME Section VIII standard to obtain their optimal thickness. The refrigeration system was calculated by using heat and mass principles.

As a result of this graduation project, a freeze-dryer equipment has been designed and constructed successfully, this equipment is able to dehydrate solid samples with an extraction capacity of 0.5 Kg of water. A crucial component for the operation of the freeze-dryer is the correct sizing of the cold trap, which must capture the sublimated water during the freeze-drying process. A prototype cold trap having a cooling coil that operates at a temperature of -40°C and an effective area of 0.22 square meters has been constructed; additionally, the wall thickness of the cold trap has been set to 2 millimeters in order to withstand the operating pressure of 3 Pa (0.03 mbar).

Keywords: Freeze-drying, dehydration, vacuum system, refrigeration system.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS	X
INDICE DE PLANOS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo General	1
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Marco teórico.....	2
1.3.1 Principios de la Liofilización	2
1.3.2 Etapas de la liofilización	3
CAPÍTULO 2.....	6
2. Metodología	6
2.1 Metodología de Diseño del Liofilizador.....	6
2.2 Diseño Conceptual	8
2.2.1 Alternativas de Diseño	8
2.2.2 Determinación de Requerimientos	15
2.2.3 Selección de alternativas	17
2.2.4 Selección de materiales	22

2.3	Diseño Detallado	23
2.3.1	Balance de masa del proceso de liofilización	23
2.3.2	Cálculos de recipientes de presión.....	26
2.3.3	Calculo de espesor del anillo en la tapa del recipiente.....	27
2.3.4	Calculo para la selección de bomba de vacío	31
2.3.5	Cálculos térmicos	33
CAPÍTULO 3.....		44
3.	Analisis de Resultados.....	44
3.1	Resultados Diseño y selección de los componentes del equipo liofilizador. ...	44
3.1.1	Capacidad de unidad condensadora seleccionada.	44
3.1.2	Dimensiones del serpentín evaporador.....	45
3.1.3	Capacidad de bomba de vacío seleccionada.....	45
3.1.4	Dimensiones del recipiente de muestra y de la trampa de frío.....	46
3.2	Simulación de componentes del equipo liofilizador.....	46
3.2.1	Simulación del vacío en recipientes de muestra y trampa de frío.	47
3.3	Construcción y pruebas del equipo liofilizador.	48
3.3.1	Proceso de construcción	48
3.3.2	Prueba de Estanqueidad en Recipientes de muestras y trampa de frío. 50	
3.3.3	Prueba de Estanquidad en el Serpentín evaporador.....	51
3.3.4	Prueba de funcionamiento del equipo.....	53
3.3.5	Resumen de resultados	54
3.3.6	Prueba de secado en el Prototipo	55
3.4	Análisis de costos del equipo liofilizador.	58
CAPÍTULO 4.....		63
4.	Discusión y Conclusiones	63
4.1	Conclusiones.....	64

4.2 Recomendaciones..... 64

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
ISO	International Organization for Standardization
KF	Klein Flange
NPT	National Pipe Thread
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
TIG	Tungsten Inert gas
ASTM	American Society for Testing and Materials

SIMBOLOGÍA

°K	grados Kelvin
m	metros
kg	kilogramos
kW	kilo Watts
W	Watts
HP	horse power
Gpa	gigapascales
Mpa	megapascales
KPa	kilopascales
Pa	pascales
psi	libras por pulgada cuadrada
in	pulgadas
°C	grados centígrados
kJ	kilo Joules
s	segundos
BTU	British Thermal Unit
CFM	Cubic Feet per Minute
mbar	milibares
h	hora
\$	Dólares
N	Newton
KN	kilo Newton
PCA	potencial de calentamiento atmosférico
T	temperatura
h	coeficiente de transferencia de calor por convección
k	conductividad térmica
mm	milímetros

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama Presión-Temperatura, cambio de fase del agua.....	3
Figura 2.1 Diagrama de Flujo de la Metodología de Diseño del Liofilizador	6
Figura 2.2 Esquema de un equipo liofilizador	8
Figura 2.3 Clasificación de rangos de vacío para diferentes procesos	10
Figura 2.4 Esquemático del sistema de vacío con acoples KF	12
Figura 2.5 Esquemático del sistema de vacío con acoples NPT	13
Figura 2.6 Diagrama en bloque del proceso de liofilización	24
Figura 2.7 Diagrama de junta recipiente - tapa.....	27
Figura 2.8 Esquema del anillo en la tapa de la trampa de frío	28
Figura 2.9 Esquema de viga en voladizo	29
Figura 2.10 Diagrama de Mollier para refrigerante R404a	33
Figura 2.11 Esquema de trampa de frío para análisis térmico.....	36
Figura 2.12 Esquema de análisis en pared de la trampa como resistencia térmica ..	39
Figura 2.13 Factor de forma para cálculo de calor por radiación	41
Figura 3.1 Resultado de factor de seguridad de la trampa por simulación	47
Figura 3.2 Resultado factor de seguridad de tapa de recipiente por simulación.....	48
Figura 3.3 Dimensiones para construcción de trampa de frío.....	49
Figura 3.4 Dimensiones de construcción de recipiente de muestras	49
Figura 3.5 Proceso de soldado para trampa de frío	50
Figura 3.6 Pruebas de estanqueidad en recipientes de trampa de frío y muestras ..	51
Figura 3.7 Pruebas de estanqueidad en conexiones	51
Figura 3.8 Lectura de manómetro de 125 psig no disminuyo durante las pruebas....	52
Figura 3.9 Se verifica que no se formen burbujas.....	52
Figura 3.10 Grafica de estabilización de temperatura del sistema de refrigeración...	53
Figura 3.11 Diseño final de prototipo liofilizador.	54
Figura 3.12 Colocación de muestras en la Cámara de secado	55
Figura 3.13 Inspección Visual de Secado de naranjilla.....	56
Figura 3.14 Inspección formación de hielo en el serpentín de la trampa de Frío.....	57

Figura B.1 Diagrama de fuerza distribuida.....	73
Figura B.2 Diagrama de Cuerpo Libre	74
Figura B.3 Diagrama de cortante máximo	74
Figura B.4 Diagrama de Momento	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Materiales usados como sellos para diferentes presiones.....	11
Tabla 2.2 Matriz de ponderación de criterios	18
Tabla 2.3 Matriz de Calificaciones de alternativas	18
Tabla 2.4 Matriz de Decisión del sistema de vacío	18
Tabla 2.5 Matriz de ponderación de criterios para sello hermético	19
Tabla 2.6 Matriz de Decisión del sello hermético.....	20
Tabla 2.7 Matriz de ponderación para criterios	21
Tabla 2.8 Matriz de Decisión del sistema de refrigeración.....	21
Tabla 2.9 Propiedades mecánicas de los AISI 316 Y AISI 304	23
Tabla 3.1 Tabla de Resultados Unidad Condensadora	44
Tabla 3.2 Tabla de Resultados del Serpentín Evaporador	45
Tabla 3.3 Tabla de Resultados Bomba de Vacío.....	46
Tabla 3.4 Tabla de Resultados	46
Tabla 3.5 Resumen de resultados	54
Tabla 3.6 Resultados de Humedad y actividad de agua de la naranjilla	58
Tabla 3.7 Tabla de costos de recipientes y componetes del sistema de vacío.....	60
Tabla 3.8 Tabla de Costos del sistema de refrigeración e instalación	61
Tabla 3.9 Tabla de costos de estructura de soporte del equipo.....	62
Tabla 3.10 Resumen de costos	62
Tabla B.1 Datos para el cálculo del espesor de anillo	73
Tabla B.2 Resultados de espesor mínimo	76
Tabla B.3 Resultados de espesor mínimo	79
Tabla B.4 Datos obtenidos de las propiedades termodinámicas R404a.....	81

INDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Serpentín evaporador
- PLANO 2 Trampa de Frio.
- PLANO 3 Plano trampa para recipientes.
- PLANO 4 Sello Para Tapas de recipientes
- PLANO 5 Te róscale para cierre hermético de Tapa
- PLANO 6 Recipiente de muestras.
- PLANO 7 Estructura del gabinete para Liofilizador.
- PLANO 8 Ensamble del Equipo.
- PLANO 9 Esquema del sistema de refrigeración.
- PLANO 10 Esquema Eléctrico sistema de refrigeración
- PLANO 11 Partes del equipo liofilizador.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En el campo de la investigación y desarrollo de alimentos, una de las herramientas más usadas para una correcta preservación y conservación de muestras es la liofilización. Se trata de una técnica que permite la eliminación del agua de muestras o disoluciones en condiciones de baja presión y temperatura, favoreciendo que los productos deshidratados obtenidos mantengan sus propiedades estables durante más tiempo; ya que esta técnica no modifica su color, sabor o actividad biológica.

A pesar del importante papel que juega esta técnica en la investigación y desarrollo de alimentos, en la actualidad los investigadores de la carrera de Ingeniería en Alimentos – ESPOL no disponen de un equipo liofilizador propio, con el fin de llevar a cabo proyectos de investigación o desarrollo; por lo que tienen que solicitar el uso de este equipo en otros centros o departamentos, suponiendo un coste constante para la carrera. Además, es importante remarcar que, en Ecuador no se cuenta con ofertas de empresas que fabriquen este tipo de equipos, por lo que éstos tienen que ser importados a altos costos e incluso, en muchos casos, sin garantía de mantenimiento o reparación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar un liofilizador con sistema de monitoreo de presión y temperatura, utilizando el proceso de sublimación, de manera que ayude en la conservación y preservación de muestras de origen alimentario.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar y diseñar un sistema de generación de vacío que pueda reproducir las condiciones para que se produzca el proceso de sublimación.
- Dimensionar y diseñar el sistema de refrigeración para la trampa de frío del equipo para la protección de la bomba de vacío.
- Elaborar planos de diseño e instructivo de operación del equipo liofilizador.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Principios de la Liofilización

La sublimación es el fenómeno físico, en la cual una sustancia que inicialmente se encuentra en estado sólido pasa a estado gaseoso, sin pasar por su estado líquido. El proceso inverso de la sublimación es conocido como deposición.

Otro concepto importante para comprender el proceso de liofilización es el de punto triple, el cual se define como las condiciones de presión y temperatura en el cual una sustancia puede coexistir en los tres estados (sólido, líquido y gaseoso), ver figura 1.1. (Cengel & Boles, 2012)

La liofilización es el proceso mediante el cual se produce el secado o deshidratación de un determinado producto, a través de la sublimación progresiva del solvente o agua presente en el mismo. De manera general, este proceso se caracteriza por emplear bajas presiones y temperaturas favoreciendo a que los elementos volátiles contenidos en el producto no se pierdan, lo que ocurriría en un proceso convencional de secado. (Peña & Parra, 2015)

El principio del proceso de liofilización es la sublimación progresiva del agua contenida en el producto que se desea secar. En la figura 1.1 se

observa que la sublimación del agua se produce por debajo del punto triple el mismo que se encuentra definido a la presión de 610 Pa y una temperatura de 0°C. (Fellows, 1993)

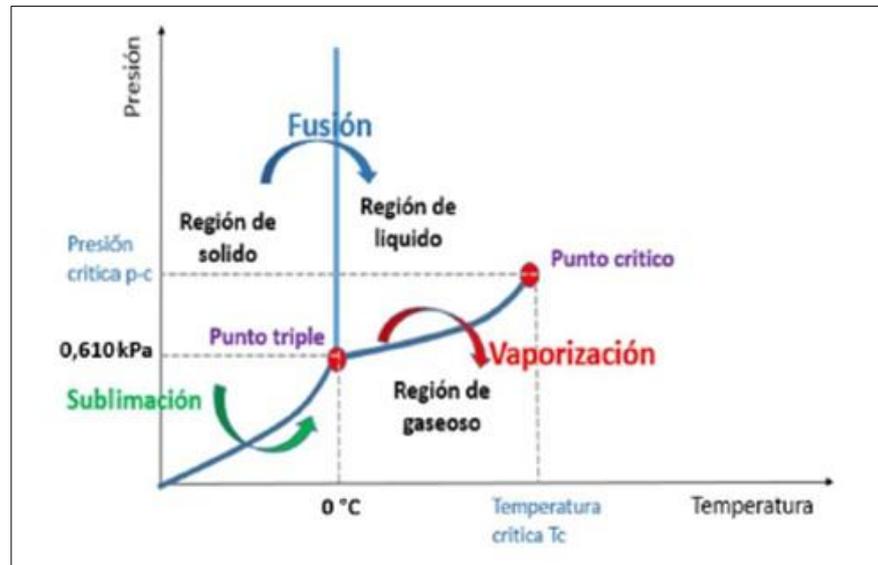


Figura 1.1 Diagrama Presión-Temperatura, cambio de fase del agua.

Fuente: (Fellows, 1993)

1.3.2 Etapas de la liofilización

Un proceso de liofilización está compuesto de tres etapas principales, como son; etapa de congelación, etapa de desecación primaria y desecación secundaria.

1.3.2.1 Etapa de congelación

En esta etapa es primordial conocer varios factores del producto que se desea congelar, como la cantidad de muestra y cantidad de agua contenida en el producto, con el fin de determinar el tiempo total de duración del proceso de congelación. Cabe indicar que, a diferencia del agua pura, los productos alimenticios presentan una menor temperatura de congelación, debido a que los solutos presentes en el agua no congelada se empiezan a concentrar provocando una

disminución en la temperatura de congelación. Se considera en promedio una temperatura de congelación por debajo de -10°C . (Barbosa, 2000)

En esta etapa es importante que el producto sea llevado al punto de congelación procurando una óptima velocidad de enfriamiento para evitar variaciones en su estructura cristalina que eventualmente ocasionarían que se produzcan cavidades en las cuales quede atrapado líquido saturado (agua), y al final lograr que toda el agua líquida contenida en el producto pueda solidificarse.

1.3.2.2 Etapa de desecación primaria

En esta fase el producto que fue congelado en la etapa previa se debe mantener en la cámara de secado a una presión de vapor de agua por debajo de 610 Pa y a una temperatura menor a -5°C , esto con el fin de promover la sublimación directa del agua presente en las muestras. Esto ocurre debido a la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en el producto y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado. (Mascheroni, 2010)

Al culminar la etapa se logra sublimar el hielo (humedad) del producto alimenticio que se produjo en la etapa de congelación, y se consigue un contenido del 10 al 15% de humedad, dejando al mismo listo para la segunda etapa de desecado. (Mascheroni, 2010)

1.3.2.3 Etapa de desecación Secundaria

Esta etapa empieza cuando luego de la desecación primaria, el hielo se ha agotado y la humedad remanente en el mismo proviene del agua parcialmente ligada a la estructura del material que se está secando. En esta etapa se procura eliminar el remanente de agua o humedad de las muestras, por lo cual se mantiene la presión de vacío en el liofilizador por debajo de la presión del punto triple, mientras que la

temperatura de la muestra se eleva progresivamente hasta un valor próximo o menor a la del ambiente, se recomienda 15°C. (Barbosa, 2000)

Luego de la sublimación del hielo durante la primera etapa de desecación, el producto o alimento obtiene una estructura porosa, estos poros servirán como canales o ductos de escape para la evaporación del agua no congelada ligada al producto. Al finalizar el proceso de liofilización, el contenido de agua en el producto se puede reducir hasta un 2% en base a su peso seco.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de Diseño del Liofilizador.

En este capítulo se describe de manera detallada el proceso empleado en el diseño del equipo liofilizador desarrollado en este trabajo de graduación. Algunos autores de textos guías de diseño ingenieril, manifiestan que los problemas de diseño en ingeniería son de carácter abierto; es decir que éstos pueden presentar múltiples soluciones. Sin embargo, si se delinea una adecuada metodología de diseño, se puede alcanzar la solución óptima.

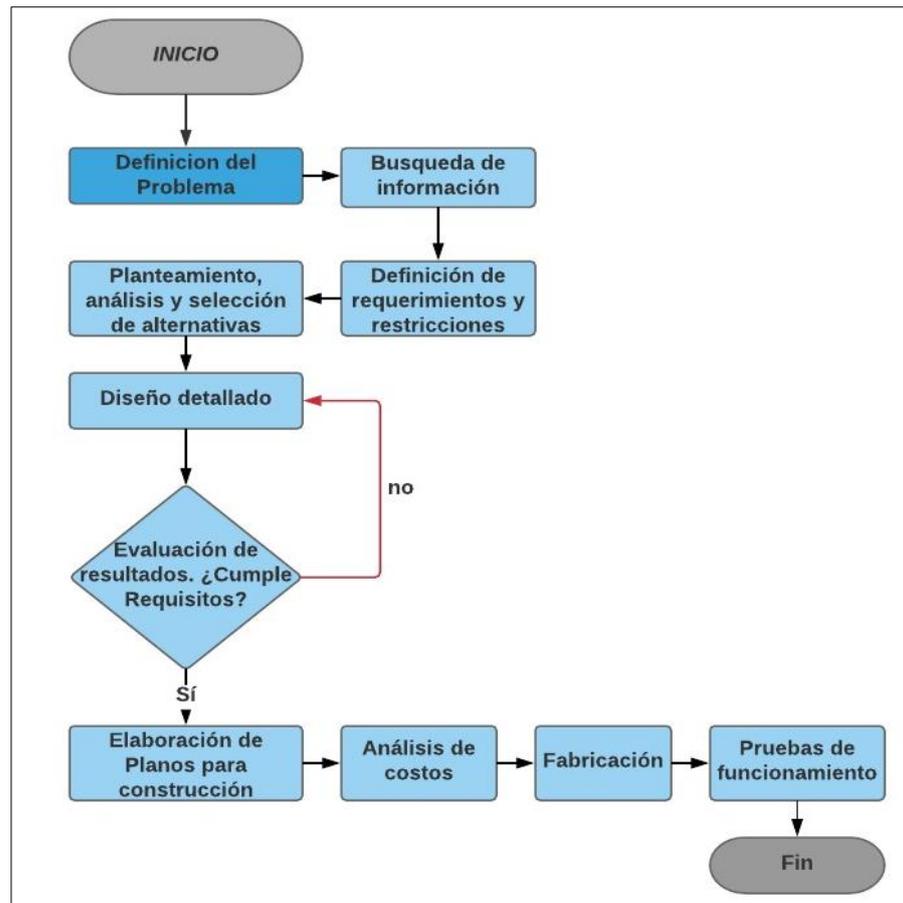


Figura 2.1 Diagrama de Flujo de la Metodología de Diseño del Liofilizador

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

El diagrama de flujo de la figura 2.1. muestra de manera esquemática la metodología a seguir durante un proceso de diseño. Los pasos descritos pueden garantizar que se obtenga la mejor solución al problema de diseño, los mismos que fueron basados a la metodología general de diseño de Norton, pero adaptados a la búsqueda de la solución al problema. (Norton, 2011)

Shigley remarca la importancia de conseguir una buena identificación o definición del problema de diseño a solucionar. El autor resalta la contribución en el proceso de diseño al colocarla como el primer paso para la metodología del diseño. (Shigley, 2008)

La metodología continúa con tres pasos importantes: búsqueda de información, definición de requerimientos y limitaciones y el planteamiento y selección de la mejor alternativa. Todos estos pasos son parte de los que se denomina diseño conceptual. Seguidamente, se da paso al diseño detallado, el cual engloba la selección de materiales más adecuados, los procesos de fabricación o manufactura óptimos, el dimensionamiento de componentes, entre otros pasos.

Posteriormente se da inicio a la etapa de evaluación. Esta etapa debe hacerse con prudencia y criterio adecuados; ya que ésta es dirimente para continuar con el proceso a través del cumplimiento de los criterios de diseño y requerimientos del usuario. Si todo marcha bien se procede a las etapas de elaboración de planos, luego de fabricación y pruebas, finalmente al análisis de costo.

2.2 Diseño Conceptual

2.2.1 Alternativas de Diseño

Tomando en consideración lo expuesto en el capítulo 1, un equipo liofilizador básicamente está conformado por dos sistemas; el sistema de vacío y el sistema de refrigeración como muestra la figura 2.2. En esta sección se pone a consideración varias alternativas de diseño para la construcción de un equipo liofilizador, tomando en cuenta ciertas restricciones de diseño.

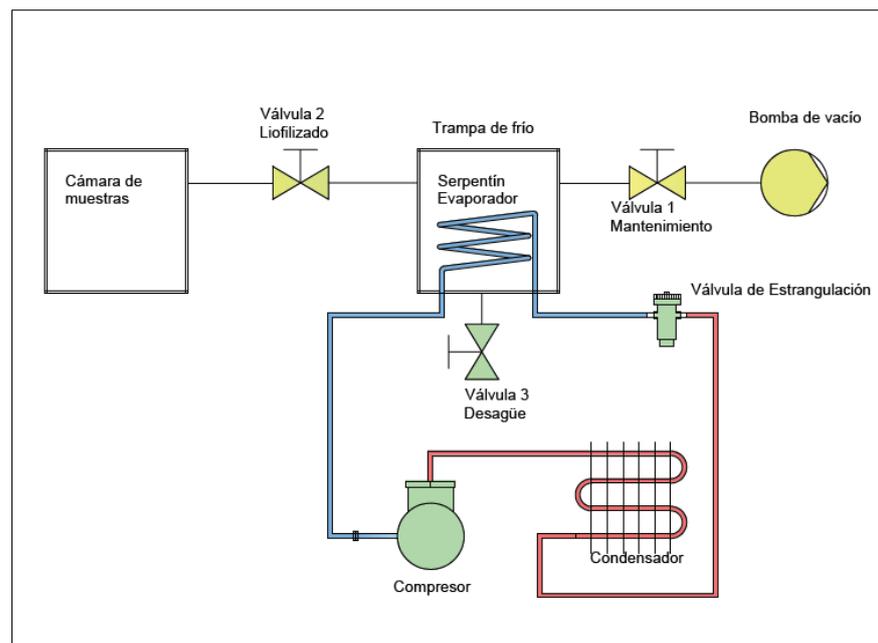


Figura 2.2 Esquema de un equipo liofilizador

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Se identifico que en el mercado se pueden encontrar dos tipos de liofilizadores: Liofilizador tipo bandejas calefaccionadas y liofilizador tipo manifold. La diferencia entre el liofilizador tipo manifold y el tipo bandejas

calefaccionadas radica que con el primero se logra reducir 90% del agua contenida en la muestra, mientras que con el segundo se obtiene muestras deshidratadas con porcentaje de agua menor al 1%. En esta fase del proyecto se muestra el diseño y construcción de un liofilizador tipo manifold. (LABCONCO, 2017)

2.2.1.1 Sistema de Vacío

El sistema de vacío es fundamental en el equipo liofilizador, siendo el encargado de que se produzca el diferencial de presión necesario para que se dé la migración del agua contenida en el producto a través del proceso de sublimación. Como se muestra en la figura 2.3 el rango de vacío necesario para procesos de liofilización de masas de alimentos se encuentra en medio vacío. (LEYBOLD, 2007)

	Ultra Alto vacío			Alto Vacío			Medio Vacío			Vacío Áspero		
Recocido de metales												
Derretimiento de metales												
Desgasificación de metales fundidos												
Desgasificación de acero												
Fusión de haz de electrones												
Soldadura de haz de electrones												
Recubrimiento de evaporación												
Sputtering de metales												
Fusión de zonas y crecimiento de cristales en alto vacío												
Destilación molecular												
Desgasificación de líquidos												
Sublimación												
Fundición de resinas y lacas												
Secado de plásticos												
Secado de papeles aislantes												
Liofilización de materiales de masas												
Liofilización de productos farmacéuticos												
Producción de lámparas incandescentes												
Producción de tubos de electrones												
Producción de tubo de descarga de gas												
	10^{-10}		10^{-7}			10^{-3}			10^0			10^3

Figura 2.3 Clasificación de rangos de vacío para diferentes procesos

Fuente (LEYBOLD, 2007)

Bomba de vacío

Para generar medio vacío como se indica en la figura 2.3 existen diferentes tipos de bombas, entre ellas está la Bomba de vacío con tornillo seca de paso variable, bombas de pistón rotativo de una sola etapa y bomba de paleta rotativa de dos etapas. En el capítulo 3 se presentará la bomba seleccionada según su capacidad de bombeo y en el rango de vacío que se desea alcanzar.

Sello hermético para tapas de recipientes

El manual de Hoffman se describe los tipos de sellos que se utilizan para asegurar la hermeticidad de juntas en aplicaciones que operan con presiones de vacío. La Tabla 2.1 muestra algunos materiales que se utilizan como sellos de juntas. (Hoffman & Thomas, 2000)

Tabla 2.1 Materiales usados como sellos para diferentes presiones

	Presión (mbar)
Acero	1E-08
Elastómero	1E-06

Fuente (Hoffman & Thomas, 2000)

Sistema de vacío con acoples ISO-KF

Los acoples y componentes ISO-KF son elementos de unión que garantizan que la junta entre dos componentes es completamente hermética, evitando al mínimo las pérdidas de vacío en el sistema y haciéndolo más eficiente, además de impedir que ingrese humedad del ambiente circundante al mismo. Como se observa en la figura 2.4, se dispuso que la bomba del sistema este ubicada en la parte inferior del mismo, la trampa (centro) y la cámara de muestras se encuentran al mismo nivel.

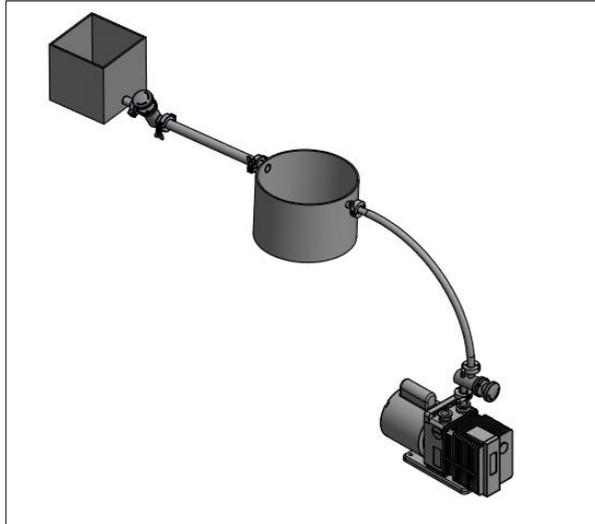


Figura 2.4 Esquemático del sistema de vacío con acoples KF

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Sistema de vacío con acoples NPT

Los acoples y componentes NPT a diferencia de los KF son de menores costos y de mayor accesibilidad en el mercado ecuatoriano. A diferencia de los KF los accesorios NPT son de tipo roscado, para estos se usa Teflón comercial para tuberías que garantizan la hermeticidad del sistema de vacío. La configuración que se emplea con estos componentes es colocar la bomba, trampa y cámara al mismo nivel, tratando de que estos se ubiquen lo más cerca posible para evitar pérdidas debido a que los ductos son de menor diámetro que los KF, además da la ventaja de hacer al sistema más compacto.

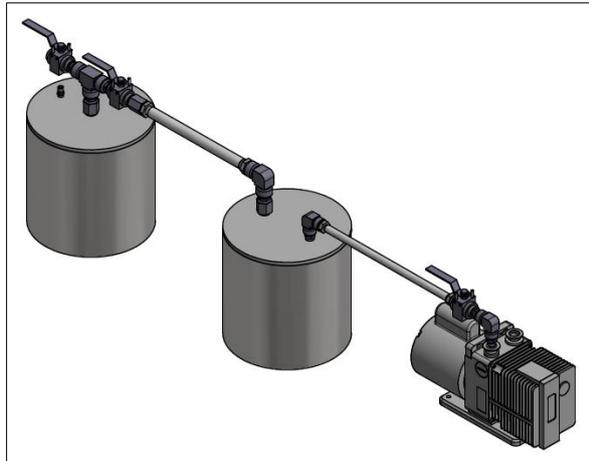


Figura 2.5 Esquemático del sistema de vacío con acoples NPT

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

2.2.1.2 Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración en el presente diseño cumple una función muy importante dentro del equipo liofilizador. Este sistema protege a la bomba de vacío del agua removida de la muestra durante el proceso de liofilización, al retenerla simulando una trampa. En este equipo el sistema cumplirá solo el propósito de proteger a la bomba de vacío, debido a que el diseño de liofilizador Manifold que hemos seleccionado requiere que la muestra o producto a secar se la ingresa congelada al equipo, por lo que se asegurará que el sistema de refrigeración tenga la capacidad de proteger el equipo de liofilización.

Como se menciona en el capítulo 1, el secado por liofilización se basa en el fenómeno de la sublimación del agua, la misma que consiste en pasar de estado sólido a gaseoso sin pasar por el estado líquido. Debido al efecto combinado de someter a la muestra a vacío mientras se encuentra congelada (es decir su contenido inicial de agua se encuentra en estado sólido) se produce una migración de agua en estado gaseoso desde la muestra al sistema de vacío. Este vapor representa un riesgo de deterioro para la bomba de vacío, en caso de llegar a condensarse

eventualmente en su interior. Por lo tanto, es imperativo retener esta agua liberada al sistema. Para este fin un sistema de refrigeración es acoplado a la trampa de frío entre el recipiente de las muestras y la bomba de vacío, como se muestra en las figuras 2.4 y 2.5.

Dentro de esta trampa se produce el proceso inverso de la sublimación, es decir el vapor de agua pasará a estado sólido, el mismo que el sistema de refrigeración debe tener la capacidad de atraparlo como hielo evitando que el vapor de agua llegue a la bomba. En este cometido el tipo de refrigerante juega un papel importante para que el sistema cumpla el propósito, como en la selección de los componentes del sistema de refrigeración. A continuación, se muestra varias alternativas de refrigerante a usar.

Refrigerante R134a

Las características ambientales y propiedades térmicas del refrigerante R134a son:

No daña la capa de ozono, ODP = 0.

Pueden rellenarse los equipos en caso de fuga.

Alcanzan una capacidad frigorífica ligeramente inferior al R-12.

Muy eficiente energéticamente, aunque precisa de un compresor mayor respecto otros refrigerantes HFC.

Potencial de calentamiento atmosférico PCA (GWP) = 1430

Punto ebullición a 1,013 bar (° C): -26,1

Deslizamiento de temperatura (° C): 0

Densidad vapor saturado a -26,1°C (kg/m³): 5,28

Clasificación seguridad: A1. Baja toxicidad y no inflamable. (Gas Servei S.A, 2017)

Refrigerante R404a

El refrigerante R404a presenta las siguientes características:

No daña la capa de ozono, ODP = 0.

Únicamente compatible con aceites sintéticos POE.

Pueden rellenarse los equipos en caso de fuga.

Capacidad frigorífica y presión de trabajo muy superior al R-22.

Potencial de calentamiento atmosférico PCA (GWP) = 2088

Punto ebullición a 1,013 bar (° C): -51,58

Deslizamiento de temperatura (° C): 0,1

Densidad vapor saturado a 25°C (kg/m³): 61,5

Clasificación seguridad: A1. Baja toxicidad y no inflamable.

Cargar siempre en fase líquida. (Gas Servei S.A, 2017)

2.2.2 Determinación de Requerimientos

Dentro del diseño conceptual es de mucha importancia definir los requerimientos y restricciones que debe tener el diseño, para este caso el equipo de liofilización, los mismos que servirán como pautas para el diseñador durante todo el proceso. Los requerimientos mostrados a continuación fueron planteados de acuerdo con la definición del problema y a conversaciones con los promotores del proyecto.

Tamaño

Dado a que el lugar de destino del equipo es un laboratorio, el tamaño del equipo es un requerimiento importante, debido al espacio que ocupará en el mismo, además que el tamaño facilitará la manipulación del equipo por parte de los operadores.

Costos

La construcción final del equipo debe tener un menor costo en comparación con liofilizador comercial.

Aislamiento Térmico

Se debe garantizar que no exista pérdidas de calor el cual afecte en la eficiencia del sistema de refrigeración. Para esto se debe aislar la trampa de frío y las cañerías expuestas al medio circundante.

Temperatura y presión de trabajo

Para garantizar que exista el proceso de sublimación, las condiciones de trabajo de presión en todo el sistema de vacío, debe estar por debajo del punto triple del agua. Por otro lado, las muestras deberán ingresar congelada en la cámara de muestra previo al inicio del proceso de liofilizado. Lo descrito anteriormente es de uso habitual en los liofilizadores Manifold.

Hermeticidad

El sistema completo no debe presentar fugas, por lo tanto, tanto la cámara de muestras como la trampa de frío tendrán sellos herméticos para evitar el ingreso de humedad proveniente del ambiente. Se hace especial énfasis en estos componentes debido a que, durante la utilización habitual del equipo, el operador deberá exponerlos a los mismos al medio circundante.

Capacidad de equipo

El liofilizador deberá tener la capacidad de deshidratar productos alimenticios que contengan hasta dos litros de agua.

Mantenimiento

Se deberá realizar mantenimientos preventivos y correctivos al liofilizador, por lo que se debe contar con componentes que sean de sencillo montaje

y desmontaje, fácil limpieza, fácil acceso a los sistemas de vacío como de refrigeración.

Ambiental y seguridad

En los últimos años ha crecido la tendencia de que los diseñadores consideren normas ambientales en sus diseños. Por este motivo este requerimiento busca que los componentes de cada sistema del equipo liofilizador causen poco impacto ambiental y que además no sean nocivos o pongan en riesgo la seguridad del operador.

2.2.3 Selección de alternativas

En esta sección se muestra el proceso seguido para realizar la selección de las alternativas planteadas tanto para el sistema de vacío como el de refrigeración. Este proceso es muy importante debido a que permite filtrar el universo de soluciones al problema de diseño.

2.2.3.1 Selección del sistema de vacío

En secciones anteriores de este capítulo se presenta dos alternativas para la selección de los acoples del sistema de vacío. Se ha denominado a la solución de utilizar conexiones KF como solución A y a la solución de utilizar conexiones NPT como solución B.

Para desarrollar el método se pondera a criterio, mostrados en la Tabla 2.2. Estos criterios fueron seleccionados de los requerimientos que deben constar en el equipo de liofilización. Los valores de los pesos ponderados a cada criterio se los obtuvo realizando un muestreo entre los participantes del proyecto, de este modo se obtuvo una media de la opinión de cada participante con respecto a cada criterio.

Tabla 2.2 Matriz de ponderación de criterios

Criterios	Ponderación
1. Tamaño	0,21
2. Costos Generales	0,25
3. Cantidad de componentes	0,18
4. Hermeticidad	0,25
5. Mantenimiento	0,11
Total	1

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Es necesario otorgar valores o calificar cada solución respecto de cada criterio, para ello se calificó con una ponderación de 1 a 5, donde 1 representa la alternativa menos conveniente y 5 la alternativa más conveniente o la mejor, tal como muestra la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Matriz de Calificaciones de alternativas

Calificación	Equivalencia
5	Excelente
4	Muy buena
3	Buena
2	Regular
1	Insuficiente

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Tabla 2.4 Matriz de Decisión del sistema de vacío

Solución/Criterio	1	2	3	4	5	Total
Solución A	3	2	2	3	4	2,56
Solución B	4	3	3	3	2	3,07

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Comparando los resultados obtenidos en la Tabla 2.4 se llegó a la conclusión que la solución B es la mejor opción. Por lo que se concluyó que las características que brindan las conexiones NPT son apropiadas dentro del rango de vacío que se desea trabajar en la construcción del sistema de vacío.

2.2.3.2 Selección del sello hermético

Se presenta dos alternativas para el sello hermético, para la respectiva selección se denotará como alternativa A al sello metálico, alternativa B al elastómero. Con este método pondera valores de importancia a los criterios de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Matriz de ponderación de criterios para sello hermético

Criterios	Ponderación
1. Tamaño	0,14
2. Costos Generales	0,11
3. Cantidad de componentes	0,20
4. Hermeticidad	0,40
5. Mantenimiento	0,15
Total	1

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Se calificó cada solución respecto de cada criterio, para ello se calificó con una ponderación de 1 a 5, donde 1 representa la alternativa menos conveniente y 5 la alternativa más conveniente o la mejor, tal como muestra la Tabla 2.3

Tabla 2.6 Matriz de Decisión del sello hermético

Solución/Criterio	1	2	3	4	5	Total
Alternativa A	3	3	5	5	3	4,20
Alternativa B	3	2	5	5	5	4,39

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

De acuerdo con la Tabla 2.6 se selecciona la solución B como alternativa principal para la construcción del sello, ya que cumple las condiciones para trabajar en el rango de vacío que operara el equipo liofilizador.

2.2.3.3 Selección del refrigerante para el sistema de refrigeración

Al igual que para la selección de las conexiones para vacío, se presentan dos alternativas para la selección del tipo de refrigerante que debe emplearse en el sistema de refrigeración, de estas alternativas se seleccionó la mejor opción empleando matrices de decisión como muestra la Tabla 2.8.

Para desarrollar el método se da pesos a cada criterio de la Tabla 2.7 estos criterios fueron seleccionados de los requerimientos que deben constar en el equipo de liofilización. Al igual que para el sistema de vacío, los valores de los pesos otorgados a cada criterio se los obtuvo realizando un muestreo entre los participantes del proyecto, de este modo se obtuvo una media de la opinión de cada participante con respecto a cada criterio.

Tabla 2.7 Matriz de ponderación para criterios

Criterios	Ponderación
1. Capacidad del equipo	0,25
2. Costos Generales	0,19
3. Temperatura y presión de trabajo	0,35
4. Seguridad y ambiental	0,14
5. Mantenimiento y adquisición	0,07
Total	1

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Se denominó a la solución de utilizar refrigerante R404a como solución A y a la solución de utilizar refrigerante 134-A se la denominó solución B como se muestra en tabla 2.8.

La calificación de 1 a 5 otorgada a cada alternativa fue la misma empleada en la selección del sistema de vacío, donde 1 representa la alternativa menos conveniente y 5 la alternativa más conveniente o la mejor, tal como se muestra la Tabla 2.3

Tabla 2.8 Matriz de Decisión del sistema de refrigeración

Solución/Criterio	1	2	3	4	5	Total
Solución A	3	5	4	4	5	4,01
Solución B	4	3	5	3	3	3.95

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Al comparar los resultados obtenidos en la Tabla 2.8, se llega a la conclusión que la solución A fue la más adecuada. Por lo que también se concluye que las características que brinda el refrigerante R404a son las más apropiadas para el sistema de refrigeración a usarse en este trabajo.

2.2.4 Selección de materiales

Para la producción y protección de los alimentos, las partes del equipo liofilizador no deben desprender ni absorber sustancias nocivas ni que alteren negativamente la composición fisicoquímica del mismo, ya sea por contacto directo o indirecto. Por lo tanto, se las opciones en cuanto al escogimiento de los materiales se ven reducidas a materiales que presenten inocuidad alimenticia. De manera general y por facilidad durante el proceso de manufactura, esta sección se limitará a la descripción y justificación del uso de aceros inoxidable para construir el cuerpo del sistema de vacío. Los aceros inoxidable se clasifican según su estructura cristalina:

Aceros (dúplex) (AISI 201/AISI202)

Aceros Austeníticos (AISI 304/AISI 316)

Aceros Ferríticos (AISI 430)

Aceros Martensíticos (AISI 420)

El acero inoxidable AISI 304 y 316 son usado comúnmente en la industria alimentaria porque tienen propiedades apropiadas para esta aplicación, además estos materiales son resistentes a la corrosión, tienen buena resistencia mecánica y están diseñados para no sufrir alteraciones al estar en contacto con alimentos. (Metals, 1992)

En la tabla 2.9 se muestra las principales propiedades mecánicas de los aceros inoxidable 304 y 316.

Tabla 2.9 Propiedades mecánicas de los AISI 316 Y AISI 304

Propiedades Mecánicas	AISI 316	AISI 304
Límite de fluencia (MPa)	340	310
Resistencia a la tracción (MPa)	460 - 860	460 – 1100
Dureza Brinell	160 – 190	160 -190
Módulo elástico (GPa)	190 - 210	190 – 210

Fuente: (Metals, 1992)

Los tipos aceros que se utilizan para aplicaciones en productos alimenticios, farmacéuticos entre otras que requieren mayor control para mantener un ambiente con baja toxicidad, por lo que se utiliza aceros inoxidable austeníticos de la serie AISI 316 y AISI 304, ya que poseen un porcentaje de cromo (Cr) no menor del 18% el que le otorga al acero una mayor resistencia a la corrosión. En Tabla 2.9 se muestran las propiedades mecánicas de ambos aceros los cuales poseen características similares; por lo tanto, en base a la disposición en el mercado local se seleccionó el AISI 304.(Metals, 1992)

2.3 Diseño Detallado

En esta sección se muestra el análisis ingenieril realizado para el diseño de los sistemas y componentes del equipo liofilizador.

2.3.1 Balance de masa del proceso de liofilización

Es de mucha importancia realizar un balance de masa al proceso de liofilización, con el fin de determinar la cantidad de entradas y salidas de masa que tiene el proceso. Adicionalmente, realizar un balance de masa, permite un completo entendimiento de lo que está ocurriendo durante el proceso de liofilización, por lo que se presenta una mejor solución al problema planteado. (Singh & Heldman, 2009)

Durante el proceso de liofilización existen una entrada de masa al sistema y dos salidas simultáneamente. Como se muestra en la Figura 2.6. A es la cantidad en masa de agua en estado sólido de la muestra a secar, B representa la cantidad de muestra luego de proceso de secado y C es la cantidad de agua que se debe remover para que se produzca el secado por liofilización.

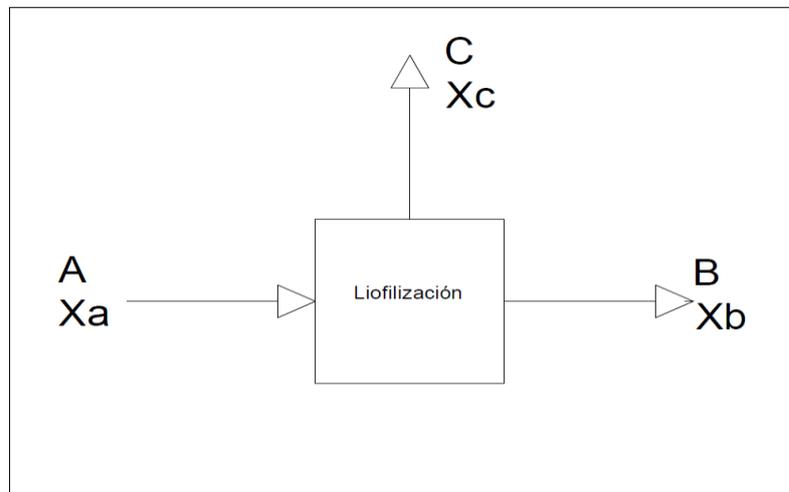


Figura 2.6 Diagrama en bloque del proceso de liofilización

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

En la figura 2.6 se muestra dos salidas de masas en el proceso, de la cuales para los cálculos es de primordial importancia conocer la salida C, misma que representa la cantidad de masa de agua a remover de la muestra durante el proceso de liofilización y que deberá ser atraparla en la trampa de frío. Para ello se presenta el siguiente modelo.

$$A = B + C \quad (2.1)$$

A : Cantidad de muestra congelada húmeda [*kg*]

B : Cantidad de muestra seca [*kg*]

C : Cantidad de Agua a eliminar [*kg*]

$$AX_a = BX_b + CX_c \quad (2.2)$$

X_a : Cantidad de sólidos secos contenidos en la muestra húmeda A.

X_b : Cantidad de sólidos secos contenidos en la muestra seca B.

X_c : Cantidad de sólidos secos de C.

La ecuación (2.1) se la conoce como ecuación de balance de masa del proceso y se la complementa con la ecuación (2.2) de balance de sólidos con el fin de tener un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas y de esta forma definir cada una de las entradas y salidas de masa del proceso de liofilización.

La ecuación (2.2) nos permite determinar en base a la cantidad de muestra del producto que tendrá luego del secado, gracias a que, al trabajar con la cantidad de sólidos secos de las entradas y salidas, se logra que la variable C pueda ser eliminada debido a que el agua no presenta sólidos secos. Los sólidos secos representan la cantidad de materia de una muestra que quedan luego de la remoción del agua presente en la muestra. Una manera fácil de determinar el porcentaje de sólidos secos de un producto es al 100% del producto restar el porcentaje de cantidad de agua del producto y esta diferencia representa la cantidad de sólidos secos del producto en mención.

Como referencia inicial para los cálculos, se toma como base 0.5 kg de fruta (naranjilla) que contiene 91.38% de agua en su composición, tal como lo describe Singh. (Singh & Heldman, 2009)

2.3.2 Cálculos de recipientes de presión

2.3.2.1 Diseño del recipiente de la trampa de frío

La trampa de frío constituye un componente crucial para el correcto funcionamiento del equipo de liofilización. A breves rasgos, la trampa está constituida básicamente por dos elementos: el recipiente y un serpentín a baja temperatura.

En esta sección nos enfocaremos en el diseño del recipiente, mismo que se encuentra sometido a presión de vacío. Para el diseño de este contenedor se utilizan las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers), las mismas que en su sección VIII rige el diseño y la construcción de recipientes a presión.

El recipiente estará expuesto a una presión de vacío próxima a 3 Pa (0.03 mbar) en el interior, mientras que en el exterior actuará la presión atmosférica. Debido a estas condiciones se modelará como recipiente sometido a presión externa. Megyesy en su manual de diseño recomienda que, cuando la presión externa es menor o igual a 101,353Pa (15 psi) , el cálculo de la determinación del espesor mínimo para recipientes a presión externa puede ser hecho manera similar al correspondiente a recipientes sometidos a presión interna. (Megyedy, 2000).

$$t = \frac{PR}{S\epsilon + .06P} \quad (2.3)$$

P : Presión de diseño (presión atmosférica) [psi]

R : Radio del recipiente [$pulg$]

t : Espesor del recipiente [$pulg$]

S : Resistencia del acero recomendada por ASME Sección VIII [psi]

ϵ : Efectividad de la junta soldada.

El valor de S se obtiene de la Tabla UCS -23 de la Norma ASME sección VIII. Considerando que el material del recipiente es acero inoxidable 304, este factor toma valor nominal de 20 000 psi correspondiente al rango de temperatura de -25°C a 93°C . Por otro lado, el valor de ϵ se lo obtiene de la Tabla UW -12 de la Norma ASME sección VIII, donde ϵ toma un valor entre 0.7 y 1 en función de realizar un análisis radiográfico completo, parcial o no realizarle, en la junta soldada del recipiente. Para el presente caso se decidió usar un ϵ de 0.7 que indica que no se le realizará análisis radiográfico. (Megyedy, 2000)

2.3.3 Calculo de espesor del anillo en la tapa del recipiente

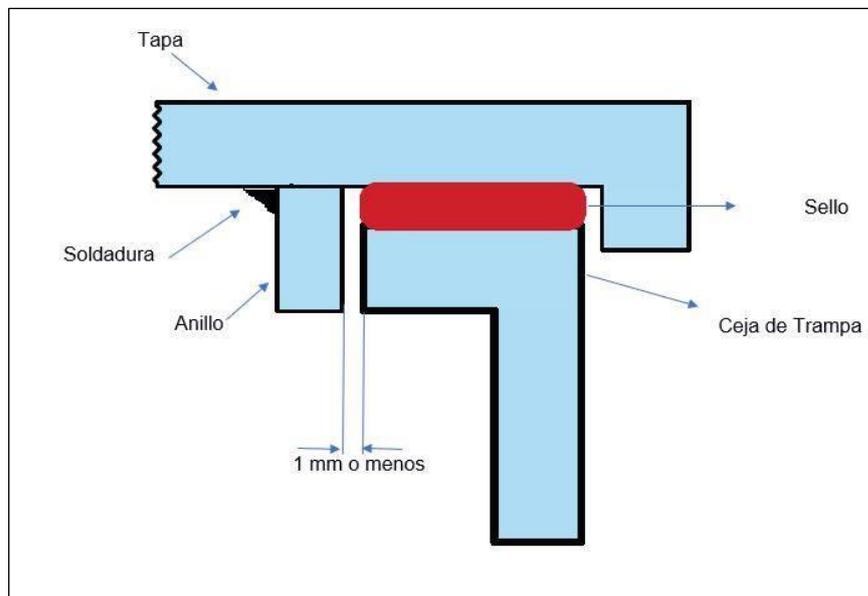


Figura 2.7 Diagrama de junta recipiente - tapa

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

El anillo mostrado en la figura 2.7 soporta la fuerza ejercida por la presión atmosférica sobre el sello de hermeticidad. El diferencial de presión entre el interior y el exterior del recipiente hace que exista una fuerza constante

empujando este sello. De no existir el anillo de soporte las fuerzas radiales superarían las presiones normales al sello y este colapsaría hacia el interior del recipiente, Por lo tanto se desea conocer el espesor mínimo del anillo (figura 2.8) a ser colocado en la superficie interna de la tapa de la trampa , para que este no falle debido a la fuerza que ejerce la presión atmosférica sobre el mismo de manera radial. Para este análisis se aplica el criterio de Von Misses para esfuerzos combinados en diseño estático. (Norton, 2011)

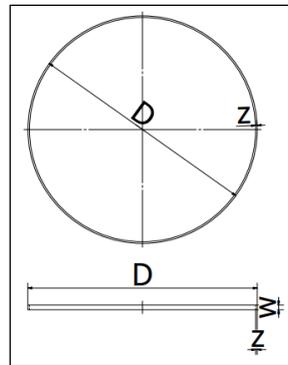


Figura 2.8 Esquema del anillo en la tapa de la trampa de frío

Fuente (Elaboración propia 2017)

Se calcula la fuerza aplicada en el anillo mediante la ecuación (2.4)

$$F = PA \quad (2.4)$$

F= Fuerza [N]

P= Presión atmosférica [Pa]

A=Área transversal a la fuerza [m^2]

Donde el área es:

$$A = wL \quad (2.5)$$

w: Espesor del sello [m]

L: Longitud del anillo [m]

Ecuación de longitud del anillo siguiendo la ecuación (2.6)

$$L = \pi D \quad (2.6)$$

De donde:

D: Diámetro del anillo [m]

Remplazando (2.5) en (2.6) Se tiene:

$$\frac{F}{w} = P\pi D \quad (2.7)$$

Con la ecuación (2.7) se determina la fuerza en función del alto del anillo, con el fin de tener la fuerza distribuida y determinar posteriormente la fuerza en el centroide del anillo, cabe recalcar se analizará de manera simplificada analizado el fenómeno como viga en voladizo siguiendo la figura 2.9.

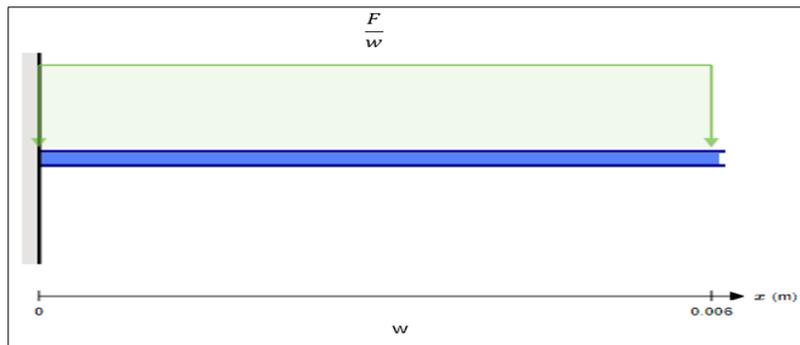


Figura 2.9 Esquema de viga en voladizo

Fuente (Elaboración propia)

Fuerza cortante:

$$\sum F = 0$$

$$V - F = 0$$

$$V = F$$

Momento Máximo

$$\sum M = 0$$

$$M - F * w/2 = 0$$

$$M = \frac{Fw}{2}$$

Se obtienen los esfuerzos mediante las ecuaciones:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.8)$$

$$c = \frac{w}{2} ; I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{L * z^3}{12}$$

Donde:

M: Momento máximo [Nm]

c: Distancia del eje neutro de la viga a la fibra superior [m]

I: Inercia de la viga [m⁴]

$$\tau = \frac{V}{A_l} \quad (2.9)$$

$$A_l = z * L$$

V: Cortante máximo [N]

A_l: Área donde se aplica el cortante [m²]

Habiendo calculado los esfuerzos máximos, se aplica la ecuación de esfuerzo de Von Misses para 2 dimensiones para esfuerzos combinados, ecuación (2.10). (Norton, 2011)

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2.10)$$

Aplicando diseño estático se asume un factor de seguridad para posteriormente evaluar un espesor en la ecuación (2.11)

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (2.11)$$

Donde:

N: Factor de Seguridad

S_y: Resistencia a la fluencia por tensión [Pa]

σ': Esfuerzo de Von Misses [Pa]

Se despeja el esfuerzo de Von Misses de la ecuación (2.11) y se reemplaza en la ecuación (2.10) para obtener una expresión en función del espesor que se desea obtener.

$$\frac{S_y}{N} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

De donde se tiene que:

$$\frac{S_y}{N} = \sqrt{\left(\frac{6M}{L * z^2}\right)^2 + 3\left(\frac{V}{z * L}\right)^2} \quad (2.12)$$

2.3.4 Cálculo para la selección de bomba de vacío

Para alcanzar el vacío; es decir por debajo del punto triple de agua, es necesario seleccionar de manera adecuada la bomba de vacío. El manual de OERLIKON Leybold Vacuum indica que para diferentes aplicaciones de vacío existen rangos de presión establecidos de donde se tiene que para

procesos de secado en frío de masas se usan bombas las cuales alcance presiones en el rango de medio vacío.

En el rango de medio vacío, la velocidad de bombeo efectiva que alcance la presión requerida se utiliza la ecuación (2.13):

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \frac{1013}{p} \quad (2.13)$$

Donde:

S_{eff} = Velocidad de Bombeo [m^3/h]

V= Volumen total que se requiere remover [m^3]

t= Tiempo estimado de remoción [h]

p= Presión requerida de vacío [mbar]

El volumen total requerido para bombear se calcula, mediante la ecuación (2.14):

$$V = \pi * \frac{\phi^2}{4} (Ht - Hm) \quad (2.14)$$

ϕ : Diámetro de los recipientes [m]

Ht: Altura trampa de frío [m]

Hm: altura recipiente de muestras [m]

Para verificar en que rango se encuentra el proceso de secado por liofilización se refiere a la figura 2.3 del catálogo mencionado anteriormente.

El proceso de liofilización se encuentra en el rango de medio vacío partiendo de este dato se selecciona la bomba de vacío calculando el flujo volumétrico (m^3/h) requeridos en la ecuación (2.13).

2.3.5 Cálculos térmicos

2.3.5.1 Análisis Termodinámico del sistema de refrigeración en la trampa de frío del equipo

Se definen las temperaturas del evaporador y condensador a -40°C y 35°C , respectivamente, las mismas que corresponden a baja y alta presión. La temperatura de -40°C se la definió en base a la temperatura más baja que puede alcanzar el refrigerante R404a, mientras que para la temperatura de alta presión se consideró una temperatura ambiente promedio de 30°C a la cual se le sumó 5°C como seguridad. Con estos datos de entrada se utiliza el diagrama de Mollier para el refrigerante R404a mostrado en la figura 2.10. Posteriormente, se identificaron los estados del ciclo ideal de refrigeración, para obtener las propiedades que definen cada uno de estos estados como presión, entalpía y entropía.

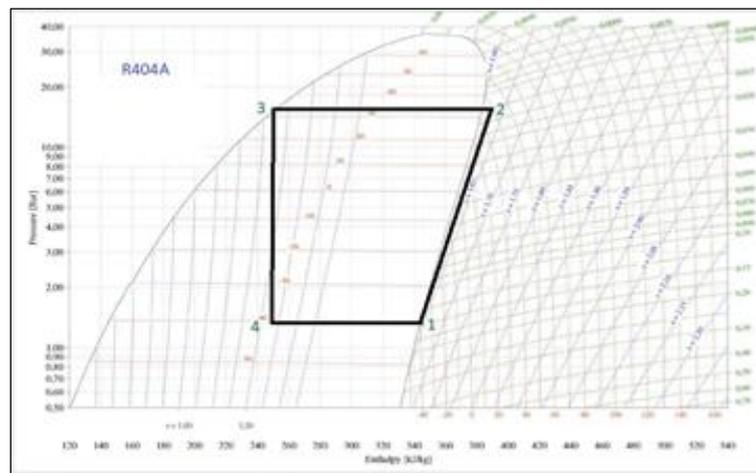


Figura 2.10 Diagrama de Mollier para refrigerante R404a

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Con los estados completamente identificados y definidos se evalúa la capacidad de remoción en el evaporador y de rechazo en el condensador con las ecuaciones (2.15) y (2.16).

$$q_L = h_1 - h_4 \quad (2.15)$$

q_L : Calor latente absorbido por el evaporador $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_1 : Entalpia en el estado uno $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_4 : Entalpia en estado cuatro $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

$$q_h = h_2 - h_3 \quad (2.16)$$

q_h : Calor disipado por el condensador $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_2 : Entalpia en estado dos $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_3 : Entalpia en estado tres $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

También se calculará el tamaño del compresor empleando la ecuación (2.17), con la finalidad de utilizar estos valores para el diseño del sistema de refrigeración.

$$W_c = h_2 - h_1 \quad (2.17)$$

W_c : Trabajo que realiza el compresor $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_2 : Entalpia en estado dos $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

h_1 : Entalpia en estado uno $\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

2.3.5.2 Determinación del calor de sublimación.

Para lograr la determinación del flujo calor que necesita removerse en el serpentín evaporador, se hace necesario el cálculo de dos fuentes de calor, la primera el calor necesario para producir la sublimación de la muestra y el segundo se lo calculara en la sección 2.3.3.3.

Para el cálculo del calor de sublimación se empleará la ecuación (2.18) y el valor de masa a retirar calculado en la sección 2.3.1 (*Cengel & Boles, 2012*)

$$q_s = L_s C \quad (2.18)$$

Donde:

q_s : Calor para sublimar [KJ]

C : Cantidad de agua a sublimar [kg]

L_s : Calor latente de sublimación del agua [KJ/kg]

2.3.5.3 Análisis de transferencia de calor en la trampa de frío

El análisis de transferencia de calor en la trampa de frío del equipo de liofilización se realiza con el fin de determinar el área necesaria del serpentín que capturara el agua extraída de la muestra durante el proceso de sublimación (secado de muestra). Para esto se modela la trampa, incluyendo el serpentín como un cilindro dentro de otro cilindro (pared).

Dado a que el proceso se realiza en vacío, el principal mecanismo de transferencia de calor presente en el interior de la trampa es radiación.

Por otro lado, se considera que en la superficie más exterior de la trampa existe flujo de calor por convección libre, debido a que el aire ambiente se encuentra en reposo, mostrado en la figura 2.11.

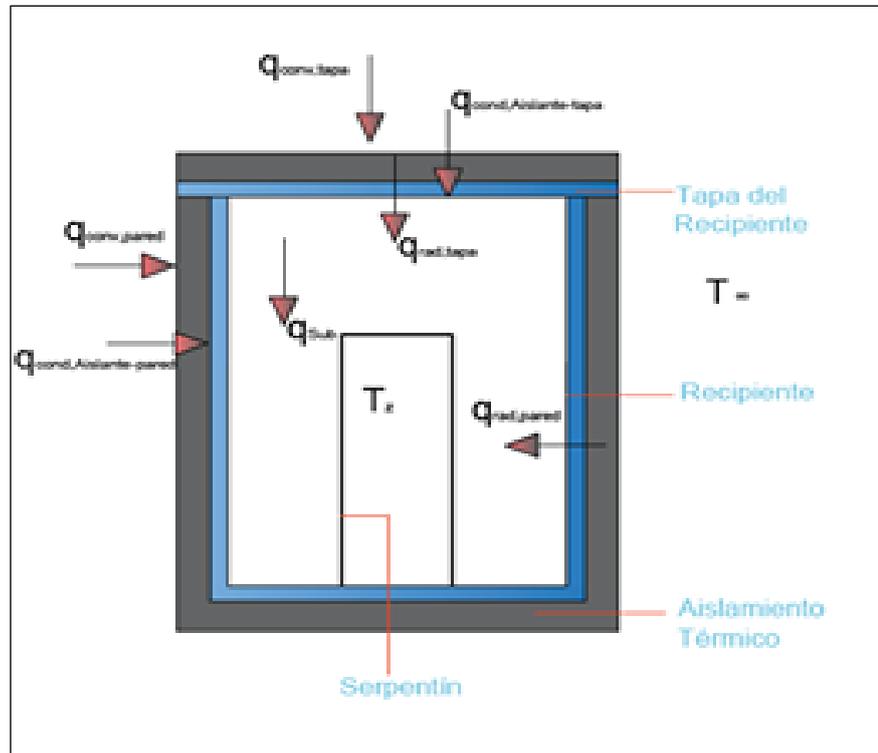


Figura 2.11 Esquema de trampa de frío para análisis térmico

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Determinación de coeficiente de convectivo en el exterior de la trampa

Se utilizarán las ecuaciones presentadas en Incropera para un cilindro largo en convección libre o natural. Para esto se definió la temperatura ambiente en 25 °C donde el equipo va a operar. A partir de esta temperatura se define la temperatura de película del cilindro utilizando la ecuación (2.19), para determinar las propiedades del fluido (aire) (Incropera & Dewitt, 1999)

$$T_f = \frac{T_\infty + T_{s,e}}{2} \quad (2.19)$$

T_f = Temperatura de fibra [°K]

T_∞ = Temperatura del medio [°C]

$T_{s,e}$ = Temperatura de la superficie externa del aislante del serpentín [°C]

Encontradas las propiedades termofísicas, se determinan las correlaciones que se detallan mediante la ecuación (2.20)

$$RaD = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\gamma\alpha} \quad (2.20)$$

Donde:

RaD : Numero de Rayleigh

T_{se} : Temperatura superficial externa del recipiente cilíndrico de la trampa de agua. [°C]

T_∞ : Temperatura del medio lejos de la superficie [°C]

g : aceleración de la Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

β : Coeficiente de Volumétrico de expansión térmica [$\frac{1}{K}$]

D : Diámetro exterior del cilindro [m]

γ : Viscosidad cinemática del fluido [$\frac{m^2}{s}$]

α : difusividad térmica [$\frac{m^2}{s}$]

Definido el número de Rayleigh para cilindros largos sometido a convección libre, se utiliza la aproximación de Nuselt para Rayleigh menores a 1012 como se indica en la ecuación (2.21)

$$\overline{NuD} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387RaD^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{8/27}} \right\}^2 ; RaD \leq 10^{12} \quad (2.21)$$

\overline{NuD} : Numero de Nuselt promedio

Pr : Número de Prandalt

El valor del coeficiente convectivo natural es definido mediante la ecuación (2.22):

$$h = \frac{k}{D} \overline{NuD} \quad (2.22)$$

Como se mencionó anteriormente se debe determinar la temperatura en la superficie interior de la trampa de frio, por lo tanto, mediante el análisis de resistencias térmicas se analiza el comportamiento de la transferencia de calor para el recipiente cilíndrico. Para esto se debe calcular todas las resistencias que intervienen en el proceso. Ver Figura 2.10.

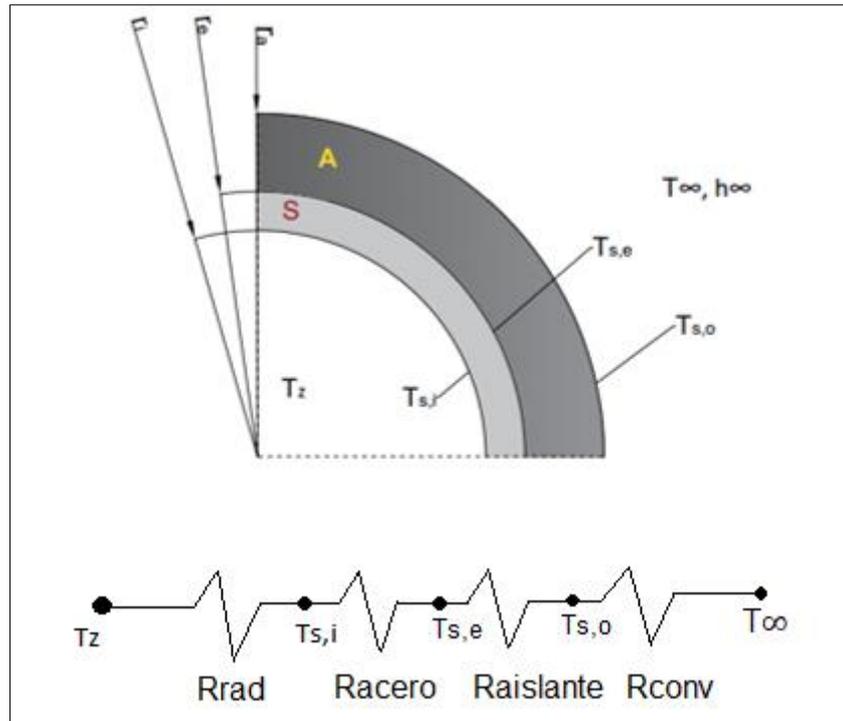


Figura 2.12 Esquema de análisis en pared de la trampa como resistencia térmica

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Para determinar las resistencias por conducción del acero inoxidable y para el material aislante thermaflex utilizamos la siguiente ecuación (2.23):

$$R_{conduccion} = \frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{2\pi kL} \quad (2.23)$$

Donde:

R: Radio mayor de la superficie analizada [m]

r: Radio menos de la superficie analizada [m]

k: Coeficiente de Conductividad térmica del material analizado $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

La resistencia por convección en cilindros viene dada por la ecuación (2.24):

$$R_{convección} = \frac{1}{2\pi RLh} \quad (2.24)$$

Donde:

h: Coeficiente de convección [$\frac{W}{m^2 K}$]

R: Radio exterior de la superficie cilíndrica [m]

L: Longitud del cilindro [m]

Para obtener la ecuación con la cual se determina el área requerida para el serpentín, se analiza la transferencia de calor por radiación que existe entre el serpentín y el interior del recipiente cilíndrico. Como se mencionó anteriormente el serpentín será modelado como un cilindro. Se utiliza la ecuación (2.25) donde involucra el factor de forma para el diseño.

$$q_{radiación} = AF\sigma(T_{s,i}^4 - T_z^4) \quad (2.25)$$

Donde:

AF: Conductancia equivalente [m^2]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann [$\frac{W}{m^2 K^4}$]

$T_{s,i}$: Temperatura interna del recipiente cilíndrico [°K]

T_z : Temperatura del serpentín [°K]

La conductancia equivalente viene dada por la ecuación (2.26):

$$A_2 F_{2-1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_2(1-\epsilon_2)} + \frac{1}{A_2 F_{2-1}} + \frac{1}{A_1(1-\epsilon_1)} \right)} \quad (2.26)$$

Se determinará la variable F_{2-1} de la ecuación (2.27) la cual se refiere al factor de forma entre dos áreas.

$$X = \frac{ri}{a}, Y = \frac{L}{a}$$

$$A = Y^2 + X^2 - 1, B = Y^2 - X^2 + 1$$

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left[\sqrt{(A+2)^2 + (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} + B \sin^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (2.27)$$

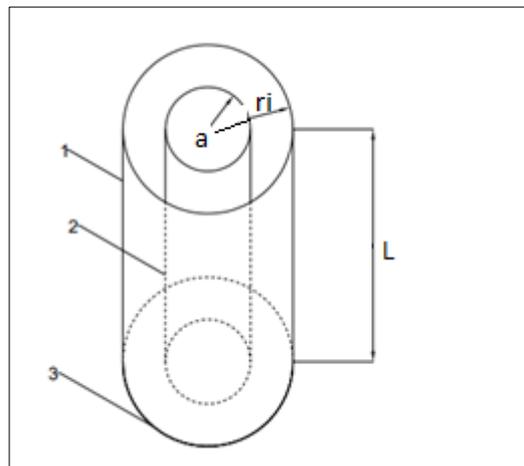


Figura 2.13 Factor de forma para cálculo de calor por radiación

Fuente: (Incropera,2009)

El balance de energía en la pared interna del recipiente se realiza para obtener la ecuación (2.28) con la cual se definió la temperatura interna del recipiente y el área requerida para el serpentín mediante interacciones numéricas

$$Q_{\text{radiación}} = Q_{s,i-\infty}$$

$$AF\sigma(T_{s,i}^4 - T_z^4) = \frac{T_\infty - T_{s,i}}{\sum R_{\text{total}}} \quad (2.28)$$

$$\sum R_{\text{total}} = \sum R_{\text{conducción}} + \sum R_{\text{convección}}$$

$$\sum R_{total} = \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_e}\right)}{2\pi k_{aislant}L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_{acero}L} + \frac{1}{2\pi r_a L h} \quad (2.29)$$

Remplazando la ecuación (2.29) en (2.28) se tiene:

$$A_2 F_{2-1} \sigma (T_{S,i}^4 - T_z^4) = \frac{T_\infty - T_{S,i}}{\frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_e}\right)}{2\pi k_{aislant}L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_{acero}L} + \frac{1}{2\pi r_a L h}} \quad (2.30)$$

Cálculo del Área del serpentín

Para determinar el área total del serpentín, se calcula el área necesaria para la transferencia de masa, a la cual se le suma el área calculada en la transferencia de calor por radiación mediante la ecuación (2.31) (Dossat, 2002)

$$\dot{m}_s = \frac{DA_s(PF - PS)}{RT\Delta X} \quad (2.31)$$

Donde:

D : Difusividad del agua [m^2/s]

PF : Presión parcial del agua en el frente de sublimación [Pa]

PS : Presión parcial del agua en la superficie del producto [Pa]

A_s : Área de transferencia de masa [m^2]

ΔX : Espesor del producto [m]

T : Temperatura del producto [$^\circ K$]

R : Constante de los gases Ideales [$kJ/kg \cdot K$]

$$A_s = \frac{\dot{m}_s R T \Delta X}{D(PF - PS)} \quad (2.32)$$

Con la ecuación (2.32) se obtiene el área que se requiere para que se produzca la deposición del vapor de agua extraído de la muestra y se lo deposite en el serpentín.

Cabe aclarar que el serpentín también recibe calor en forma de radiación de las paredes del recipiente, por lo que el área total que se requiere para la transferencia de masa y calor con la ecuación (2.33) (Cengel & Boles, 2012)

$$A_T = A_S + A_2 \quad (2.33)$$

CAPÍTULO 3

3. ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en el diseño y selección de los componentes del equipo liofilizador, así como el análisis y validación de estos. También se describe parte del proceso de construcción y pruebas de funcionamiento del equipo, así como el análisis de costos de construcción de este.

3.1 Resultados diseño y selección de los componentes del equipo liofilizador.

En esta sección se detalla los resultados obtenidos aplicando las ecuaciones, así como la adaptación de estos a la adquisición de equipos y componentes.

3.1.1 Capacidad de unidad condensadora seleccionada.

Empleando las ecuaciones presentadas en el Capítulo 2 se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1, en la misma se indica la capacidad de la unidad condensadora seleccionada. Cabe mencionar que la capacidad de la unidad seleccionada es superior al valor calculado, el motivo principal se debe a la disponibilidad de adquisición de estas unidades, por lo cual se seleccionó la que mejor se ajustaba a los datos obtenidos.

Tabla 3.1 Tabla de Resultados Unidad Condensadora

Capacidad calculada	600 BTUh
Capacidad Seleccionada	1637 BTUh
Compresor Calculado	1/16 HP
Compresor Seleccionado	1 HP

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.1.2 Dimensiones del serpentín evaporador.

Del análisis de transferencia de masa y calor, se obtienen los resultados en Tabla 3.2. Cabe indicar que con el área proporcionada se garantiza que sea suficiente para atrapar la humedad que se extrae de la muestra durante el proceso de liofilización, y como resultado evitar el deterioro acelerado que podría causarle a la bomba de vacío. Los detalles de cálculos se muestran en apéndice B.

Tabla 3.2 Tabla de Resultados del Serpentín Evaporador

Área Calculada	0.24 m ²
Número de Vueltas del Serpentín calculada	12
Área del serpentín Construido	0.26m ²
Diámetro interno del Bobina del Serpentín	220 mm
Número de Vueltas del Serpentín construido	13
Altura de Serpentín	150 mm
Diámetro de la cañería inoxidable	9.52 mm
Longitud de la cañería	8.6 m

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.1.3 Capacidad de bomba de vacío seleccionada.

A continuación, en Tabla 3.3 se muestra las características del equipo seleccionado. El equipo proporciona una presión de trabajo de 3 Pa (0.03 mbar) que equivale a estar situado en la zona de bajo y medio vacío, en que generalmente operan la mayoría de liofilizadores. (LEYBOLD, 2007)

Por lo antes mencionado se garantiza alcanzar la presión de vacío por debajo del punto triple y por lo tanto asegurar que ocurra la sublimación que producirá el secado de la muestra alimenticia.

Tabla 3.3 Tabla de Resultados Bomba de Vacío

Presión de vacío	0.03 mbar
Velocidad de bombeo Calculada	2.50 CFM
Velocidad de bombeo seleccionada	6 CFM
Potencia	0.5 HP

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.1.4 Dimensiones del recipiente de muestra y de la trampa de frío.

Tanto el recipiente de muestras como el recipiente de trampa de frío fueron diseñadas bajo la norma ASME sección VIII. El valor de espesor obtenido empleando las ecuaciones de ASME mostradas en la sección 2.2 se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Tabla de Resultados

Espesor calculado Trampa	0.052 mm
Espesor calculado Muestra	0.052 mm
Espesor Seleccionado	2 mm
Diámetro externo de R. Trampa	350mm
Altura de R. Trampa	300mm
Diámetro externo de R. Muestra	350mm
Altura de R. Muestra	200mm

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.2 Simulación de componentes del equipo liofilizador.

En esta sección se realizó la simulación de algunos componentes del equipo de liofilización, con el fin de realizar una validación de los resultados obtenidos mediante las diferentes ecuaciones utilizadas.

3.2.1 Simulación del vacío en recipientes de muestra y trampa de frío.

El objetivo de la simulación es verificar que el espesor calculado en los recipientes bajo la Norma ASME, fueran los correctos. En la figura 3.1 y 3.2 muestran que el espesor de 2 mm es suficiente para soportar la presión de vacío, esto debido a que el factor de seguridad obtenido en la simulación es de 15 con lo que se concluye que el espesor del recipiente es el adecuado.

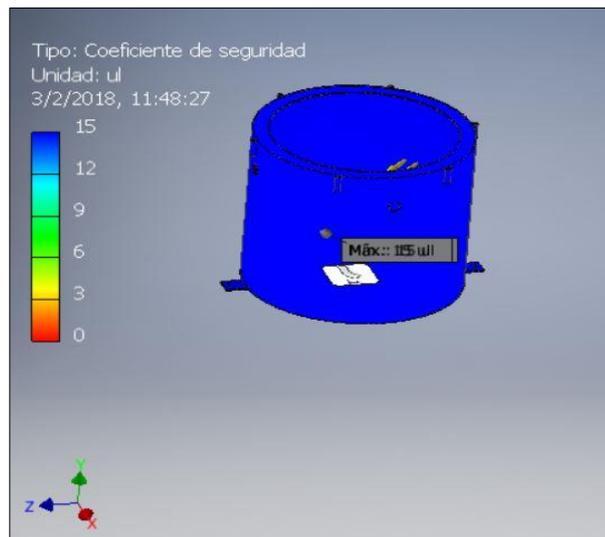


Figura 3.1 Resultado de factor de seguridad de la trampa por simulación

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

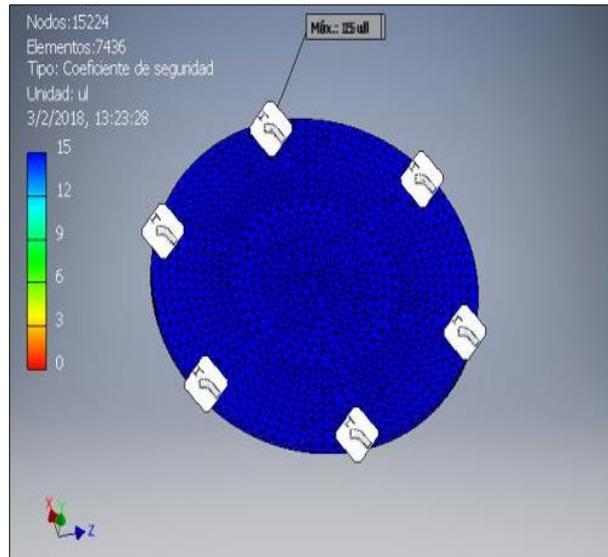


Figura 3.2 Resultado factor de seguridad de tapa de recipiente por simulación

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.3 Construcción y pruebas del equipo liofilizador.

3.3.1 Proceso de construcción

La manufactura del equipo se la realiza en base a los parámetros de diseño y materiales seleccionados tanto como para el sistema de vacío, sistema de refrigeración y la estructura del equipo

Trampa de frío y Cámara de muestras

Se elaboraron los respectivos planos (ver figura 3.3 y 3.4) para la adecuada construcción de los recipientes y así garantizar el correcto diseño de estos. En la elaboración se utilizó planchas de acero inoxidable AISI 304 de dimensiones de 3 mm de espesor y 4x8 metros. Se utilizó una plancha para los 2 recipientes.

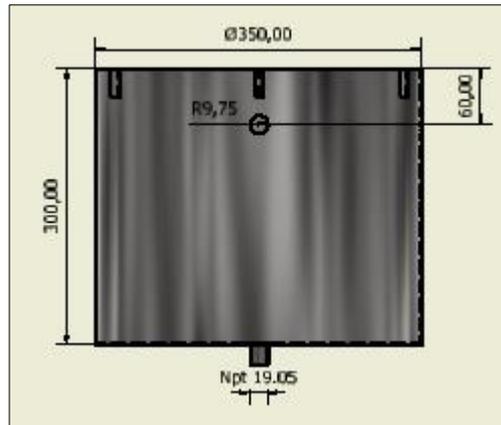


Figura 3.3 Dimensiones para construcción de trampa de frío

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

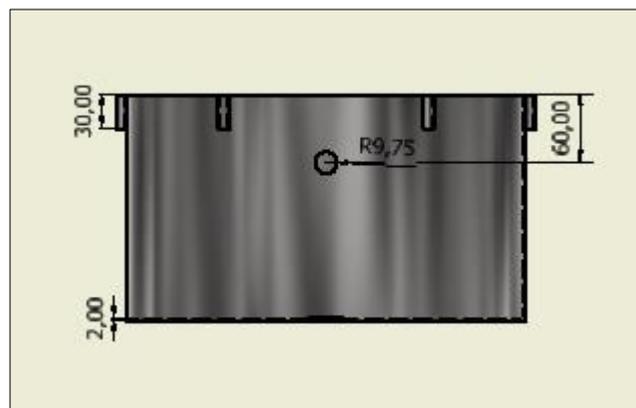


Figura 3.4 Dimensiones de construcción de recipiente de muestras

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

El corte de la plancha se lo realizo por oxicorte el cual permite un corte de alta precisión a las dimensiones requeridas, luego se unieron sus juntas mediante soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) con electrodo 308L-16. Ver figura 3.5.

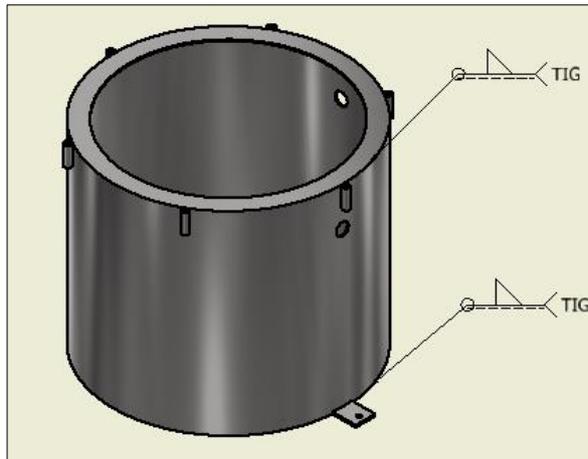


Figura 3.5 Proceso de soldado para trampa de frío

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.3.2 Prueba de Estanqueidad en Recipientes de muestras y trampa de frío.

La característica principal que deben presentar ambos recipientes es la de proporcionar una excelente hermeticidad durante el proceso de liofilización. Para verificar la hermeticidad se realizó la prueba de estanqueidad, para la cual se empleó la bomba de vacío, y un vacuómetro como instrumento de verificación de vacío.

Dado que los recipientes estarán sometidos a presión de vacío es necesario verificar que estos se encuentren herméticos, es decir debido a la diferencia de presión en el recipiente y la atmosférica se debe asegurar que no exista infiltraciones y prevenir el ingreso de partículas de agua, si esto llegase a suceder el vacío no alcanzara la presión deseada de 3 Pa y como consecuencia no se obtendrá el proceso de liofilizado, además la bomba extraerá agua y su tiempo de vida disminuirá.

El control del vacío se lo realizo con un vacuómetro este se conectó en serie con los recipientes en cada prueba. Ver figura 3.6



Figura 3.6 Pruebas de estanqueidad en el recipiente de la trampa de frio y recipiente de muestras

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Cabe recalcar que estas pruebas también se las realizaron a las conexiones para descartar cualquier otra fuga ajena a los recipientes, como se muestra en la figura 3.7



Figura 3.7 Pruebas de estanqueidad en conexiones

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.3.3 Prueba de Estanquidad en el Serpentín evaporador.

Para esta prueba se soldó una de las salidas del evaporador con el fin de sellarla y no tener fugas, luego se coloca la manguera del árbol de manómetros al regulador del cilindro con gas inerte (nitrógeno) y por la salida no soldada del evaporador se acopla otra manguera de y posteriormente se abre la válvula del regulador y se presuriza el ducto hasta alcanzar valores sobre la presión de diseño de 19 psi o 137.7 KPa, con

esto se asegura que a la presión de trabajo, el sistema no presentara fugas. Después de cierto tiempo de haber dejado presurizado el sistema, se verifica que la lectura del manómetro de 125 psig o 861 KPa (presión de prueba) no hubiese disminuido (ver figura 3.8), en caso contrario la tubería del evaporador presentara fugas y debe ser reparada.

Para la verificación final se coloca el evaporador en un recipiente completamente lleno de agua (ver figura 3.9) para de manera visual verificar que en las uniones que existen en el serpentín evaporador no generen burbujas, caso contrario se debe corregir el problema y conectar nuevamente.



Figura 3.8 Lectura de manómetro de 125 psig no disminuyó durante las pruebas

Fuente: (Elaboración propia, 2017)



Figura 3.9 Se verifica que no se formen burbujas

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

3.3.4 Prueba de funcionamiento del equipo.

El objetivo de esta prueba fue para verificar el comportamiento del equipo de refrigeración, además de conocer el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura deseada en el serpentín evaporador (-40°C), para esta prueba se emplearon cuatro medidores de temperatura y un instrumento patrón para corregir los valores medidos. Se los ubicó de la siguiente manera:

T1: Temperatura medida dentro del recipiente, a la entrada del serpentín.

T2: Temperatura medida en funda donde estará ubicado el sensor de monitoreo de temperatura dentro del recipiente.

T3: Temperatura medida a la salida del serpentín, pero exterior al recipiente.

T4: Temperatura medida en la superficie externa del serpentín.

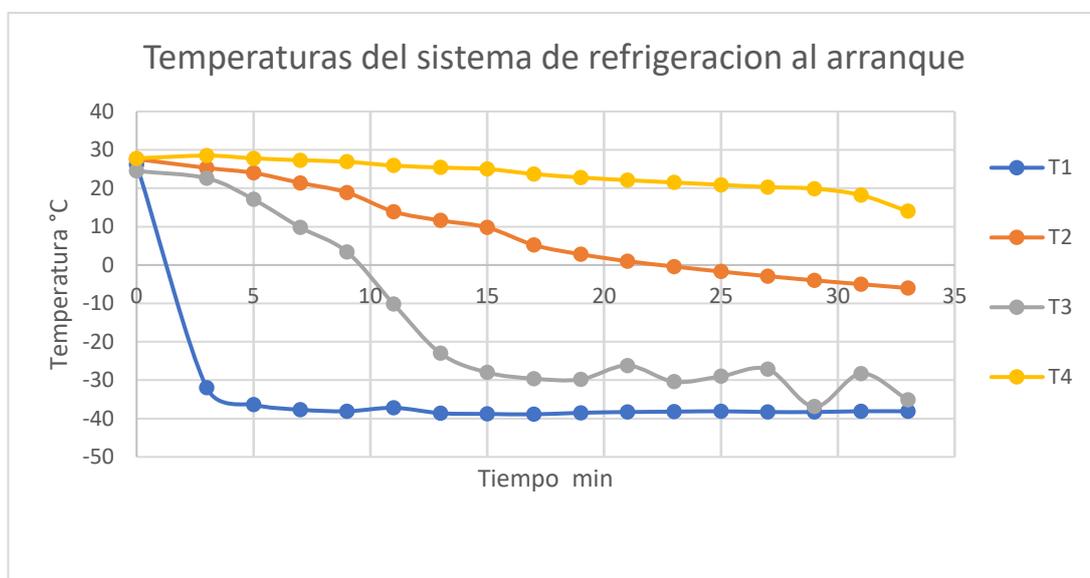


Figura 3.10 Grafica de estabilización de temperatura del sistema de refrigeración

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

De la figura 3.10 se definió que el equipo de refrigeración se debe encender como mínimo 20 minutos antes de empezar a liofilizar.

3.3.5 Resumen de resultados

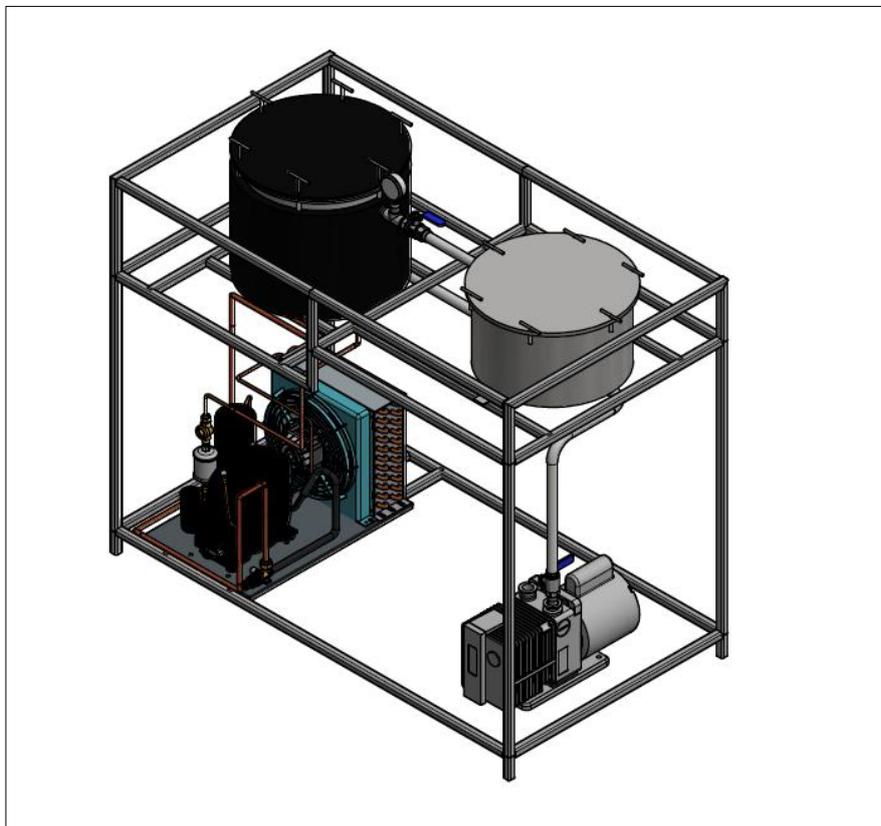


Figura 3.11 Diseño final de prototipo liofilizador.

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Tabla 3.5 Resumen de resultados

Componente del equipo	Descripción
Bomba de vacío	Bomba de 6 CFM y potencia de 0.5HP
Unidad condensadora	Capacidad de remoción de calor de 1637 BTUh y 1HP de potencia. Con refrigerante 404a
Recipientes de vacío	Dos recipientes de 2 mm de espesor, fabricados en acero inoxidable.
Serpentín evaporador	Área de transferencia de calor 0.24 m ²

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

En Tabla 3.5 se muestra las capacidades y dimensiones de los componentes que conforman el equipo liofilizador.

3.3.6 Prueba de secado en el Prototipo

La prueba de secado (deshidratado) de una muestra alimenticia, fue el último paso, para la validación del correcto Diseño y funcionamiento del equipo de liofilización. Esta prueba consistió en liofilizar una muestra de naranjilla cortada en rodajas de espesor de 5mm y con una masa húmeda total de 0.0655 Kg.

Dentro de los parámetros que se tuvieron en cuenta para proceder a liofilizador además de los ya mencionados, fue la temperatura recomendada para la desecación de -10°C de la muestra con el fin de que la misma ingrese completamente congelada, la temperatura del serpentín en la trampa de -40°C y la verificación de la generación de vacío en el sistema (3 Pa).

Para la puesta a punto del equipo se siguieron las instrucciones descritas en el en instructivo de funcionamiento del equipo (Ver Apéndice A). Con el equipo preparado se colocaron las muestras en la cámara de secado como se muestra en Figura 3.12 y se procedió a sellar el recipiente para empezar a realizar vacío, se verifico que no exista perdidas de vacío y se mantuvo 2 días en operación el equipo, con la finalidad de poder obtener muestras de naranjilla secas bajo características similares a las de equipos comerciales.



Figura 3.12 Colocación de muestras en la Cámara de secado

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Luego de los dos días de operación del equipo liofilizador se procedió a la extracción de las muestras liofilizadas, para lo cual se rompió el vacío en la cámara de muestras y posteriormente se retiró la tapa del recipiente. Se pudo realizar una inspección visual y palpar que en las muestras se habían producido deshidratación como se muestra en figura 3.13. Posteriormente se enviaron las muestras al laboratorio para realizarle análisis de actividad de agua.



Figura 3.13 Inspección Visual de Secado de naranjilla

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Otra prueba de observación que se realizó fue la verificación de formación de hielo en la superficie del serpentín evaporador, Para lo cual se apagó la bomba de vacío y posteriormente el sistema de refrigeración, se rompió el vacío en la trampa de frío y se retiró la tapa del recipiente como se indica en el instructivo de Apéndice A. Se observó que se había formado una fina capa de hielo en la superficie del serpentín como se muestra en figura 3.14.



Figura 3.14 Inspección formación de hielo en el serpentín de la trampa de Frío

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Las dos verificaciones visuales mostraron evidencia del funcionamiento del equipo, la última verificación del correcto funcionamiento del liofilizador corresponde a los resultados de la actividad de agua de la muestra secada en el prototipo y compararla con el equipo comercial utilizado para la validación del equipo.

En la deshidratación de los alimentos, los parámetros físico-químicos más relevantes para cerciorar una correcta deshidratación son la actividad de agua (AW) y la humedad. Ambos parámetros son indicadores de calidad de alimentos y afectan directamente a la estabilidad de estos, ya que gracias a la disminución del contenido de agua se reduce la proliferación de microorganismos y la velocidad de reacciones enzimáticas y químicas que originan la putrefacción del alimento. (Singh & Heldman, 2009)

Con la liofilización se consigue remover casi la totalidad del agua del alimento tratado, alcanzando valores de humedad en torno al 10%. Esta reducción de humedad confiere al alimento un mayor tiempo de vida útil y menor peso en el producto final.

Para verificar que el prototipo de liofilizador fue desarrollado correctamente, se procedió a evaluar la Aw y la humedad de rodajas de naranjilla liofilizadas en un liofilizador comercial y en el prototipo diseñado.

Tabla 3.6 Resultados de Humedad y actividad de agua de la naranjilla

Muestra	Humedad (%)	Actividad de Agua (Aw)
Muestra fresca	91,38±1,30	0,993±0,001
Liofilizador comercial	8,736±0,26	0,434±0,015
Liofilizador prototipo	6,27±0,08	0,338±0,001

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Como se puede observar en la Tabla 3.6, con el tratamiento de liofilización se consigue reducir tanto la Aw, como la humedad de las muestras tratadas. El contenido de humedad paso de 91,38% a 6,27 %, el valor de Aw se redujo de 0,93 a 0,33.

Cabe señalar que, en los dos procesos de liofilización, se consigue alcanzar valores de humedad inferiores al 10% con respecto a la muestra fresca, obteniéndose valores más bajos con el prototipo diseñado. Del mismo modo la Aw de agua también resultó inferior cuando la deshidratación de la muestra fue llevada a cabo por el prototipo.

3.4 Análisis de costos del equipo liofilizador.

En esta sección se determina el costo energético de operación, así como los costos de todos los elementos que conforman el equipo liofilizador. Para lograr identificar los costos de los sistemas involucrados en el equipo estos

se ordenan de la siguiente manera: sistema de vacío, sistema de refrigeración y adicionalmente la estructura.

Costos energéticos de operación

Se calcula el costo energético del sistema en el cual e indicará la relación de costo/día para obtener una muestra liofilizada.

$$\text{Costo de kW-h sector industrial} = 0.0912 \frac{\$}{\text{kW-h}}$$

$$\text{Potencia del Compresor} = 1 \text{ hp} = 0.7457 \text{ kW}$$

$$0.7457 \text{ KW} * 30 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = 22.37 \frac{\text{kW-h}}{\text{dia}}$$

Costo del consumo energético del compresor

$$\begin{aligned} &= 22.37 \frac{\text{kW-h}}{\text{dia}} * 0.0912 \frac{\$}{\text{kW-h}} \\ &= 2.04 \frac{\$}{\text{dia}} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia del Compresor} = \frac{1}{2} \text{ hp} = 0.373 \text{ kW}$$

$$0.373 \text{ KW} * 30 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = 11.18 \frac{\text{kW-h}}{\text{dia}}$$

Costo del consumo energético de la bomba de vacío

$$\begin{aligned} &= 11.18 \frac{\text{kW-h}}{\text{dia}} * 0.0912 \frac{\$}{\text{kW-h}} \\ &= 1.02 \frac{\$}{\text{dia}} \end{aligned}$$

$$\text{Costo total de consumo energético} = 2.04 + 1.02 = 3.06 \frac{\$}{\text{dia}}$$

Se tiene un costo de operación por muestra liofilizada \$ 3.06 (tres dólares con seis centavos por día), en este cálculo intervienen las principales componentes de consumo eléctrico siendo estas el compresor de 1 hp de la unidad condensadora y la bomba de vacío de 0.5 hp.

Tabla 3.7 Tabla de costos de recipientes y elementos mecánicos del sistema de vacío

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor Total
Recipientes				
Plancha de acero inoxidable, espesor 3mm de 4x8m	U	1	\$165	\$165
Sello de silicón rojo	U	2	\$ 40	\$ 80
Tubos de silicón permatex rojo	U	2	\$ 2,5	\$ 5
Mano de obra de construcción	U	2	\$ 100	\$ 200
			Subtotal	\$ 450
Bomba y conexiones de Vacío				
Bomba de vacío	U	1	\$800	\$ 800
Válvula de 1/2 in	U	2	\$ 30	\$ 60
válvula de 3/4 in	U	1	\$ 45	\$ 45
niples 3/4 in	U	2	\$ 3,5	\$ 7
niple 1/2 in	U	1	\$2,6	\$ 2,6
te 3/4 in	U	1	\$ 2,5	\$ 2,5
Abrazadera metálica 3/4 in	U	2	\$ 0,3	\$ 0,6
Abrazadera metálica 1/2 in	U	2	\$ 0,2	\$ 0,4
Bushing 3/4 - 3/8 in	U	1	\$ 0,9	\$ 0,9
Bushing 3/8 - 1/4 in	U	1	\$ 0,7	\$ 0,7
codo 1/2 in	U	2	\$ 3,5	\$ 7
codo 3/4 in	U	1	\$4,5	\$4,5
Adaptador de Manguera 1/2 in	U	2	\$5,4	\$ 10,8
Adaptador de manguera 3/4 in	U	2	\$7,8	\$ 15,6
Grasa de Vacío	U	1	\$20	\$ 20
			Subtotal	\$ 977,6

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

Para la fabricación de los recipientes que conforman el sistema de vacío se requirió de mano de obra de especialistas en el área de soldadura por TIG (Tungsten Inert Gas) que significó un costo de \$ 400 (cuatrocientos dólares americanos), además de accesorios para la instalación del sistema de vacío alcanzando un valor de \$ 977.6 (novecientos setenta y siete dólares con sesenta centavos de dólares americanos). Cabe recalcar que este valor es representativo por la bomba de vacío siendo esta una de las más

económicas, y cumple con las condiciones de trabajo. El costo es de \$ 1427 (mil cuatrocientos veinte y siete dólares americanos).

Tabla 3.8 Tabla de Costos de partes de sistema de refrigeración e instalación

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor Total
Serpentín				
Tubing acero inoxidable 3/8 in x 6m	U	2	\$ 53	\$106
Tanque de oxígeno 10 metros cúbicos	U	1	\$ 34	\$ 34
Unión inoxidable Roscada 1/8 in	U	3	\$ 3	\$ 9
Mano de obra de construcción	U	1	\$ 40	\$ 40
			subtotal	\$ 189
Sistema de refrigeración				
Unidad Condensadora	U	1	\$ 700	\$ 700
Mano de obra de instalación	U	1	\$ 200	\$ 200
			subtotal	\$ 900

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

La fabricación del serpentín fue realizada en acero inoxidable, por lo que se requirió en expertos en soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) a un costo de fabricación de \$189 (ciento ochenta y nueve dólares americanos).

La instalación del serpentín evaporador a la unidad condensadora fue realizada por personal dedicado a la instalación de sistemas de refrigeración a un costo total de \$ 1089 (mil ochenta y nueve dólares americanos)

Tabla 3.9 Tabla de costos de estructura de soporte del equipo

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor Total
Estructura				
Tubo cuadrado acero A36, de 25mmx2mm	U	4	\$ 8	\$ 32
Disco abrasivo	U	1	\$ 1	\$ 1
Hoja de sierra	U	2	\$1,5	\$ 3
Lijas para metal N°100	U	3	\$ 0,4	\$ 1,2
Electrodos E6011	kg	2	\$ 3,5	\$ 7
Pintura anticorrosiva color negro	Lt	0,5	\$11,5	\$ 5,75
Brocha de 2 in	U	2	\$1,5	\$ 3
Diluyente de pintura	Lt	1	\$ 2	\$ 2
Broca 3/8 in	U	1	\$ 0,6	\$ 0,6
Mano de obra para construcción	U	1	\$ 100	\$ 100
			Subtotal	\$ 155,55

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

En Tabla 3.9 se muestra que el costo de fabricación de la estructura del gabinete del equipo liofilizador es de \$155,55 (ciento cincuenta y cinco con cincuenta y cinco centavos de dólares americanos).

Tabla 3.10 Resumen de costos

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor Total
Recipientes	U	2	\$225,00	\$450,0
Bomba de vacío/conexiones	U	1	\$977,60	\$977,6
Serpentín	U	1	\$189,00	\$189,0
Sistema de refrigeración	U	1	\$900,00	\$900,0
Estructura	U	1	\$155,55	\$156,0
Costo de diseño	U	2	\$700,00	\$1.400,0
			Total	\$4.072,6

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

El costo total de construcción del equipo liofilizador es de \$ 4072,6 (cuatro mil setenta y dos dólares americanos con sesenta centavos), como se muestra en la Tabla 3.10.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se realizó el estudio del fenómeno físico de la sublimación que es el principio fundamental en el cual se basa el proceso de liofilización de productos, y se realizó el diseño de un equipo que cumple con las condiciones impuestas en el planteamiento del problema. Durante el transcurso del diseño se decidió dividir el equipo en dos sistemas con el fin seccionar el trabajo de diseño y la posterior manufactura de los componentes.

Dado que el equipo será utilizado para liofilizar muestras de laboratorio se definió que el equipo tendrá la capacidad para secar 0.5 kg de producto. Con este dato se inició un proceso de selección de los elementos que componen el sistema de vacío. Una de las condiciones más importantes para la selección de la bomba de vacío es que tenga la capacidad de alcanzar una presión de 3 Pa para que se produzca la sublimación, para la cual se seleccionó una bomba que cumpliera con las características mencionadas y con un precio accesible.

En cuanto al sistema de refrigeración se realizó el cálculo de cargas térmicas para determinar la capacidad de remoción de calor y masa del serpentín evaporador y su respectiva unidad condensadora. El refrigerante seleccionado fue el R404a, debido a que permite alcanzar una temperatura de -40°C en la superficie del serpentín, con esta temperatura aseguramos que dentro de la trampa de frío exista un gradiente de temperatura que permita la deposición del vapor de agua extraído de la muestra y evitar daños en la bomba de vacío.

El inconveniente en la selección fue que se tuvo que adquirir una unidad condensadora de mayor capacidad de la requerida debido a la condición de temperatura y a la poca disponibilidad de equipos en el mercado local.

4.1 Conclusiones

Se diseñó un equipo liofilizador que posee un sistema de generación de vacío que tiene la capacidad de alcanzar presiones de hasta 3 Pa lo cual hizo posible que la muestra a secar alcance la sublimación. Esto se lo verificó al momento de realizar las pruebas de vacío en el sistema.

También se diseñó el sistema de refrigeración que tiene la capacidad de alcanzar una temperatura que garantiza que la humedad extraída del producto pueda depositar en el serpentín de evaporación y de esta manera lograr proteger y alargar la vida útil de la bomba de vacío.

Además, se realizaron planos de diseño y construcción del equipo liofilizador, así como su respectivo manual de operación y mantenimiento de este, con el fin instruir al usuario en la utilización de este.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda leer las indicaciones expuestas en el instructivo de operación del equipo, con el fin de mantener en buenas condiciones de funcionamiento.

Uno de los problemas que podría presentarse en el sistema de vacío es con respecto al sellado o al sello que se coloca entre el recipiente y la tapa de este, por lo que es recomendable utilizar una cantidad adecuada de grasa de vacío para minimizar el efecto de fugas, ya que estas bajan el rendimiento, por lo que se debe usar en lo posible la grasa recomendada en el manual de operaciones.

Para un futuro rediseño del equipo, con la finalidad de hacerlo más eficiente, se recomienda reducir la distancia y el tamaño de la cámara de muestras, al hacer esto la muestra a secar estará más cerca a la trampa, lo que produciría una reducción en pérdidas que actualmente existen entre la trampa y la cámara de muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbosa, C. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Zaragoza, España: ACRIBIA S.A.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. New York: McGraw Hill.
- Dossat, R. (2002). *Principios de Refrigeración*. Mexico: CECOSA.
- Fellows, P. (1993). *Tecnología del Proceso de los alimentos, Principios y Prácticas*. Zaragoza, España: ACRIBIA S.A.
- Gas Servei S.A. (15 de noviembre de 2017). *Gasservei especialistas en gases refrigerantes*. Obtenido de <https://www.gas-servei.com>
- Hoffman, D., & Thomas, J. (2000). *HANDBOOK OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY*. San Diego: Academic Press.
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). *Introducción a la transferencia de Calor*. Mexico: Person Education.
- LABCONCO. (15 de 10 de 2017). *Labconco*. Obtenido de <http://www.labconco.com/>
- LEYBOLD. (2007). *Fundamentals of Vacuum Technology*. Alemania.
- Mascheroni, R. (2010). *Operations in food Refrigerator*. CRC Press.
- Megyedy, E. (2000). *Manual de recipientes a Presión*. Mexico: Grupo Noriega Editores.
- Metals, A. S. (1992). *Metals Handbook*. California.
- Norton, R. (2011). *Diseño de Maquinas*. Mexico: Pearson Education.
- Peña, S., & Parra, H. (2015). *Diseño y construcción de un liofilizador para el secado de plantas aromaticas (Tesis inedita grado)*. Bogotá DC.
- Shigley, R. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Mexico: Mc Graw-Hill.
- Singh, P., & Heldman, D. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Nebraska: Academic Press.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Manual de funcionamiento y operación

Manual de funcionamiento

Pasos para el uso del equipo:

1. Asegurarse que los recipientes se encuentren en su interior totalmente libres de cualquier sustancia como grasa, agua, etc. Con el fin de evitar que estas emigren a la bomba de vacío y disminuya su tiempo de vida.
2. Introducir el producto congelado en el recipiente de muestras, la cual debe ser procesada, es decir, estará recortado en rebanadas finas de aproximadamente 5 mm de espesor con el fin de asegurar un proceso de deshidratado uniforme.
3. Colocar grasa de vacío en el empaque de silicón rojo para posteriormente colocar la tapa, esto se realiza en ambos recipientes.
4. Inspeccionar que las válvulas de servicio en la salida de la bomba y en la salida de la trampa de frío se encuentren completamente cerradas.
5. Revisar que el nivel de aceite de la bomba de vacío sea el requerido, esto se observa en el visor frontal, donde el nivel de aceite deberá estar siempre hasta donde se indica es decir hasta OIL LEVEL
6. Encender la bomba de vacío y abrir la válvula de servicio a la salida de esta, luego esperar aproximadamente 5 minutos y abrir la segunda válvula de servicio que se encuentra entre la trampa de frío y el recipiente de muestras hasta obtener la mínima lectura del vacuómetro, esto será indicativo que los recipientes están a presión de vacío.
7. Encender el sistema de refrigeración, mediante el interruptor ubicado en la parte delantera del equipo hasta que el serpentín alcance una temperatura requerida de -39°C.
8. El equipo estará en funcionamiento durante aproximadamente 36 horas
9. En el apagado del equipo se deben seguir las siguientes indicaciones:
 - I. Se alivia el vacío del sistema mediante la conexión en la bomba que no se encuentra en servicio, una vez abierta esta salida se espera entre 1 a 2

segundos para apagarla, se procede a retirar producto liofilizado del recipiente de muestras

- II. Se apaga el sistema de refrigeración mediante el interruptor, se deja descongelar a la temperatura ambiente durante 2 horas aproximadamente.

Manual de Mantenimiento

Se realizará el siguiente manual con la finalidad de alargar la vida útil del equipo prototipo, estas indicaciones ayudará a seguir con el cuidado pertinente de los principales sistemas involucrados tanto el de refrigeración y el sistema de vacío.

Bomba de vacío

La bomba de vacío al trabajar por prolongadas horas por lo cual se debe procurar el cambio de aceite en al menos una vez cada 36 horas de uso con esto se asegura que la bomba prolongue su tiempo de vida y cumpla con los requerimientos de presión de vacío, cabe recalcar que para realizar este procedimiento se deben utilizar los equipos de protección personal necesarios como: Guantes, Gafas, mascarilla.

El nivel de aceite no debe sobrepasar la marca señalada en el visor ubicado en la cara frontal de la bomba.

El aceite extraído se depositará en recipientes que sean de uso exclusivo para el reciclaje de este fluido.

Sistema de Refrigeración

Evaporador

Después del proceso de liofilización se deja descongelar el serpentín evaporador a temperatura ambiente. No utilizar ninguna clase de objeto para retirar el hielo el cual pueda afectar a la cañería.

Compresor

Se debe mantener limpia la carcasa para evitar que el compresor se deteriore por la humedad en su interior, además revisar que los anclajes se encuentren bien ubicados con sus respectivos cauchos para disminuir las vibraciones.

Condensador

El condensador es la unidad la cual está encargada de disipar calor mediante tuberías las cuales están expuestas a convección, por lo tanto, es importante la frecuente limpieza, de no ser así debido al polvo se creará una capa de aislante, la cual dificultará la disipación de calor como resultado de esto la eficiencia de la unidad condensadora disminuye.

Fugas de refrigerante

Se verificará en caso de ser necesario que no exista fugas de refrigerante en la tubería y conexiones a lo largo del sistema de refrigeración, uno de los métodos prácticos y sencillos consiste disolver detergente en agua creando una mezcla, la cual se aplica utilizando una esponja, de esta forma se creara burbujeos indicando las fugas en las conexiones o terminales.

APÉNDICE B

Cálculos

Cálculos del balance de masa

Para el cálculo del balance de masa se tomará como referencia medio kilo de naranjilla con 89.25% de humedad y se desea que el equipo extraiga el 90 % del agua retenida en la muestra, con el fin de obtener un producto con 8.9% de humedad.

$$X_a = 1 - 0.892 = 0.1$$

$$X_b = 1 - 0.089 = 0.91$$

$$X_c = 0$$

$$AX_a = BX_b + CX_c$$

$$0.5(0.1) = B(0.91) + C(0)$$

$$AX_a = 0.054 \text{ [Kg]}$$

$$A = C + B$$

$$C = 0.44 \text{ [Kg]}$$

Cálculo de espesor de recipiente

Empleando las ecuaciones de la norma ASME sección VIII, se procede a calcular el espesor mínimo del recipiente.

$$t = \frac{PR}{S\epsilon + .04P}$$

$$P = 14.7 \text{ [psi]}$$

$$R = 6.88 \text{ [in]}$$

$$S = 20000 \text{ [psi]}$$

$$\epsilon = 0.7$$

$$t = \frac{(14.7)(6.88)}{(20000)(0.7) + .04(14.7)}$$

$$t = 0.00722 [in] = 0.18 [mm]$$

Cálculo de Flujo Volumétrico de la Bomba

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \ln \frac{1013}{p}$$

$$t = 1/12 [h]$$

$$p = 0.03 \text{ mbar}$$

$$V = \pi * \left(\frac{0.296^2}{4} \right) * (0.30 + 0.20)$$

$$V = 0.034 \text{ m}^3$$

$$S_{eff} = \frac{0.034}{1/12} \ln \frac{1013}{0.03}$$

$$S_{eff} = 4.25 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

La velocidad de bombeo para que el sistema alcance una presión de vacío de 0.03 mbar en CFM que dada en:

$$S_{eff} = 2.50 [CFM]$$

Cálculos espesor de anillo

Tabla B.1 Datos para el cálculo del espesor de anillo

Datos	
Sy	241 [MPa]
P	141 [KPa]
W	6 [mm]
D	290 [mm]
N	2

Fuente (Elaboración propia)

Fuerza causada por la presión atmosférica:

$$F = PA$$

$$F = PwL$$

$$F = Pw\pi D$$

$$F/w = P\pi D$$

$$\frac{F}{w} = 92 \text{ [kN*m]}$$

$$F = 552 \text{ [kN]}$$

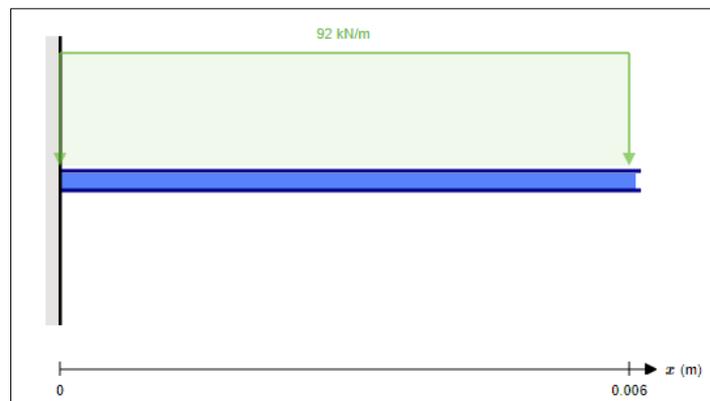


Figura B.1 Diagrama de fuerza distribuida

Fuente (Elaboración propia)

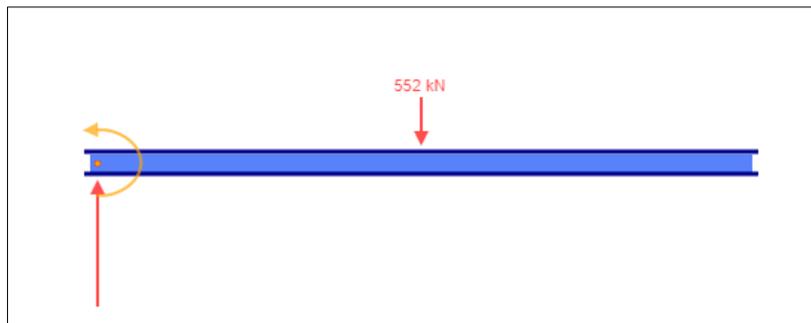


Figura B.2 Diagrama de Cuerpo Libre

Fuente (Elaboración propia)

$$\sum M = 0$$

$$M - F * w/2 = 0$$

$$M - 552 * 0.003/2 = 0$$

$$M = 1.65 \text{ [N*m]}$$

$$\sum F = 0$$

$$V - 552 = 0$$

$$V = 552 \text{ [m]}$$



Figura B.3 Diagrama de cortante máximo

Fuente (Elaboración propia)

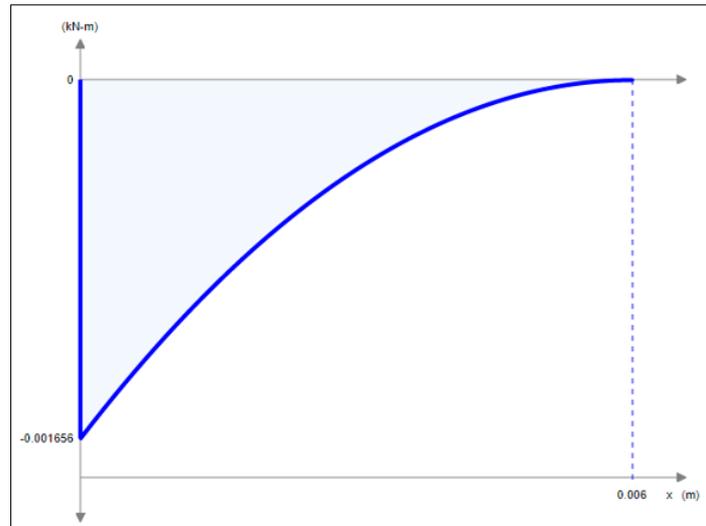


Figura B.4 Diagrama de Momento

Fuente (Elaboración propia)

Se calcula los esfuerzos flexión y cortante con el momento y cortante máximo respectivamente

Por flexión

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma = \frac{6M}{\pi D^3 z^2}$$

$$\sigma = \frac{6(1.65)}{0.91^3 z^2}$$

$$\sigma = \frac{10.9}{z^2} \text{ [Pa]}$$

Por Cortante

$$\tau = \frac{V}{A_l}$$

$$\tau = \frac{V}{w \pi D}$$

$$\tau = \frac{552}{w (0.91)}$$

$$\tau = \frac{606}{w} \text{ [Pa]}$$

Por Von Misses

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{\left(\frac{10.9}{z^2}\right)^2 + 3\left(\frac{606}{w}\right)^2}$$

Se asigna un valor de factor de seguridad de 2 al diseño y se iguala la ecuación de factor de seguridad a la obtenida por Von Misses

$$N = \frac{Sy}{\sigma'}$$

$$2 = \frac{2410000}{\sigma'}$$

$$\sigma' = \frac{2410000}{2}$$

Remplazando

$$\frac{2410000}{2} = \sqrt{\left(\frac{10.9}{z^2}\right)^2 + 3\left(\frac{606}{w}\right)^2}$$

Elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación e igualando a cero tenemos:

$$1.4x10^{16} * w^6 - 118x10^2w^2 - 110x10^4w^4 = 0$$

Se realizan interacciones para obtener el espesor mínimo con el respectivo factor de seguridad designado:

Tabla B.2 Resultados de espesor mínimo

w(m)	Resultado iteración
0,00028	-2,5115E-06
0,0003	-4,2291E-07
0,00032	2,93765E-06
0,00034	7,97176E-06
0,00036	1,51637E-05
0,00038	2,5091E-05
0,0004	3,84358E-05
0,00042	5,5997E-05

Fuente (Elaboración propia)

Como se observa en la tabla el espesor mínimo obtenido con un factor de seguridad de 2 es de 0.32 mm, si aumentamos el factor de seguridad el espesor aumentara, para nuestro diseño se utilizó un espesor de 2 mm ya que este es el de comercialización común dentro del mercado y al ser mucho mayor al obtenido en él cálculo se asegura que este no fallara.

Cálculo de calor de sublimación

Se calcula el calor de sublimación de la muestra.

$$q_s = L_s C$$

$$L_s = 1263 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$C = 0.44 \text{ [Kg]}$$

$$q_s = (2840)(0.44)$$

$$q_s = 1263 \text{ [KJ]}$$

Cálculo de calor por radiación

Suposiciones:

1. El area superficial es pequeña comparada con los alrededores
2. El aire ambiente esta en reposo

Asumiendo temperatura de superficie externa del recipiente y posteriormente determinar las propiedades a temperatura de fibra de la Tabla A.4 de Hincropera tenemos:

$$T_f = \frac{27 + 25}{2}$$

$$T_f = 299^\circ\text{C}$$

Propiedades a temperatura de fibra:

$$K = 26.3 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}, \gamma = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \alpha = 22.5 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \text{Pr} = 0.707, \beta = 3.34 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Numero de Rayleigh

$$RaD = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\gamma\alpha}$$

$$RaD = \frac{9.8 * 3.34 \times 10^{-3} * (27 - 25)(0.35)^3}{15.89 \times 10^{-6} 22.5 \times 10^{-6}}$$

$$RaD = 7.85 \times 10^6$$

Determinado el valor de Rayleigh se calcula el numero Nuselt mediante la siguiente expresion:

$$\overline{NuD} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 RaD^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{8/27}} \right\}^2 ; RaD \leq 10^{12}$$

$$\overline{NuD} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 (7.85 \times 10^6)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{0.707} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\overline{NuD} = 26.29$$

Ya obtenida esta aproximacion se procede al calculo del coeficiente de conveccion:

$$h = \frac{k}{D} \overline{NuD}$$

$$h = \frac{26.3 \times 10^{-3}}{0.35} 26.29 = 1.97 \frac{W}{m^2 K}$$

Para el cálculo del área de transferencia de calor por radiación del serpentín con respecto a la superficie interna del recipiente se definieron los siguientes parámetros:

Tabla B.3 Resultados de espesor mínimo

Datos	Nomenclatura	Magnitud	Unidades
Coeficiente de convección	h	1.97	w/m ² °K
Altura del recipiente de trampa de frío	L	0.30	m
radio aislante	ra	0,195	m
radio recipiente	re	0,175	m
radio interno de recipiente de trampa	ri	0,173	m
Diámetro de la bobina del serpentín	2a	0.22	m
Constante de Boltzmann	σ	5,67E-08	w/m ² °K
K aislante	Ka	0,034	w/m °K
K acero	Ks	19,4	w/m °K
emisividad	e	0,17	--
Temp. Medio	T	298	°K
Temp serpentín	Tz	233	°K

Fuente: Elaboración Propia 2017

Se calcula el factor de forma entre el serpentín y el interior de la trampa de vacío.

Para la siguiente expresión se toma como b= ri que corresponde al radio interno del recipiente de la trampa de frío

$$X = \frac{0.173}{0.11}, Y = \frac{0.3}{0.11}$$

$$X = 1.573, Y = 2.723$$

$$A = Y^2 + X^2 - 1, B = Y^2 - X^2 + 1$$

$$A = 8.911, B = 5.964$$

Remplazando en la ecuación

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left[\sqrt{(A+2)^2 + (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} + B \operatorname{sen}^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

$$F_{A_1-A_2} = 0.538$$

Se reemplaza el factor de forma a la ecuación de conductancia equivalente y se obtiene:

$$A_2 \mathcal{F}_{2-1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_2(1-\varepsilon_2)} + \frac{1}{A_2 \mathcal{F}_{2-1}} + \frac{1}{A_1(1-\varepsilon_1)} \right)}$$

De donde se tiene como incógnita el área correspondiente al serpentín A2 siendo $A_1 = 2\pi r_i L$

$$A_2 \mathcal{F}_{2-1} (T_{s,i}^4 - T_z^4) = \frac{T_\infty - T_{s,i}}{\frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_e}\right)}{2\pi k_{aislant} L} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_{acero} L} + \frac{1}{2\pi r_a L h}}$$

Remplazando los parámetros establecidos y realizando las interacciones se obtuvo el área de radiación de:

$$A_2 = 0.08 \text{ m}^2$$

Empleando el valor del área recientemente encontrada, procedemos a calcular el calor por radiación ganado por las paredes del recipiente, que será evacuado por el serpentín.

$$A_2 \mathcal{F}_{2-1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_2(1-\varepsilon_2)} + \frac{1}{A_2 \mathcal{F}_{2-1}} + \frac{1}{A_1(1-\varepsilon_1)} \right)}$$

$$A_2\mathcal{F}_{2-1} = 0.024 \text{ m}^2$$

$$q_{\text{radiación}} = A\mathcal{F}\sigma(T_{s,i}^4 - T_z^4)$$

$$q_{\text{radiación}} = 6.72 \text{ W}$$

Cálculo de la capacidad de la unidad condensadora

A continuación, se presentan los cálculos para determinar de la capacidad requerida, para la selección de la unidad condensadora. Para lo cual en tabla B.4 se definen los cuatro estados del ciclo de refrigeración para el refrigerante R404a.

Tabla B.4 Datos obtenidos de las propiedades termodinámicas R404a

Propiedades	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4
$h \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	345	1.638	258	258
$s \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$	1.608	395	-----	-----
$P \text{ [Bar]}$	1.33	17.5	17.5	1.33

Fuente: (Elaboración propia, 2017)

$$q_L = h_1 - h_4$$

$$q_L = 345 - 258$$

$$q_L = 87 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$q_h = h_2 - h_3$$

$$q_h = 395 - 258$$

$$q_h = 137 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

A continuación, se calcula el trabajo de compresor

$$W_C = h_2 - h_1$$

$$W_c = 395 - 345 = 50 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Se procederá a hacer el cálculo del flujo másico del refrigerante la cual relaciona el calor total del sistema y la capacidad de absorber calor del refrigerante en el serpentín evaporador.

$$Q_T = q_{\text{radiación}} + q_s$$

$$Q_T = 0.0164 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m} = \frac{Q_T}{h_L}$$

$$\dot{m} = 0.68 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Finalmente se puede calcular la potencia del compresor.

$$Pot_c = \dot{m} W_c$$

$$Pot_c = 0.012 \text{ HP}$$

Se requiere un compresor que tenga una potencia de 1/16 HP. Dado a que no se encontró una condensadora de ese tamaño se escogió la más pequeña existente en el mercado que fue de 1HP.

Cálculo del área del serpentín

Para determinar el área total del serpentín, se calcula el área necesaria para la transferencia de masa, a la cual se le suma el área calculada en la transferencia de calor por radiación.

$$\dot{m}_s = \frac{DA_S(PF - PS)}{RT\Delta X}$$

D : Difusividad del agua [m^2/s]

PF : Presión parcial del agua en el frente de sublimación [Pa]

PS : Presión parcial del agua en la superficie del producto [Pa]

A_S : Área de transferencia de masa [m^2]

ΔX : Espesor del producto [m]

T : Temperatura del producto [$^\circ K$]

R : Constante de los gases Ideales [$kJ/kg K$]

$$D = 1.9E-5 [m^2/s]$$

$$PF = 259.9 [Pa]$$

$$PS = 3 [Pa]$$

$$\dot{m}_s = 0.44 [kg/s]$$

$$\Delta X = 5 E-3 [m]$$

$$T = 260 [^\circ K]$$

$$A_S = \frac{\dot{m}_s RT \Delta X}{D(PF - PS)}$$

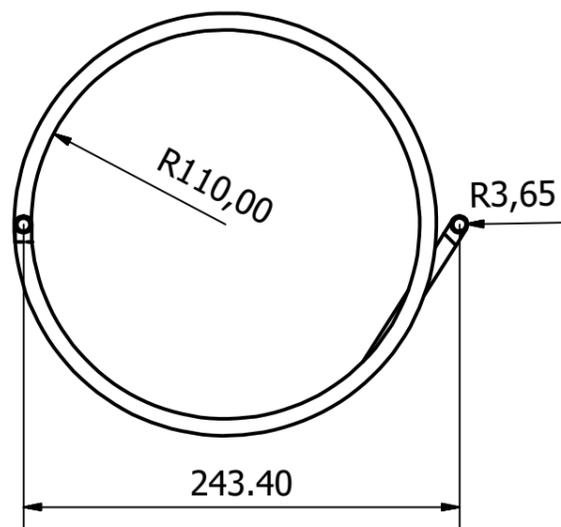
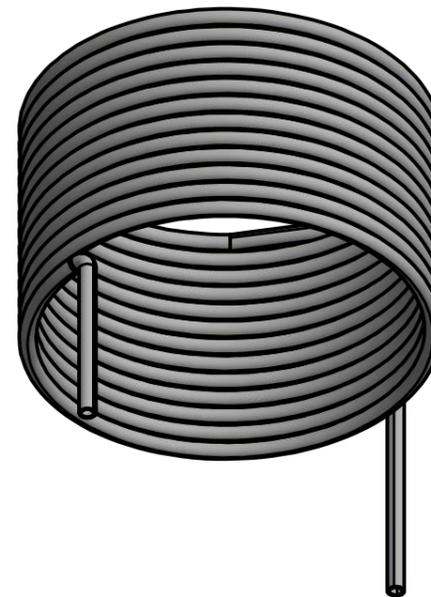
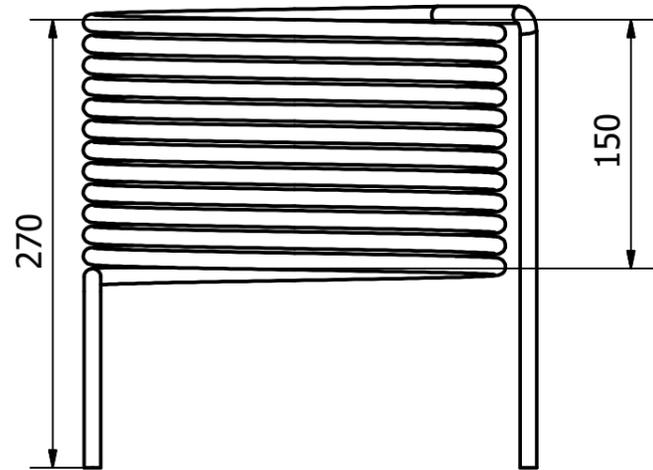
$$A_S = 0.149 m^2$$

$$A_T = A_S + A_2$$

$$A_T = 0.23 m^2$$

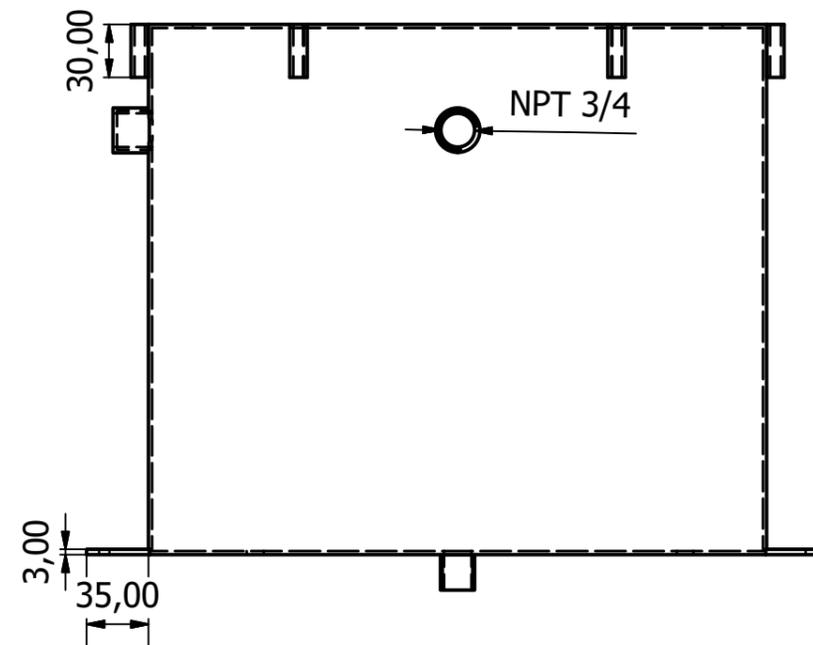
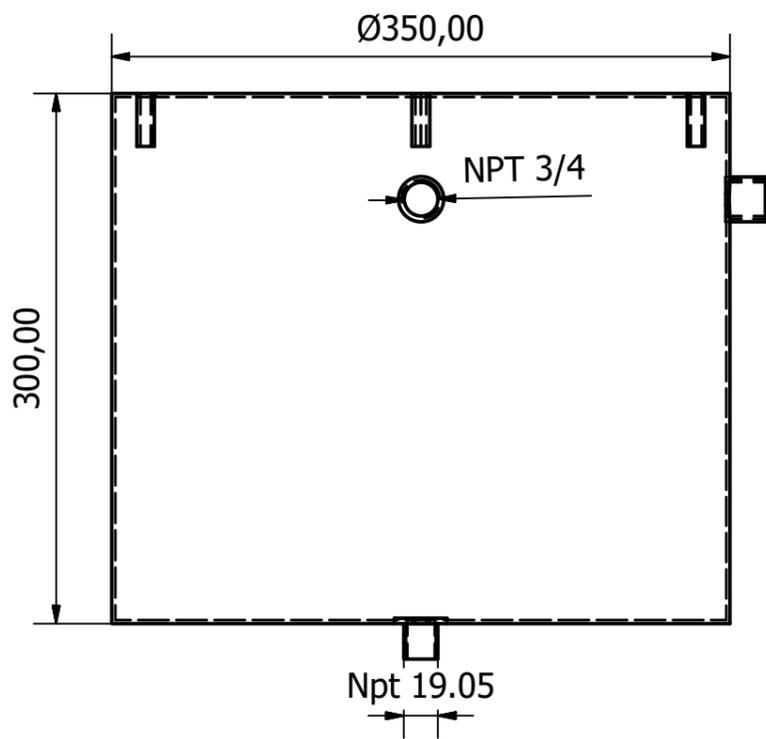
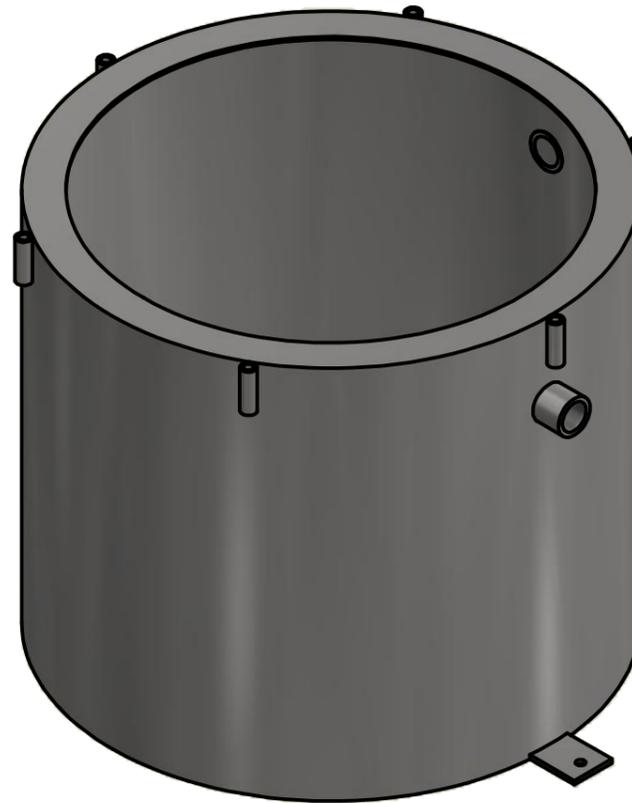
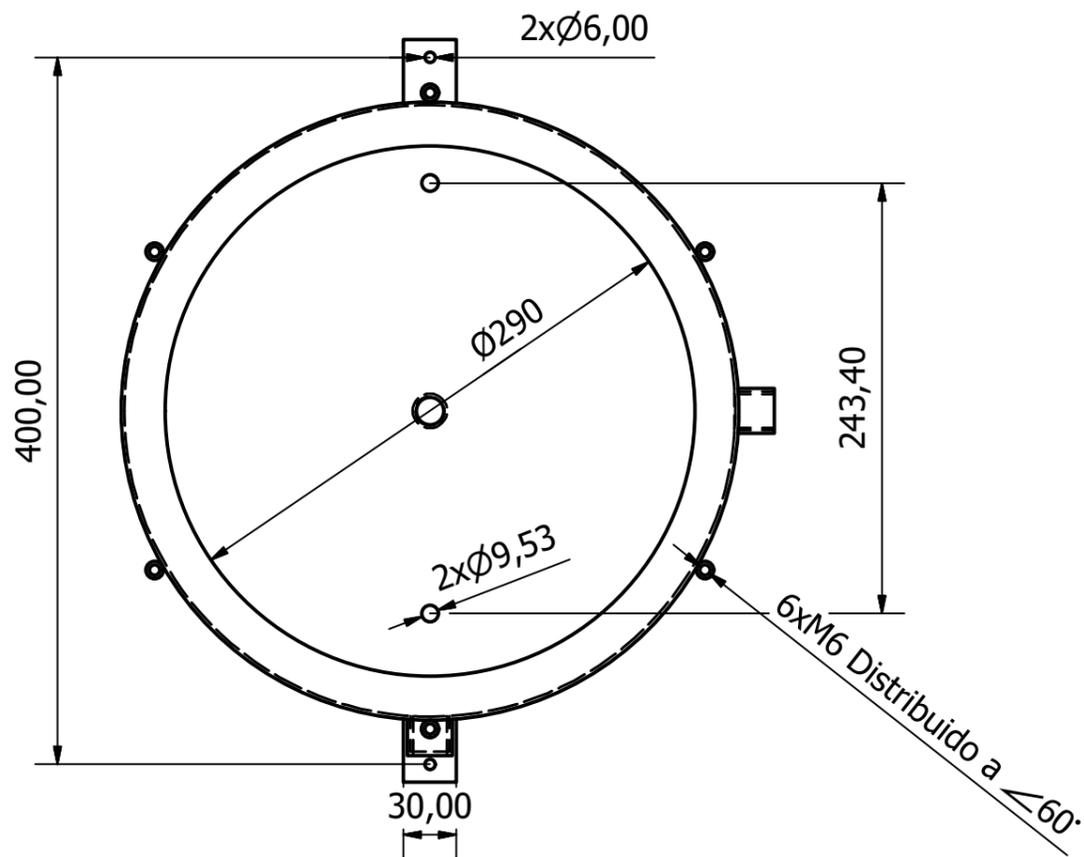
El área calculada requerida es de 0.23 metros cuadrados, se utilizó para formar el serpentín cañerías de acero inoxidable AISI 304 de 9.52 mm de diámetro y de 1 mm de espesor.

APÉNDICE C
Planos Esquemáticos

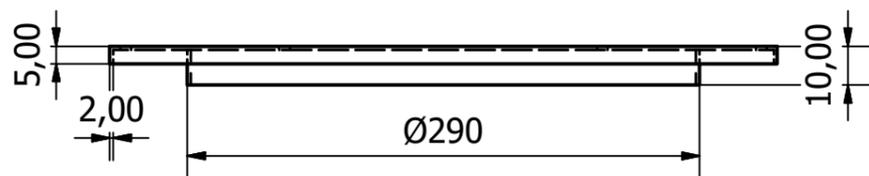
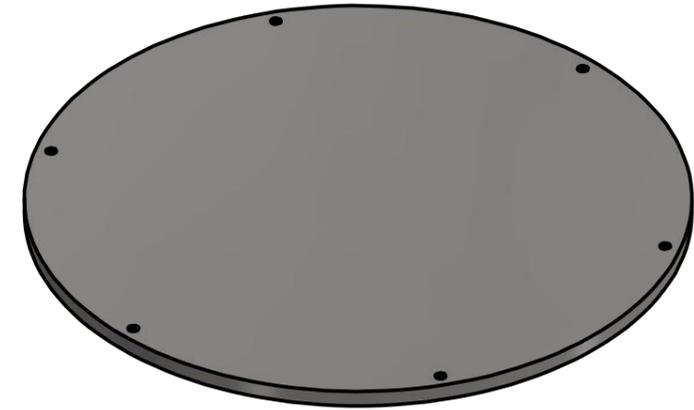
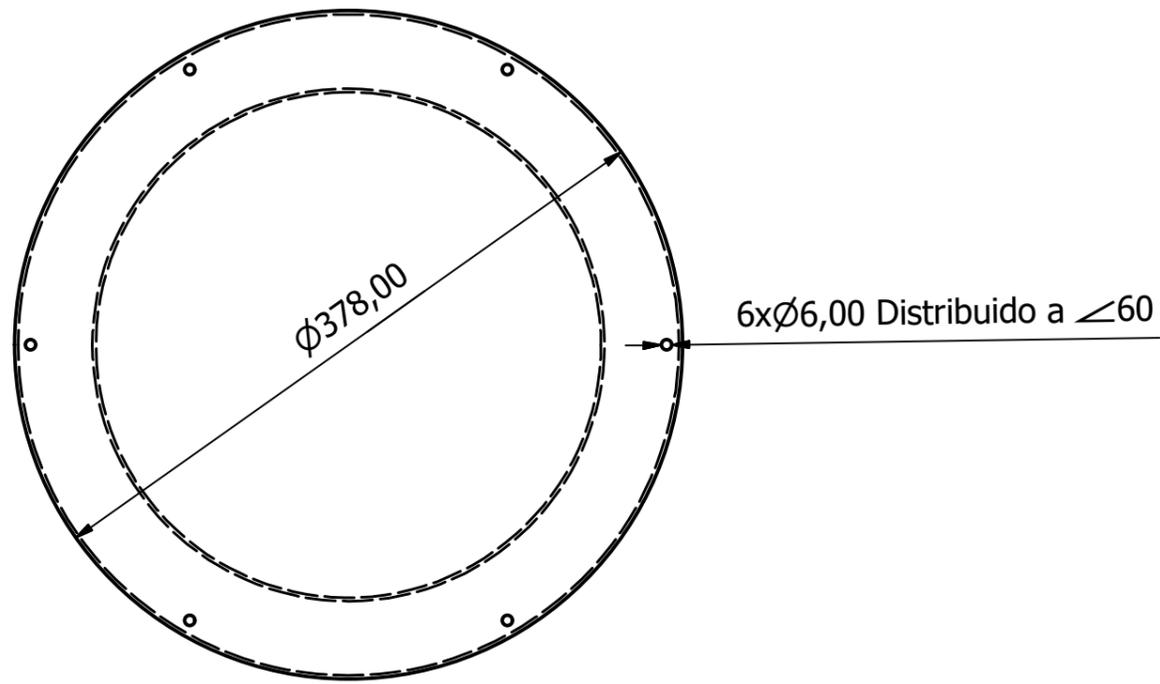


Nota: Todas las medidas dadas en los planos se encuentran en milímetros

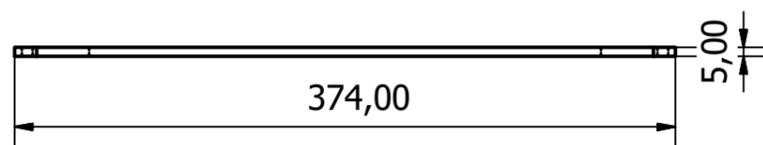
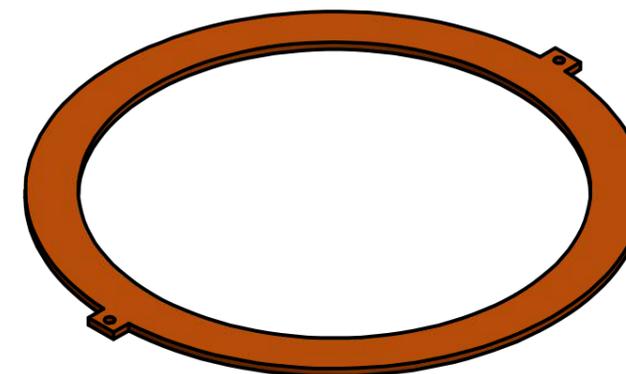
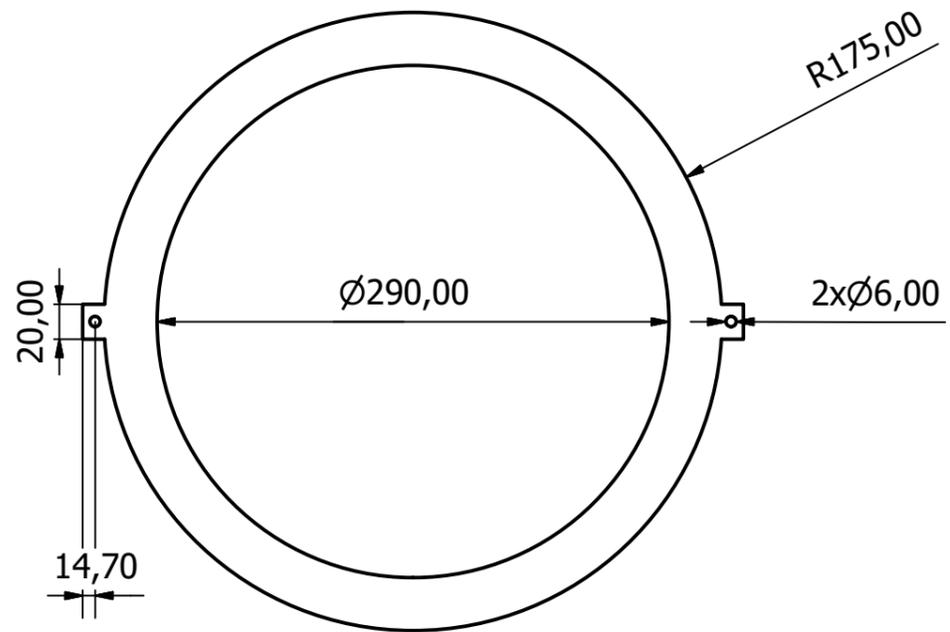
	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.		Material: Acero 304	
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Formato: A4	
1:4	Contiene	Plano serpentín evaporador		Lámina: N° 1	



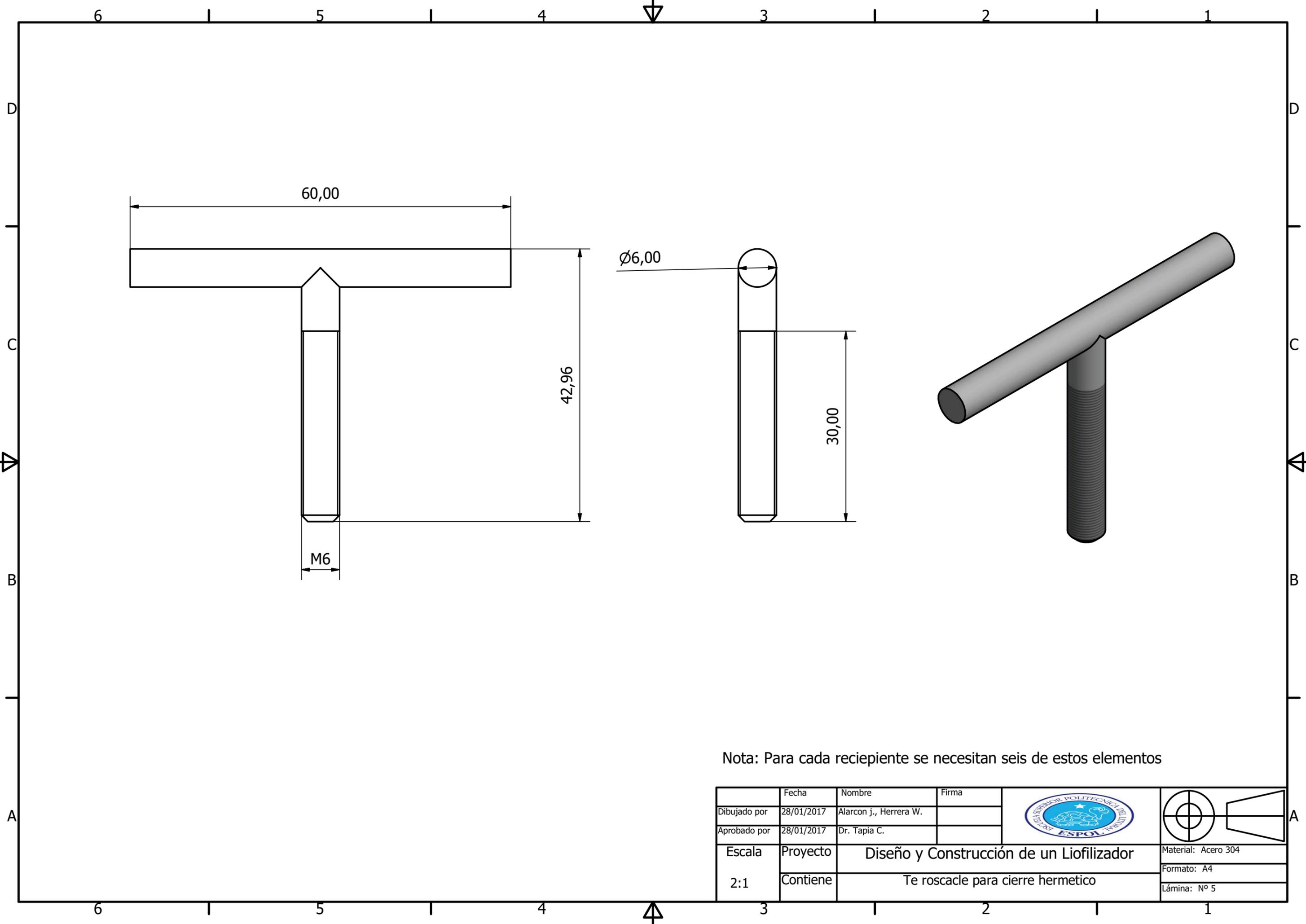
	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Acero 304	
1:4	Contiene	Plano recipiente trampa de frío		Formato: A4	
				Lámina: N° 2	



	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Acero 304	
1:4	Contiene	Plano de tapa para trampa de frio y recipiente de muestras		Formato: A4	
				Lámina: N° 3	

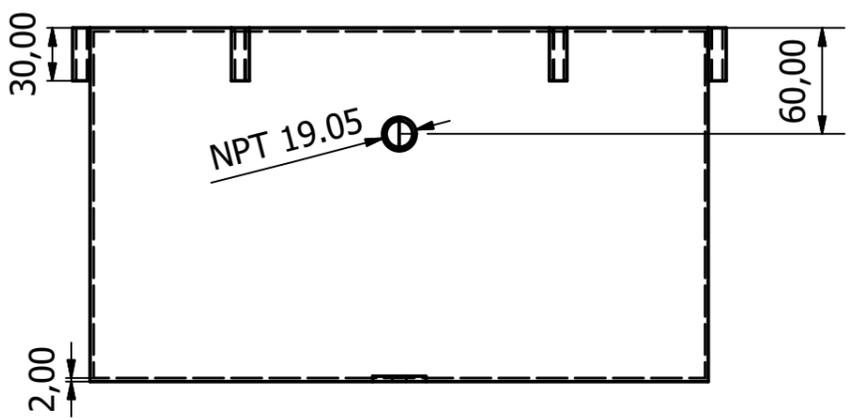
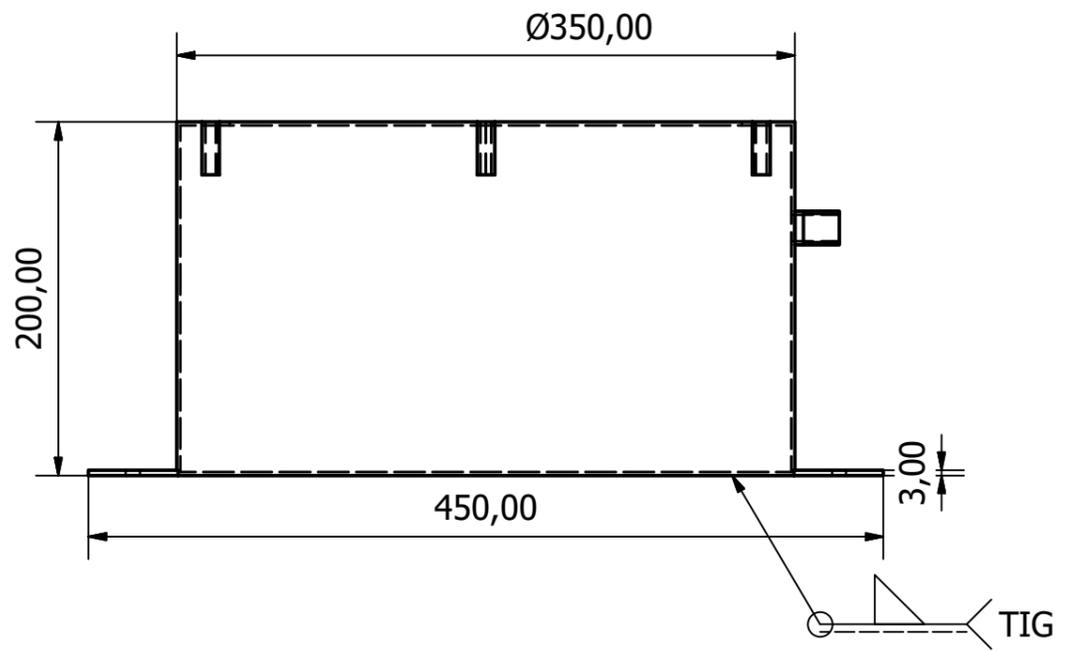
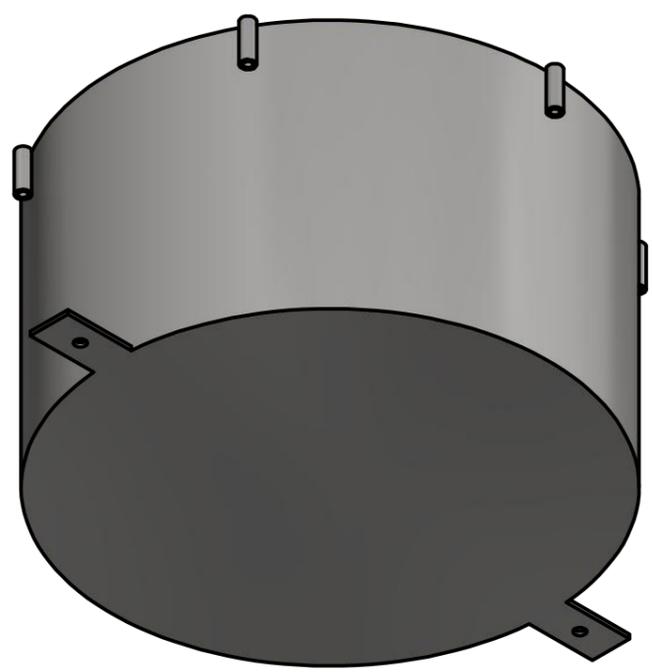
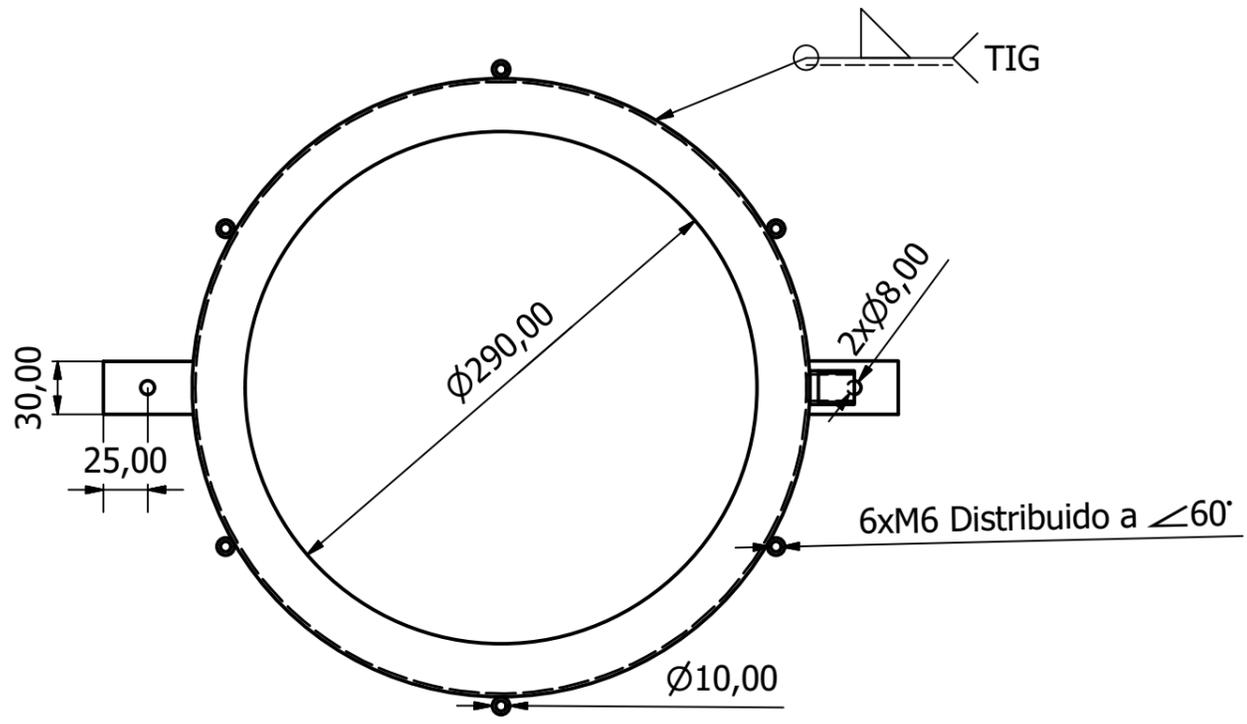


	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Silicon Rojo	
1:4	Contiene	Sello		Formato: A4	
				Lámina: N° 4	

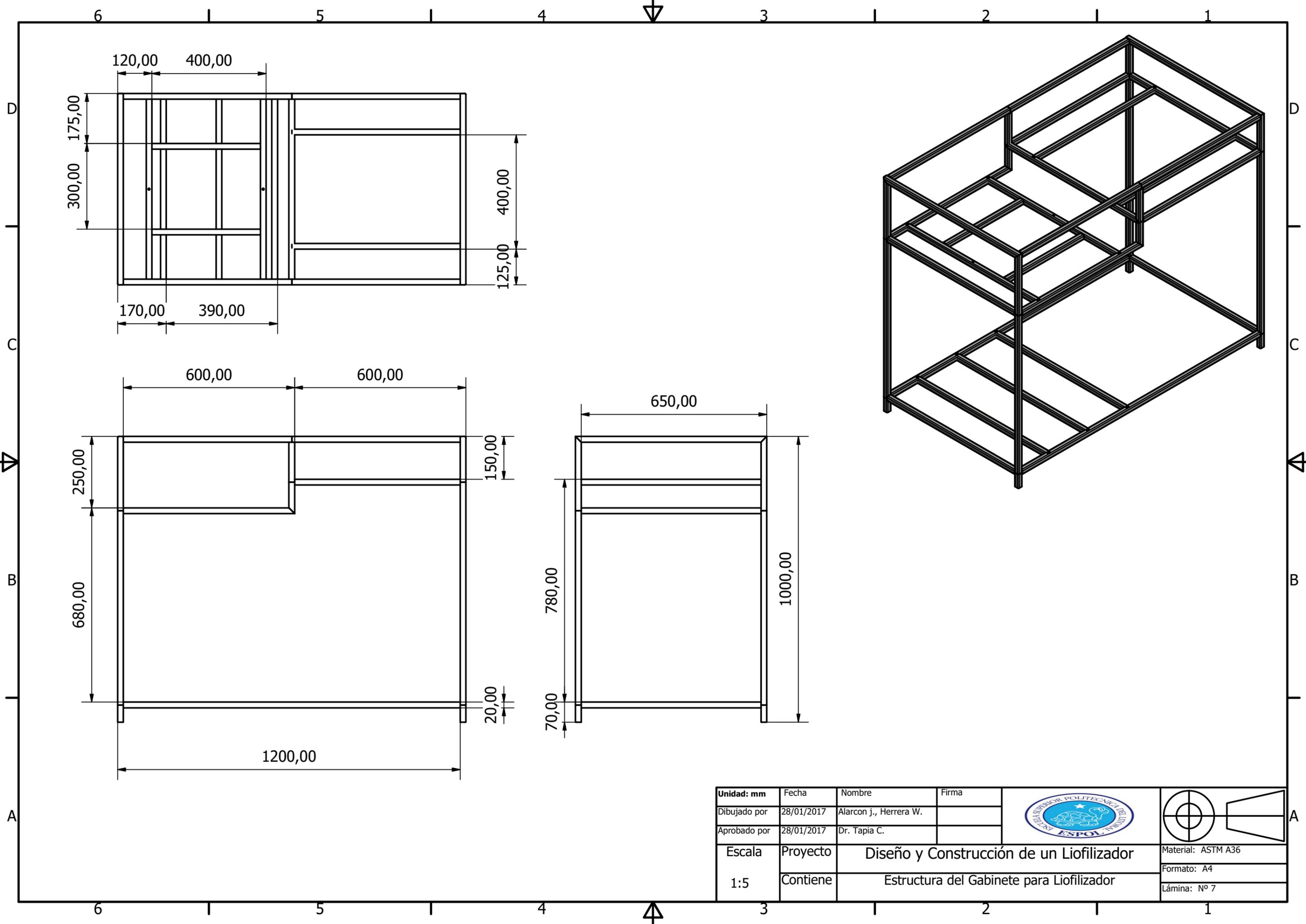


Nota: Para cada recipiente se necesitan seis de estos elementos

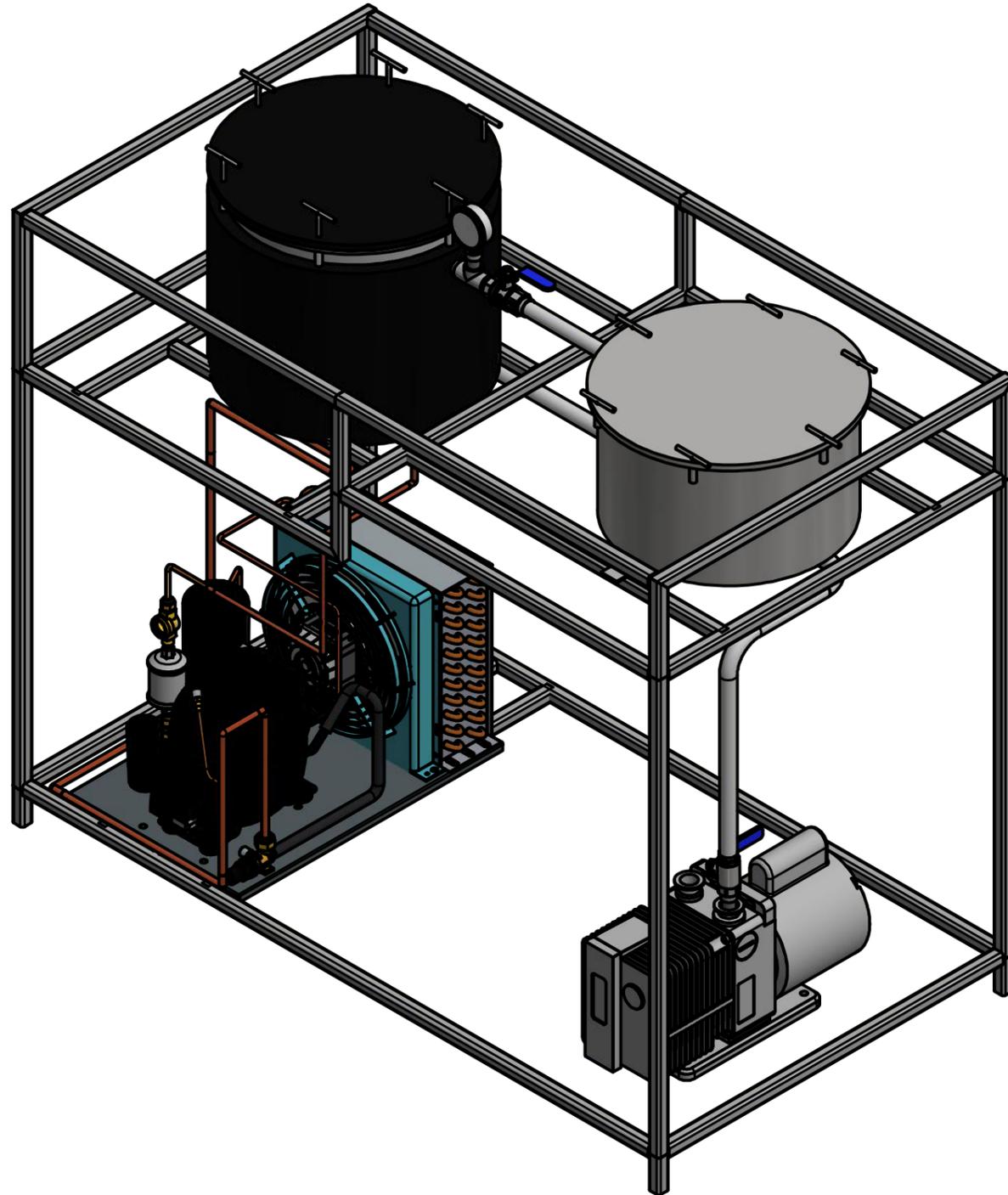
	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Acero 304	
2:1	Contiene	Te roscale para cierre hermetico		Formato: A4	
				Lámina: N° 5	



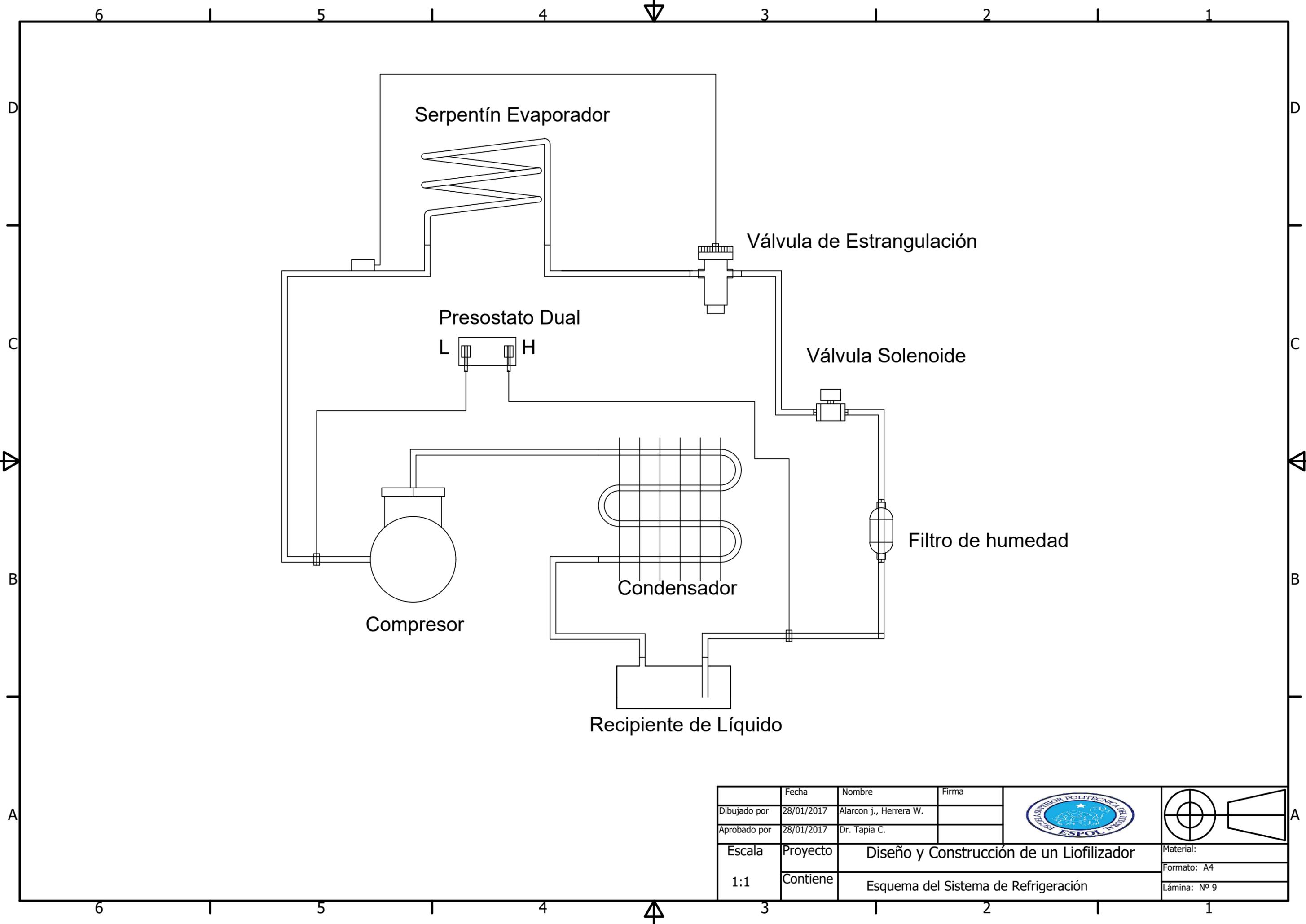
	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Acero 304	
1:4	Contiene	Recipientes de Muestras		Formato: A4	
				Lámina: N° 6	



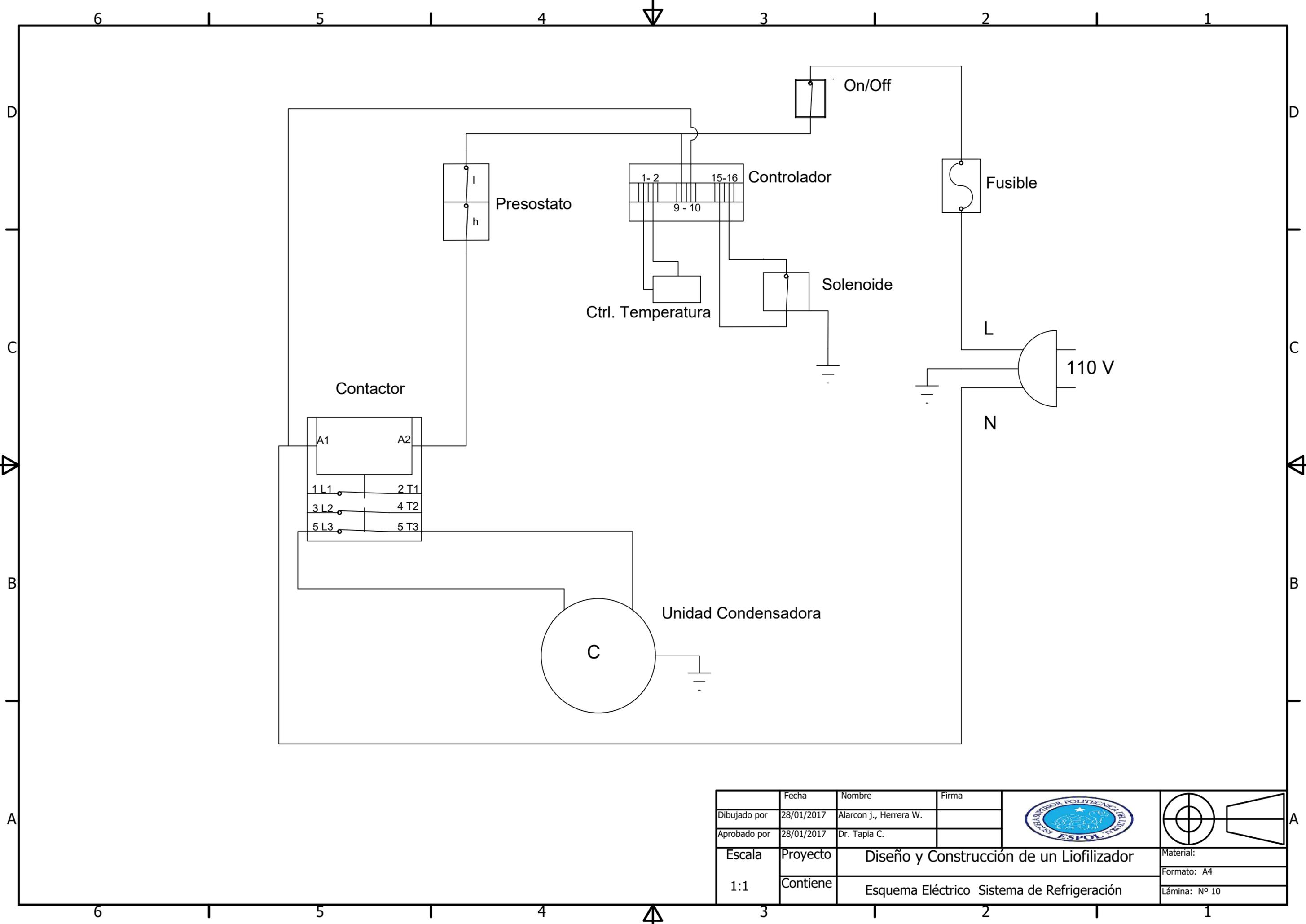
Unidad: mm	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: ASTM A36	
1:5	Contiene	Estructura del Gabinete para Liofilizador		Formato: A4	
				Lámina: N° 7	



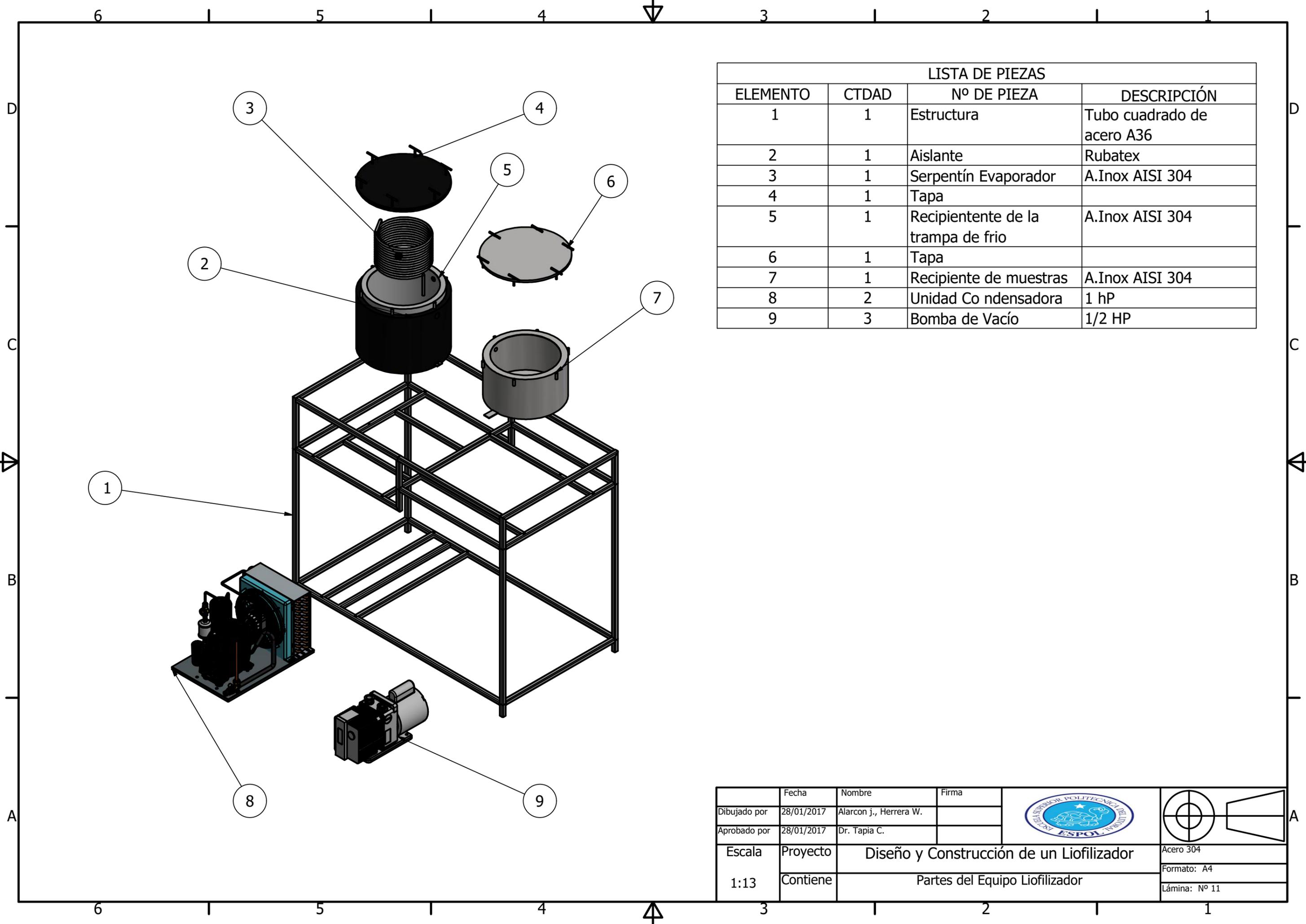
	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material: Acero 304	
1:8	Contiene	ENSAMBLE DEL EQUIPO		Formato: A4	
				Lámina: N° 8	



	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material:	
1:1	Contiene	Esquema del Sistema de Refrigeración		Formato: A4	
				Lámina: N° 9	



	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Material:	
1:1	Contiene	Esquema Eléctrico Sistema de Refrigeración		Formato: A4	
				Lámina: N° 10	



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Estructura	Tubo cuadrado de acero A36
2	1	Aislante	Rubatex
3	1	Serpentín Evaporador	A.Inox AISI 304
4	1	Tapa	
5	1	Recipiente de la trampa de frio	A.Inox AISI 304
6	1	Tapa	
7	1	Recipiente de muestras	A.Inox AISI 304
8	2	Unidad Co ndensadora	1 hP
9	3	Bomba de Vacío	1/2 HP

	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado por	28/01/2017	Alarcon j., Herrera W.			
Aprobado por	28/01/2017	Dr. Tapia C.			
Escala	Proyecto	Diseño y Construcción de un Liofilizador		Acero 304	
1:13	Contiene	Partes del Equipo Liofilizador		Formato: A4	
				Lámina: Nº 11	