



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA EL  
SECADO DE PLANTAS AROMÁTICAS**

**SEBASTIAN CAMILO PEÑA CRUZ  
HUGO ERNESTO PARRA GUTIERREZ**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA EL  
SECADO DE PLANTAS AROMÁTICAS**

**SEBASTIÁN CAMILO PEÑA CRUZ  
HUGO ERNESTO PARRA GUTIÉRREZ**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de:  
**Ingeniero mecánico**

Director:  
Ph.D, Ing. Qco Dionisio Humberto Malagón Romero

Línea de Investigación:  
Energía y Termofluidos  
Grupo de Investigación:  
Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica - GEAMEC

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bogotá, 17 de julio de 2015

## Dedicatoria

*A Dios por bendecirme con; paciencia, sabiduría, perseverancia, brindándome las mejores oportunidades en la vida para poder alcanzar todas mis metas*

*A mis padres que con su inmenso amor, dedicación y apoyo forjaron las bases sólidas de mi vida, también por la confianza depositada en mí de ellos es este triunfo.*

*A Carly mi novia por estar presente en los momentos importantes de mi vida, brindándome su amor, su cariño y dándome fortaleza para seguir adelante.*

*A mis amigos quienes siempre estuvieron a mi lado, y nunca dejaron ni dejaron de soñar el título de ingenieros.*

*... y a todas aquellas personas que de una u otra manera me han ayudado para cumplir mi desarrollo profesional.*

**HUGO ERNESTO PARRA GUTIERREZ**

*Yo **Sebastián Camilo Peña Cruz** dedico en primer lugar a Dios quien me ha dado la sabiduría necesaria para terminar una meta más en mi vida y me ha guiado por el camino de la vida y cada día me regala la oportunidad de un nuevo día para seguir luchando por mis metas, sueños e ilusiones.*

*A mis padres **Flor Alba Y Fabio** por su apoyo incondicional por creer en mí porque con sus grandes esfuerzos me han ayudado a salir adelante y es a ellos a quien debo este triunfo profesional.*

*A mis hermanos **Jonathan y Fabio** por su apoyo absoluto y por compartir conmigo cada momento de mi vida a todos mis amigos quien han luchado conmigo para poder conseguir esta meta tan importante y a todas las personas que han estado conmigo en mi vida dejando huella y enseñándome muchas cosas para siempre ser mejor.*

## **Agradecimientos**

*En primer lugar a Dios por brindarnos la suficiente perseverancia para no desfallecer durante el transcurso por alcanzar esta meta tan importante, por la salud y por la suspicacia para aprender de nuestros errores.*

*Agradecemos a nuestras familias por su incansable e incondicional apoyo, por haber depositado toda su confianza en nosotros, con sus consejos y enseñanzas nos mostraron que en la vida hay que luchar para alcanzar las metas, siempre hay que tener grandes aspiraciones pero conservando la humildad.*

*A la Universidad Santo Tomas por brindarnos todas las herramientas y recursos disponibles para poder adquirir conocimientos durante el desarrollo de nuestro aprendizaje profesional, a los grandes maestros quienes la conforman por su esfuerzo, dedicación, conocimientos y experiencia que han logrado en nosotros llevarnos a culminar nuestros estudios con éxito.*

*Al ingeniero y amigo Dionisio Malagón, quien con sus estímulos nos motivó en la investigación y realización de este proyecto con éxito y satisfacción para nosotros, quien nos dejó grandes enseñanzas para la vida profesional y personal.*

*A todos muchas gracias, pues en el momento en que las palabras necesarias pueden expresar lo que el alma desea rebasarían un tomo, simplemente queda decir que por su significado extenso y sin límites es **GRACIAS**.*

## RESUMEN

En la actualidad existen diferentes procesos para deshidratar alimentos y dentro de ellos la liofilización es uno de ellos. A través de este proceso se realiza la deshidratación mediante sublimación progresiva. Este proyecto realizó el diseño, construcción y puesta en marcha de un liofilizador a escala laboratorio, para la liofilización de plantas aromáticas. Este equipo consta de tres sistemas principales los cuales son: un sistema de refrigeración, un sistema de vacío y una cámara de trabajo. Se determinaron los requerimientos de diseño y se plantearon 4 opciones de diseño; se escogió la mejor alternativa que cumpliera con los requerimientos establecidos. Se realizó el diseño detallado y se construyó el equipo. La evaluación de este equipo se realizó con dos plantas aromáticas las cuales fueron: yerbabuena y albahaca. Se realizaron las curvas de liofilización para estas dos plantas y se determinó un tiempo de 40 horas para alcanzar niveles de humedad cercanos al 1%. Al realizar un análisis de costos a la deshidratación se determinó que mediante secado convencional el costo es \$3.000 / kg frente a la liofilización que cuesta \$ 10.536 / kg. Finalmente se realizó un panel sensorial para comparar las propiedades organolépticas de las plantas secadas y liofilizadas y se encontró que la mayoría de dicho panel escogió las plantas liofilizadas. A partir de este trabajo se demuestra que la construcción de equipos de liofilización en el país es posible y no se requiere la importación de los mismos.

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE FIGURAS.....	9
TABLA DE GRAFICAS .....	12
INTRODUCCIÓN .....	14
OBJETIVOS.....	16
OBJETIVO GENERAL:.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	16
1. MARCO TEORICO.....	17
1.1 PRINCIPIOS DE LA LIOFILIZACIÓN .....	17
1.2 ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN.....	19
1.2.1 ETAPA DE CONGELACIÓN .....	20
1.2.2. ETAPA SUBLIMACIÓN O DESECACIÓN PRIMARIA .....	21
1.2.3. ETAPA DESORCIÓN O DESECACIÓN SECUNDARIA .....	21
1.3 BASES TEORICAS PROCESO DE LIOFILIZACIÓN .....	22
1.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONGELACIÓN.....	22
1.3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE LA SUBLIMACION.....	23
1.4 SISTEMA BÁSICO DE LIOFILIZACIÓN .....	25
1.4.1 CÁMARA DE TRABAJO.....	26
1.4.2 SISTEMA DE PLACAS.....	26
1.4.3 SISTEMA DE VACÍO.....	26
1.4.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	27
2. DISEÑO DE DETALLE .....	29
2.1 COMPARACIÓN TÉCNICA DE LIOFILIZADORES EN EL MERCADO ..	29
2.2 DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS .....	29
2.2.1 REQUERIMIENTOS DE USO. ....	30
2.2.2 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES.....	30
2.2.3 REQUERIMIENTOS TÉCNICO - PRODUCTIVOS. ....	30
2.2.4 REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS. ....	31
2.3 DISEÑO PRELIMINAR .....	33
2.3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.....	33
2.3.2 MATERIAL. ....	33
2.3.3 FORMA DE LA CÁMARA.....	34

2.3.4 TAMAÑO DE LA CÁMARA .....	34
2.3.6 SELECCIÓN DE REFRIGERANTE .....	36
2.4 PRESENTACION DE ALTERNATIVAS.....	37
2.4.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO 1. ....	37
2.4.2 ALTERNATIVA DE DISEÑO 2. ....	39
2.4.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO 3. ....	40
2.4.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO 4 .....	41
2.4.4 VALORACION TÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO ....	42
3. DISEÑO BÁSICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR A ESCALA LABORATORIO.....	43
3.1 DISEÑO ESTRUCTURAL. ....	43
3.1.1 MUEBLE.....	43
3.1.2 CÁMARA DE TRABAJO.....	44
3.1.3 PUERTA.....	45
3.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACION.....	45
3.3 DISEÑO DETALLADO.....	45
3.3.1 DISEÑO MECÁNICO .....	45
3.3.2 DISEÑO TÉRMICO .....	57
3.3.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	66
3.3.4 SELECCIÓN UNIDAD CONDENSADORA .....	67
3.3.5 COSTO ENERGETICO DEL EQUIPO .....	71
3.3.6 PROCESO DE MANUFACTURA DEL EQUIPO DISEÑADO .....	72
4. PUESTA EN MARCHA DEL LIOFILIZADOR Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO.....	83
4.1 CALCULO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LAS PLANTAS AROMÁTICAS.....	83
4.2 CURVA DE LIOFILIZADO DE LA YERBABUENA Y ALBAHACA .....	83
4.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PRUEBAS DE LABORATORIO.....	86
4.3 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO .....	89
4.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PANEL SENSORIAL.....	92
4.4 TOMA DE FOTOS CON ESPECTRÓMETRO.....	96
5. CONCLUSIONES.....	98
6. RECOMENDACIONES .....	99
7. REFERENCIAS.....	100
8. ANEXOS .....	104

## TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1 CAMBIOS DE FASE DEL AGUA.....	18
FIGURA 2 DIAGRAMA P VS T DEL AGUA.....	19
FIGURA 3 FLUJO DE CALOR Y MATERIA DURANTE LA LIOFILIZACIÓN: (A) SECADO POR UNA CARA; (B) DISPOSICIÓN SIMÉTRICA; SECADO POR LAS DOS CARAS .....	24
FIGURA 4 SISTEMA BÁSICO DE LIOFILIZACIÓN.....	25
FIGURA 5 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR ..	27
FIGURA 6 DIAGRAMAS T-S Y P-H, CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	27
FIGURA 7 QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT) .....	32
FIGURA 8 APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO FORMA CUBICA Y CILÍNDRICA .....	34
FIGURA 9 ALTERNATIVA DE DISEÑO # 1 MODELADA EN CAD.....	38
FIGURA 10 ALTERNATIVA DE DISEÑO # 2 MODELADA EN CAD.....	39
FIGURA 11 ALTERNATIVA DE DISEÑO # 3 MODELADA EN CAD.....	40
FIGURA 12 ALTERNATIVA DE DISEÑO 4 MODELADA EN CAD.....	41
FIGURA 13 ESQUEMA DE DIMENSIONES DE LA CÁMARA DE TRABAJO.	46
FIGURA 14 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DE LA CÁMARA DE TRABAJO ..	49
FIGURA 15 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SOPORTE EN CRUZ.....	50
FIGURA 16 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON SOPORTE EN CRUZ.....	50
FIGURA 17 ESFUERZO MÁXIMO CON SOPORTES EN CRUZ.....	51
FIGURA 18 ESFUERZO MÁXIMO CON SOPORTE EN X.....	51
FIGURA 19 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON SOPORTE EN X.....	52
FIGURA 20 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO CON SOPORTE EN X.....	52
FIGURA 21 ESFUERZO MÁXIMO VON MISES SIMULACIÓN FINAL .....	53
FIGURA 22 ESFUERZO MÁXIMO VON MISES SIMULACIÓN FINAL .....	53
FIGURA 23 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIMULACIÓN FINAL .....	54
FIGURA 24 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO SIMULACIÓN FINAL .....	54
FIGURA 25 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LA PUERTA.....	55
FIGURA 26 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LA PUERTA.....	55
FIGURA 27 ESFUERZO MÁXIMO VON MISES EN LA PUERTA.....	56
FIGURA 28 ESFUERZO MÁXIMO VON MISES EN LA PUERTA.....	56
FIGURA 29 ESQUEMA DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS DE LA CÁMARA .....	59

FIGURA 30 ESQUEMA DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LAS PAREDES DEL EQUIPO .....	60
FIGURA 31 PLANO DE CONSTRUCCIÓN CÁMARA DE TRABAJO .....	72
FIGURA 32 ESPECIFICACIÓN DE LAS ÁREAS CORTADAS PARA LA CÁMARA DE TRABAJO .....	73
FIGURA 33 PLANOS DE DOBLADO PARA LA CÁMARA DE TRABAJO.....	73
FIGURA 34 RESULTADO DEL DOBLADO DE LA LÁMINA DE LA CÁMARA DE TRABAJO .....	73
FIGURA 35 PROCESO DE SOLDADO PARA LA CÁMARA DE TRABAJO ...	74
FIGURA 36 SOPORTES EN CRUZ SOLDADOS A LA CÁMARA DE TRABAJO .....	74
FIGURA 37 PLANO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE PLACAS .....	75
FIGURA 38 PLACA CORTADA Y DOBLADA DEL SISTEMA DE PLACAS ....	75
FIGURA 39 PLANO DEL SERPENTÍN DE REFRIGERACIÓN .....	75
FIGURA 40 PLANO DE ENSAMBLE DEL SISTEMA DE PLACAS EN LA CÁMARA DE TRABAJO .....	76
FIGURA 41 PROCESO DE SOLDADURA DEL SISTEMA DE PLACAS DENTRO DE LA CÁMARA DE TRABAJO.....	76
FIGURA 42 INSTALACIÓN DEL SERPENTÍN QUE CONFORMA EL EVAPORADOR .....	77
FIGURA 43 PLANO DE ENSAMBLE DE LA CARCASA Y LA PLACA DE SOPORTE DE LA CÁMARA.....	78
FIGURA 44 ENSAMBLE DE LA CARCASA Y LA LÁMINA DE SOPORTE .....	79
FIGURA 45 PLANO DE ENSAMBLE DE LA CÁMARA DE TRABAJO Y LA CARCASA .....	79
FIGURA 46 ENSAMBLE CÁMARA DE TRABAJO CON LA CARCASA.....	80
FIGURA 47 RESINA POLIÉSTER Y CATALIZADOR.....	80
FIGURA 48 POLIURETANO EXPANDIDO.....	80
FIGURA 49 UNIDAD DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	81
FIGURA 50 ENSAMBLE UNIDAD REFRIGERADORA EN LA CARCASA .....	81
FIGURA 51 CARGA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....	82
FIGURA 52 ENSAMBLE COMPLETO DEL EQUIPO .....	82
FIGURA 53 ACABADOS SUPERFICIALES DEL EQUIPO .....	82
FIGURA 54 CONSTRUCCIÓN FINAL DEL EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN .....	82
FIGURA 55 CURVA DE LIOFILIZADO DE LA YERBABUENA .....	84
FIGURA 56 CURVA DE LIOFILIZADO DE LA ALBAHACA.....	84
FIGURA 57 VELOCIDADES DE SECADO DURANTE EL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN DE LA YERBABUENA.....	85

FIGURA 58 VELOCIDADES DE SECADO DURANTE EL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN DE LA ALBAHACA.....	85
FIGURA 59 INTENSIDAD DEL SABOR .....	91
FIGURA 60 INTENSIDAD DEL OLOR.....	92
FIGURA 61 INTENSIDAD DEL COLOR .....	92
FIGURA 62 YERBABUENA NATURAL .....	97
FIGURA 63 ALBAHACA NATURAL.....	97
FIGURA 64 YERBABUENA DESHIDRATADA EN HORNO.....	97
FIGURA 65 ALBAHACA DESHIDRATADA EN HORNO .....	97
FIGURA 66 YERBABUENA LIOFILIZADA .....	97
FIGURA 67 ALBAHACA LIOFILIZADA.....	97

## TABLA DE GRAFICAS

GRAFICA 1 RELACIÓN ENTRE LA ALTURA Y LA PROFUNDIDAD .....	47
GRAFICA 2 ESFUERZO – DEFORMACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE 304 .....	57
GRAFICA 3 VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL EVAPORADOR CON DT EVAPORADOR.....	66
GRAFICA 4 DIAGRAMA DE PRESIÓN. ENTALPIA PARA (R-404 A) EN UNIDADES DE SI.....	69
GRAFICA 5 PORCENTAJE DE AGUA EN LA YERBABUENA VS TIEMPO .....	88
GRAFICA 6 PORCENTAJE DE AGUA EN LA ALBAHACA VS TIEMPO .....	88
GRAFICA 7 PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS .....	94

## TABLA DE ANEXOS

ANEXO 1 CATALOGO TECNICO GAS REFRIGERANTE R-404 <sup>a</sup> .....	105
ANEXO 2 PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	108
ANEXO 3 ESQUEMA DE REFRIGERACION.....	108
ANEXO 4 CAPACIDAD DEL COMPRESOR PARA R404A .....	130
ANEXO 5 ESPECIFICACIONES DEL COMPRESOR.....	132
ANEXO 6 CÁLCULO DEL TUBO CAPILAR UTILIZANDO CAP TUBE .....	136
ANEXO 7 ENCUESTA PANEL SENSORIAL.....	136
ANEXO 8 MANUAL DE FUNCIONAMIENTO.....	138
ANEXO 9 MANUAL DE FUNCIONAMIENTO.....	141

## INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países más privilegiados por su riqueza natural, por la variedad geográfica y por la diversidad de sus ecosistemas. Es un país tropical por lo cual presenta una variedad de climas, los cuales favorecen la agricultura y floricultura del país. Sin embargo, ello no ha sido aprovechado para el desarrollo de la agroindustria, por lo cual se requiere desarrollar procesos de conservación y transformación de productos alimenticios que aumenten el valor de los mismos en los mercados nacionales e internacionales.

Con el objetivo de contribuir con el desarrollo del sector agrícola haciendo un enfoque a los productores de plantas aromáticas, se desarrolla este trabajo de grado para dar solución a una necesidad que nace principalmente en la industria alimenticia, específicamente con el diseño de liofilizadores los cuales son la base para lograr la obtención de nuevos productos agroindustriales con alto nivel de calidad, conservación del producto y sus propiedades.

En la actualidad los procesos de deshidratación de alimentos se realizan por diferentes métodos, procesos de secado que consisten en el manejo de altas temperaturas que alteran las características organolépticas (color, olor, sabor y textura) y provocan pérdidas del valor nutritivo de los productos. Un liofilizador es un equipo multifuncional que permite la deshidratación por sublimación progresiva de diferentes muestras. Este trabajo de grado tiene como propósito principal el integrar los conocimientos teóricos y prácticos de los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica en la línea de termofluidos, para así realizar el diseño y construcción de un liofilizador a escala de laboratorio, el cual permite reproducir los procesos en condiciones muy similares a un equipo industrial de una forma eficiente y práctica.

En este documento se muestra todo el proceso de diseño y construcción de un liofilizador. Inicialmente se exponen de forma completa todos los fundamentos teóricos de la liofilización, lo cual es la base de partida para el posterior proceso de diseño, después se realizó un análisis del proceso de liofilización lo que permite fijar los diferentes parámetros y requerimientos para crear las especificaciones del diseño del liofilizador a escala de laboratorio.

La problemática a la cual se dará solución en este documento hace referencia a la falta de desarrollo tecnológico, en el sector agropecuario enfocándose en la producción y conservación de plantas aromáticas deshidratadas por el método de sublimación. Con base en esto se presenta el desarrollo del proyecto y el análisis de cada una de las alternativas planteadas como solución, luego se muestra todo el proceso de diseño básico y detallado en donde se realizan los cálculos y procesos de selección de materiales y componentes del equipo. Realizadas las pruebas con el equipo fabricado y las muestras de plantas aromáticas seleccionadas, se identifica el tiempo mínimo necesario para lograr

el proceso de liofilización con cada planta, adicional se identifica el porcentaje de pérdida de humedad de cada una de ellas, donde se evidencia la curva de secado.

Más adelante se presenta la argumentación del diseño final haciendo la descripción del sistema operativo del liofilizador a escala de laboratorio y sus componentes, para terminar se presentan las herramientas necesarias para la construcción del sistema. Para evidenciar la eficiencia del proceso de liofilización del equipo, se seleccionaron 50 personas al azar, a quienes se les dió a conocer las muestras liofilizadas y de esta manera poder realizar una comparación con las plantas aromáticas naturales y las secadas con el método convencional.

La perspectiva de este proyecto es mostrar la factibilidad y viabilidad de diseñar y construir equipos de liofilización, para mejorar los procesos agroindustriales del país.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Diseñar, construir y poner en funcionamiento un liofilizador, a escala de laboratorio, para la liofilización de plantas aromáticas

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Realizar el diseño y construcción de un liofilizador a escala de laboratorio.
2. Validar el funcionamiento del liofilizador construido usando plantas aromáticas (yerbabuena y albahaca)
3. Realizar un análisis técnico-económico del proceso de liofilización de plantas aromáticas.

## 1. MARCO TEORICO

La liofilización es un proceso de secado o deshidratación que se realiza mediante sublimación progresiva del solvente o agua presente en el producto a secar [1]. Este proceso se caracteriza por utilizar bajas temperaturas lo cual favorece que algunos elementos volátiles no se pierdan, caso contrario que ocurre en los procesos de secado convencional [1]. En la sublimación progresiva se logra dar el paso directo del hielo (sólido) a gas (vapor) sin pasar por su fase líquida [2]. Este proceso permite obtener un producto con una estructura porosa que fácilmente puede ser rehidratado y que puede recuperar completamente sus propiedades una vez se realiza dicha rehidratación [3].

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el primer paso en la liofilización debe ser la congelación [2]. Adicional a ello se requiere la disminución de la presión razón por la cual los liofilizadores deben soportar presiones de vacío. El resultado de la liofilización es un producto seco, con alta porosidad, de dimensiones muy similares a las del producto inicialmente congelado, con un porcentaje de humedad inferior al 1% [4].

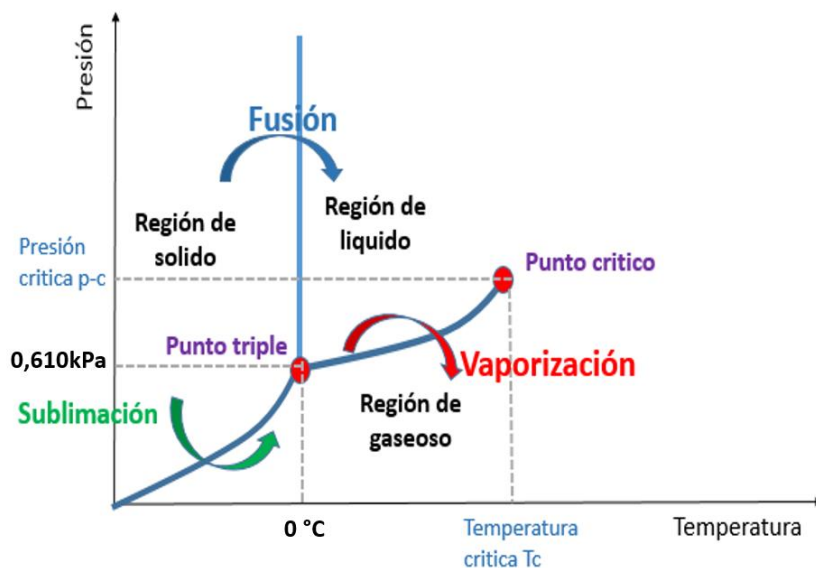
Los productos que han sido liofilizados, seguido por un proceso de empaquetado apropiado, se pueden almacenar por periodos más prolongados que cualquier otro tipo de producto deshidratado por calor o conservado de forma química, con la ventaja de conservar la mayor parte de sus propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales de su estado fresco (inicial) [4], ello redundando en que mejore su estabilidad previniendo la oxidación [5].

Otros productos que se pueden conservar mediante el proceso de la liofilización son: materiales no vivos, tales como plasma sanguíneo, suero, soluciones de hormonas, productos farmacéuticos, sueros y antídotos. [6]

### 1.1 PRINCIPIOS DE LA LIOFILIZACIÓN

El principio en que se basa el proceso de liofilización es en la sublimación progresiva de los productos, en la cual se mantienen condiciones de temperatura y presión bajas (debajo del punto triple), lo cual favorece que el solvente en el cual se encuentre la muestra pueda difundirse de la fase sólida a la gaseosa. Si el solvente es agua, el producto debe mantenerse por debajo de la presión de 0.610 kPa y la temperatura de 0 °C [7]. La Figura 1 presenta el Diagrama Presión-Temperatura, así como la ubicación del punto triple. Como se puede ver la zona en la cual se favorece la sublimación implica estar por debajo del punto triple.

Figura 1 Cambios de Fase del agua



Fuente: [8].

Realizando un estudio comparativo entre los procesos de deshidratación convencionales y la liofilización se pueden destacar algunas ventajas y desventajas, cuyo análisis fueron la base para la definición de los principales parámetros para el diseño del liofilizador.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la liofilización

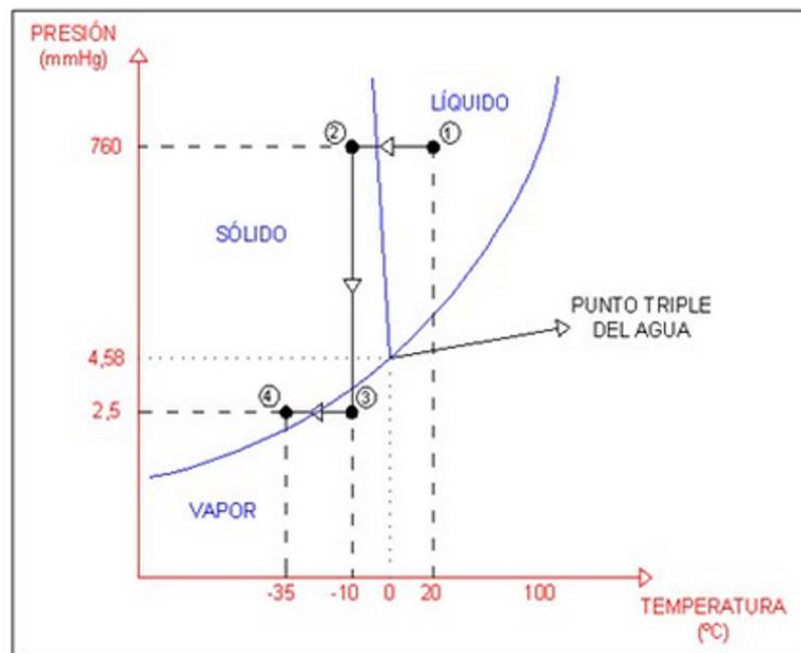
VENTAJAS DE LA LIOFILIZACIÓN	DESVENTAJAS DE LA LIOFILIZACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La temperatura a que es sometido el producto, es <math>-5^{\circ}\text{C}</math> y está por debajo de aquella a la que proliferan los microorganismos de <math>5^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>• Retiene las características originales del producto, incluyendo: Color, forma, tamaño, sabor, textura, nutrientes.</li> <li>• La gran porosidad del producto facilita con rapidez la reconstitución por la adición de agua o el solvente adecuado.</li> <li>• No es necesario el almacenamiento en frío, para su transporte y su conservación.</li> <li>• Al ser despreciable la humedad remanente, el producto puede ser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado costo de inversión de instalaciones y equipos.</li> <li>• Proceso largo, normalmente de varios días, por la cantidad de etapas que se maneja para la deshidratación.</li> <li>• El manejo previo del producto es complejo, ya que se debe mantener en cadena de frío.</li> <li>• Es un procedimiento costoso por el alto consumo energético.</li> </ul>

almacenado por tiempo limitado, constituyendo productos de larga estabilidad.

- Por tratarse de alimentos deshidratados el costo del transporte disminuye por el bajo peso.

FUENTE: Autores

Figura 2 Diagrama Presión vs temperatura del agua



Fuente: [2]

Como se muestra en la figura 2, se evidencian 3 etapas las cuales son: de 1 – 2 es un proceso de congelación del agua del producto, de 2 – 3 se presenta el proceso de sublimación, y de 3 – 4 es un proceso de presión constante donde la temperatura desciende a  $-35^{\circ}$ .

## 1.2 ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN

En el proceso de liofilización la congelación inicial debe ser muy rápida con el objetivo de obtener un producto con cristales pequeños y en un estado amorfo. [9]. Las etapas de secado se realizan a presiones bajas para permitir la sublimación del hielo. El proceso de la liofilización total de un producto se compone de tres fases principales; etapa de congelación, etapa de sublimación o desecación primaria y etapa desorción o desecación secundaria [9].

### 1.2.1 ETAPA DE CONGELACIÓN

La primera fase de la liofilización es la congelación del alimento en una instalación convencional. El tiempo de duración y el tipo de instalación empleada dependen de varios factores como la cantidad, concentración y naturaleza propia del producto. La temperatura de congelación para los alimentos es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada, en promedio la temperatura debe estar por debajo de los  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4].

Para la primera etapa de congelación se deben considerar los siguientes parámetros [2]:

- Temperatura a la que ocurre la máxima congelación.
- La velocidad óptima del enfriamiento.
- La temperatura mínima de fusión incipiente

Para mejorar el proceso se busca que el producto llegue al punto de congelación donde su estructura cristalina no presente ninguna variación y no queden vacíos en los cuales haya líquido saturado, con esto se asegura que el proceso de secado ocurra por sublimación [8].

En la tabla 2 se identifican las propiedades térmicas de algunos alimentos los cuales son utilizados como referencia para el desarrollo de este proyecto.

*Tabla 2 propiedades de alimentos*

PROPIEDAD	CAFE	PINA	MANZANA	AGUACATE	LIMON	NARANJA	DURAZNO	PERA	AGUA
Calor específico arriba del congelamiento $C_p$ (KJ Kg $^{\circ}\text{C}$ )	3.70	3.77	3.73	3.81	3.81	3.81	3.81	3.81	4.217
Calor específico abajo del congelamiento $C_{p2}$ (KJ/Kg $^{\circ}\text{C}$ )	1.72	2.09	1.8	2.05	2.05	1.84	1.72	2.05	2.11
Calor latente de solidificación $\lambda_{sol}$ (KJ/Kg)	240.32	297.73	283.77	316.34	293.08	290.75	237.73	283.77	334.1
Temperatura de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	-2 y -3	-1.61	-1.72	-2.67	-2.17	-2.22	-1.56	-2.77	0
Contenido de agua %	80	88	84	94	88	81	90	84	100
Conductividad Térmica del sólido seco (W/mk)			0.016 – 0.035			0.0431	0.016		

Fuente: [10].

Al final de la congelación la masa entera del producto se ha convertido en rígida, formando un eutéctico, que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento [10]. Se requiere llegar al estado eutéctico para asegurar la eliminación de agua solo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación [10].

Los alimentos de pequeño tamaño se congelan más rápidamente dando lugar a cristales pequeños que dañan menos su estructura. En los alimentos líquidos se procura que la congelación sea lenta, con objeto de que se forme una red cristalina que da lugar a la formación de unos canales por los que el vapor de agua pueda escapar [10].

### **1.2.2. ETAPA SUBLIMACIÓN O DESECACIÓN PRIMARIA**

Es la etapa en que la mayor parte del agua libre pasa a vapor. Si la presión de vapor de agua del alimento se mantiene por debajo de (0.610 kPa) y la temperatura menor de -5°C, cuando el alimento se calienta el hielo se sublima directamente a vapor sin llegar a fundirse debido a la baja presión en la cámara de secado. El evaporador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto. La fuerza impulsora de la sublimación es la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en la interface del hielo y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado, la energía para la sublimación del hielo es suministrada por radiación o conducción a través del producto congelado [4].

En esta fase el producto se sublima hasta un contenido de humedad del 15% (sobre su peso seco). Los parámetros de temperatura y presión, anteriormente nombrados, pueden ser modificados independientemente, pero están íntimamente relacionados, no es posible modificar, sin que se afecten los otros, por lo que en todo momento deben ser considerados conjuntamente y analizados sus efectos [4].

### **1.2.3. ETAPA DESORCIÓN O DESECACIÓN SECUNDARIA**

La segunda etapa de la liofilización comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada al material que se está deshidratando, su misión es eliminar las últimas trazas de vapor de agua, evaporando el agua no congelada ligada al producto. Se lleva a cabo manteniendo el liofilizador a baja presión (610,5 Pa) y elevando la temperatura hasta un valor próximo a la del ambiente 15°C [4].

Manteniendo la presión en el liofilizador por debajo de la presión de vapor en la superficie del hielo (mediante una bomba de vacío), y condensando el vapor mediante un condensador de serpentín (a baja temperatura), se consigue que la liofilización prosiga y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento y el calor latente para la sublimación se transfiere hasta allí por conducción [4].

El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo, que se produce por deshidratación evaporativa del agua no congelada, el contenido de agua se reduce hasta el 2% (sobre su peso seco) [4].

### 1.3 BASES TEÓRICAS PROCESO DE LIOFILIZACIÓN

Los fenómenos de transferencia de materia y calor durante la liofilización se pueden resumir en términos de difusión de vapor de agua del frente de sublimación y la radiación y conducción de calor de la placa radiante. La transferencia de masa ocurre por migración de vapor a través de la capa seca del producto bajo acción de una diferencia de presión, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande. Como en todo proceso de secado, coexisten los fenómenos de transferencia de calor y materia [11].

#### 1.3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONGELACIÓN

Existen tres etapas de transferencia de calor durante el proceso de congelación en el cual se lleva el producto de una temperatura ambiente a una temperatura por debajo del punto de congelación. Las etapas de congelación son:

- **Transferencia de calor por encima del punto de congelación**  
Inicialmente existe un proceso de transferencia de calor sensible desde el producto a liofilizar hacia la cámara de trabajo, esto se calcula con la siguiente ecuación de la primera ley de la termodinámica [12]:

$$Q_s = m * C_p * (T_1 - T_2) \quad (1)$$

$Q_s$ : Transferencia de calor (W)

$T_1$ : Temperatura inicial (K)

$T_2$ : Temperatura final (K)

$C_p$ : Calor específico (kJ/kg\*k)

$m$ : Masa (kg)

- **Transferencia de calor por congelación**  
En la segunda etapa del proceso se realiza una transferencia de calor latente para poder realizar el cambio de fase, la cual se describe por medio de la siguiente ecuación [9]:

$$Q_l = m * h_{fg} \quad (2)$$

$Q_l$ : Calor latente (W)

$h_{fg}$ : Entalpia (calor latente de vaporización) (kJ/kg)

$m$ : Masa (kg)

- **Transferencia de congelación por debajo del punto de congelación**  
El proceso final vuelve a ser una transferencia de calor sensible ya que se presenta una disminución de la temperatura de 0°C a -30°C y se calcula por la ecuación de la primera ley de la termodinámica [9]:

$$Q_s = m * C_p * (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$Q_s$ : Transferencia de calor (W)  
 $T_1$ : Temperatura inicial (k)  
 $T_2$ : Temperatura final (k)  
 $C_p$ : Calor específico (kJ/kg\*K)  
 $m$ : Masa (kg)

### 1.3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE LA SUBLIMACION

La energía requerida para garantizar una sublimación constante debe ser igual a la transferencia de calor por conducción, por lo tanto todo el calor que llega al producto presenta una conducción a través de él. Esto se puede describir por medio de la ley de Fourier [12]:

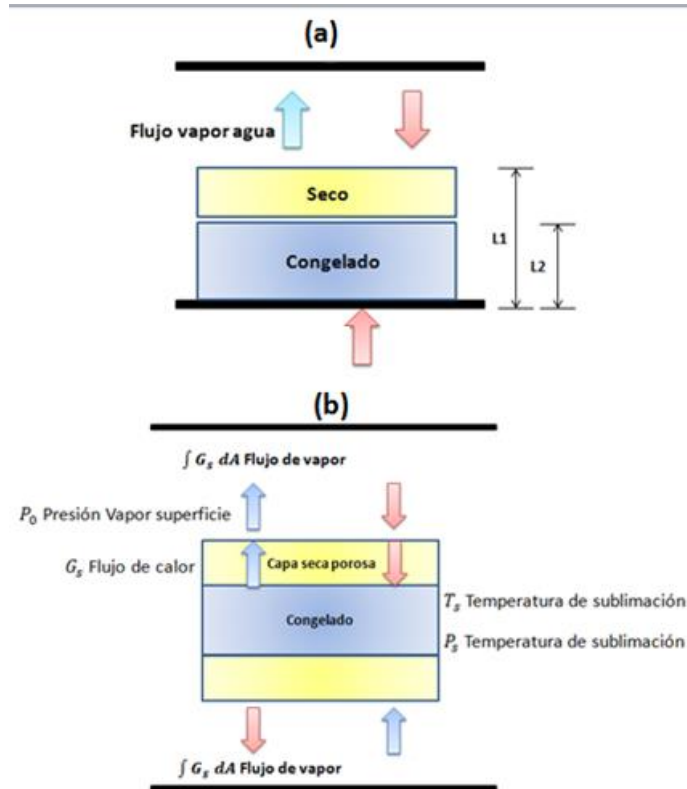
$$\frac{\dot{Q}}{A} = q = \frac{K*(T_S - T_F)}{(X_2 - X_1)} \quad (4)$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Calor por conducción a través del producto (W)  
 $A$ : Área de transferencia de calor ( $m^2$ )  
 $q$ : flujo de calor a través del producto ( $\frac{W}{m^2}$ )  
 $K$ : Conductividad térmica del producto seco ( $\frac{W}{m*K}$ )  
 $T_s$ : Temperatura de la superficie del producto (K)  
 $T_f$ : Temperatura de la sublimación del frente de hielo (K)  
 $(X_2 - X_1)$  o  $\Delta X$ : Espesor de la capa seca (m)

En la figura 3 se evidencia cómo ocurre el proceso de sublimación. Las capas exteriores están secas y el frente de hielo en el centro se reduce con el tiempo; la sublimación del agua ocurre en la superficie del hielo, y el vapor de agua debe difundirse por los poros de la(s) capa(s) seca(s) hacia la atmósfera de la cámara. En este modelo no se tiene en cuenta el flujo de calor conductivo que pasa a través de la capa congelada [13].

Figura 3 Flujo de calor y materia durante la liofilización: (A) secado por una cara; (B) disposición simétrica; secado por las dos caras



Fuente: [14]

La velocidad de transferencia de masa depende directamente de las condiciones de presión y temperatura dentro de la cámara de trabajo, las cuales son 0.610 kPa y  $-40^{\circ}\text{C}$  respectivamente, además de esto es importante tener en cuenta la temperatura mínima de condensación la cual es de  $35^{\circ}\text{C}$ , para así garantizar que el vapor no se devuelva a la cámara y se adhiera al producto nuevamente. Dado el caso que no se cumpla alguna de estas, se presenta un daño inmediato e irreversible en la estructura del producto, por lo cual reduce la velocidad de transferencia de vapor deteniendo así la deshidratación [12].

Esto se entiende que a velocidad constante de sublimación el caudal de evaporación es [12]:

$$\dot{m} = \frac{Q}{L_S} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] \quad (5)$$

$\dot{Q}$ : Flujo de calor de transferencia (W)

$L_S$ : es el calor latente de sublimación por lo tanto igualando (5) y (6) :

$$\dot{m} = \frac{K \cdot A \cdot (T_S - T_F)}{(L_S \cdot \Delta X)} \left[ \frac{Kg}{min} \right] \quad (6)$$

Teniendo en cuenta la transferencia interna de masa, se puede considerar entre otros los mecanismos de difusión molecular y difusión de vapor [12]. En este caso se utiliza la ley de Fick:

$$\dot{m} = \frac{D \cdot A \cdot (P_f - P_s)}{R \cdot T \cdot \Delta X} \quad (7)$$

$D$ : Difusividad del agua ( $m^2/s$ )

$R$ : Constante de los gases ideales ( $kJ/kg \cdot K$ )

$P_s$ : Presión parcial del agua en la superficie del producto (Pa)

$P_f$ : Presión Parcial del agua en el frente de sublimación (Pa)

$T$ : Temperatura media de la capa seca (K)

#### 1.4 SISTEMA BÁSICO DE LIOFILIZACIÓN

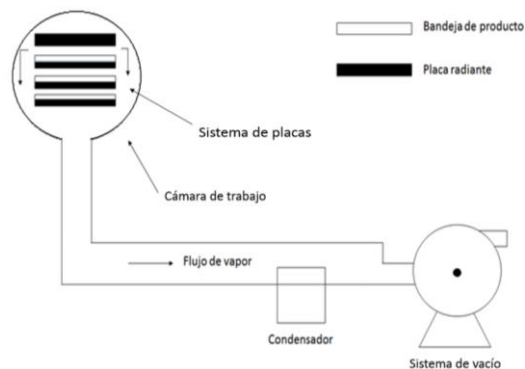
El proceso de liofilización se caracteriza por tener a su disposición otros subprocesos o sub-sistemas, capaces de ejecutar tareas secuenciales encadenadas una a otra para poder cumplir el objetivo de sublimar el agua contenida en el producto a ser tratado.

La secuencia de los subsistemas de un equipo de liofilización es el siguiente:

- Cámara de trabajo
- Sistema de placas
- Sistema de vacío
- Sistema de refrigeración

En la figura 4 se describe un sistema básico de liofilización donde se muestran cada uno de los sistemas que lo componen.

*Figura 4 Sistema básico de liofilización*



Fuente: [15]

### **1.4.1 CÁMARA DE TRABAJO**

Como se evidencia en la figura 4, la cámara de trabajo es el espacio donde se va a desarrollar todo el proceso de congelación, sublimación y de deshidratación del producto. Este sistema se empieza por una etapa de enfriamiento seguida por otra de congelación y finalmente la etapa de vacío, dentro de esta cámara de trabajo se encuentra el sistema de bandejas y el evaporador del sistema de refrigeración [5].

Esta cámara se puede clasificar según su configuración geométrica:

- Sistema de cámara rectangular
- Sistema de cámara redonda o cilíndrica
- Sistema especial para laboratorio

Todas estas configuraciones son fabricadas siempre en acero inoxidable y/o acrílico (cámara para laboratorio) [5].

### **1.4.2 SISTEMA DE PLACAS**

El sistema de placas es el compartimiento en el cual se colocan las bandejas con los productos que van a ser sometidos al proceso de liofilización. En los equipos de liofilización la entrada y salida de bandejas se efectúa a través de una compuerta de seguridad capaz de resistir el vacío ejercido durante el proceso y con un cierre completamente hermético para evitar pérdidas de la misma; Además de esto las placas son las principales herramientas para desarrollar el proceso de transferencia de masa y calor, y dependiendo del material y sus dimensiones se va a tener una conductividad térmica específica por lo cual el material seleccionado para la fabricación debe ser el correcto para una mejor transferencia [6].

Para agilizar el proceso de enfriamiento y posterior congelación del producto por contacto directo, el sistema de placas como se evidencia en la figura 4, se encuentra ubicado en la parte inferior un serpentín perteneciente al sistema de refrigeración el cual hace fluir el refrigerante [6].

### **1.4.3 SISTEMA DE VACÍO**

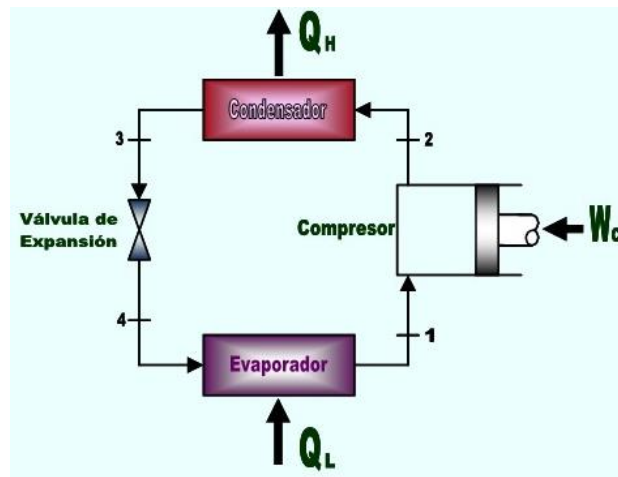
El sistema de vacío es uno de los más importantes para poder desarrollar la liofilización de cualquier producto, ya que se encarga de extraer la mayor cantidad posible de agua contenida en el producto. Como se describe en la Figura 4, el sistema de vacío está compuesto por una bomba encargada de hacer el vacío, la cual debe ser capaz de realizar la absorción y generar el vacío apropiado para desarrollar satisfactoriamente el proceso. En algunos liofilizadores industriales el sistema de vacío se realiza en dos etapas las cuales son: En la primera etapa se realiza vacío, y en la segunda etapa se añade calor

por medio de resistencias eléctricas para subir la temperatura del producto y volver a realizar vacío donde se extrae el agua restante del producto. Sin embargo en la mayoría de liofilizadores convencionales y en liofilizadores pilotos, como el que se desarrolló en este proyecto se utiliza un sistema de vacío de una sola etapa, ya que los productos que se realizan son utilizados como muestras experimentales, por tal motivo se reducen costos de fabricación al realizarlos de esta forma.

#### 1.4.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

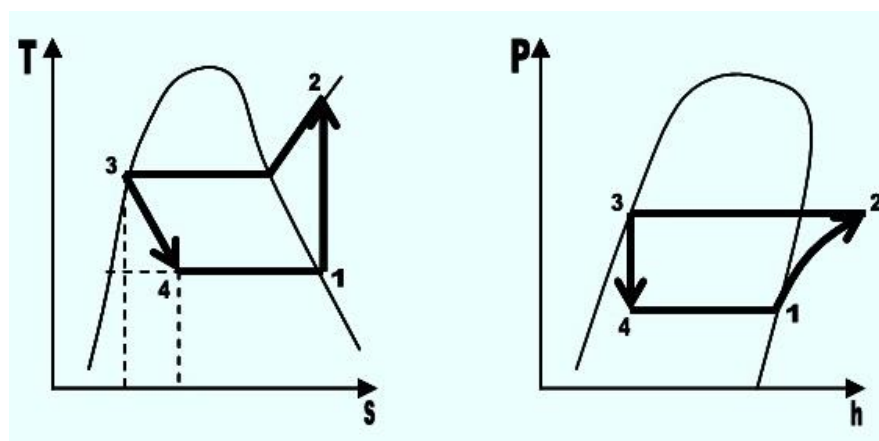
El sistema de refrigeración para un proceso de liofilización no es de tanta complejidad, por lo cual se puede utilizar un sistema de compresión de vapor como el de los refrigeradores de los hogares, el cual está compuesto por un compresor, condensador, evaporador y válvula de estrangulamiento, como se ilustra en la Figura 5 [9].

*Figura 5 Ciclo de Refrigeración por compresión de vapor*



Fuente: [9]

*Figura 6 Diagramas T-S y P-h, ciclo de refrigeración por compresión de vapor*



FUENTE: [9]

Como se observa en la Figura 6, el vapor saturado en el estado 1 se comprime isentrópicamente a vapor sobrecalentado, en el estado 2 el vapor refrigerante entra a un condensador, de donde se extrae calor a presión constante hasta que el fluido se convierte en líquido saturado en el estado 3. Para que el fluido regrese a una temperatura baja, se expande adiabáticamente en una válvula o un tubo capilar hasta el estado 4. En el estado 4, el refrigerante es una mezcla húmeda de baja calidad. Finalmente, pasa por el evaporador a presión constante. De la fuente de baja temperatura entra calor al evaporador, convirtiendo el fluido en vapor saturado y se completa el ciclo [9].

## 2. DISEÑO DE DETALLE

En este capítulo se realiza el análisis ingenieril para el diseño adecuado de un liofilizador. Para lograr lo anterior, se partió del análisis de ventajas y desventajas que se encuentran en equipos en el mercado actual, se establecen parámetros y requerimientos los cuales son fundamentales para realizar la presentación de cuatro propuestas de diseño. Finalmente se seleccionó una propuesta de diseño a la cual se le realiza el diseño de detalle.

### 2.1 COMPARACIÓN TÉCNICA DE LIOFILIZADORES EN EL MERCADO

En la tabla 3 se refleja la selección de las empresas representativas del mercado, donde se presentan las características más relevantes de diversos equipos de liofilización.

*Tabla 3. Valoración Técnica de Liofilizadores de laboratorio existente en el mercado*

características	Empresas						Intervalo
	Labconco	Telstar	Cima	aapptec	Direct industry	esco	
Peso del equipo (N)	2352	1666	7154	686	1176	450	<b>450 - 7154</b>
Altura (m)	0,7	1,01	1,245	0,48	0,46	0,495	<b>0.46 – 1.245</b>
Ancho (m)	0,74	0,765	1,9	0,425	0,556	0,573	<b>0.425 – 1.9</b>
Fondo (m)	0,72	0.7	0,818	0,575	0,72	0,453	<b>0.453 – 0.818</b>
Temperatura del condensador (°C)	-60	-45	-65	-35	-40	-30	<b>-30 – (-65)</b>
Área de Trabajo (m <sup>2</sup> )	0,36	0,2825	0,45	0,6	0,12	0,12	<b>0.12 – 0.36</b>
Mínima presión de vacío (Pa)	0,015	0,04	0,025	0,0345	0,075006	0,096	<b>0.015 – 0.096</b>
Potencia total kW	3	4,3	8	1,4	0,7	0,63	<b>0.63 - 8</b>
Costo del equipo en millones de pesos (\$)	15	25	30	13	14	12	<b>12– 25</b>

Fuente: [16], [17], [18], [19], [20], [21].

Se realiza un análisis cuantitativo de cada una de las características con base en los datos de la tabla anterior, definiendo el intervalo de cada una de las características, para así establecer un margen de diseño

### 2.2 DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS

Basados en la comparación técnica de liofilizadores, se identificaron parámetros y requerimientos básicos para el desarrollo de un nuevo diseño, el cual no afecte el proceso de liofilización y se encuentran dentro del margen de diseño en aspectos tales como: tamaño, consumo energético y costos de fabricación.

### 2.2.1 REQUERIMIENTOS DE USO.

- **Practicidad.** Es primordial la relación del usuario con el manejo del equipo, es decir que el sistema sea de fácil manipulación, para que la persona que opere el equipo tenga acceso a la toma de datos durante el proceso.
- **Seguridad.** Debe contar con elementos de protección en sus componentes mecánicos y eléctricos que minimicen los riesgos y accidentes como: un fusible para evitar problemas por sobre carga eléctrica, que los cables presenten un aislamiento eléctrico y presenten terminales en sus extremos para minimizar cortos por contacto, reducir los ángulos vivos para evitar golpes y/o cortes del operario.
- **Manipulación.** Se debe tener en cuenta la reducción de esfuerzos del operario por lo cual la ergonomía del equipo es de mucha importancia.
- **Mantenimiento.** Se debe buscar que el equipo tenga un mantenimiento preventivo y correctivo sencillo, con una accesibilidad para el montaje y desmontaje de sus componentes.

### 2.2.2 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES

- **Estructura del equipo.** la estructura debe ser lo suficientemente resistente para soportar el apoyo de todos sus componentes con un peso máximo de 490 N.
- **Aislamiento térmico.** Las paredes de la cámara de trabajo deben tener un aislamiento el cual garantice que la cantidad de calor perdido no sea superior al 10%.
- **Cantidad de componentes.** Debe contar con los elementos estrictamente necesarios los cuales son: unidad de vacío, unidad de refrigeración, cámara de trabajo, sensor de temperatura y de presión, que permitan el funcionamiento correcto del equipo.

### 2.2.3 REQUERIMIENTOS TÉCNICO - PRODUCTIVOS.

- **Temperatura y presión de trabajo.** El equipo debe trabajar por debajo del punto triple del agua para poder garantizar el proceso de sublimación, estas condiciones son  $-30^{\circ}\text{C}$  (mayor al punto eutéctico el cual es  $-21.5^{\circ}\text{C}$ ) y  $0.533\text{ kPa}$  respectivamente, como se muestra en el intervalo de la tabla 3.

- **Hermeticidad.** La puerta y la cámara debe proporcionar un sello hermético para poder garantizar las condiciones de vacío ideales, favoreciendo el proceso de sublimación.

#### 2.2.4 REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS.

- **Consumo.** Como el diseño está enfocado a un liofilizador a escala de laboratorio, se tiene en cuenta que el consumo energético debe ser bajo, el cual debe estar en el rango estipulado entre 0.63 – 8 kW como se muestra en la tabla 3.
- **Costos de fabricación.** Se busca que la fabricación del equipo, sea de bajo costo, el cual debe ser más bajo que el costo de un liofilizador de las marcas existentes del mercado, como se evidencia en la tabla 3 debe encontrarse dentro del intervalo de 12´000.000 – 25´000.000. Para lograr esto la construcción debe ser con elementos estándar en el mercado, para su fácil obtención, la selección de materiales debe ser ideal para cumplir las normas sin afectar un aumento del precio.

Para poder hacer un análisis de todos los requerimientos presentados anteriormente, se introducen en una matriz QFD (Quality Function Deployment), donde se evidencian las especificaciones de ingeniería generadas para los requerimientos dados por el cliente, además de esto se presentara la correlación que existe entre cada uno de ellos y su importancia. Esta matriz presenta unas gráficas para analizar el equipo diseñado frente a la competencia real existente, tomando como puntos de evaluación los requerimientos del cliente y dando un valor cuantitativo para dar a conocer las falencias y las fortalezas del equipo diseñado. Esta matriz se encuentra en la Figura 7.



## 2.3 DISEÑO PRELIMINAR

### 2.3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Con cada uno de los parámetros y requerimientos generales de más importancia implicados en el proceso de liofilización se realizó el análisis para determinar las especificaciones para el diseño del liofilizador a escala de laboratorio.

### 2.3.2 MATERIAL.

Teniendo en cuenta la norma ISO 22000 (Para administración de alimentos y medicinas) y la norma GPM [buenas Prácticas de fabricación] se establecerá que todo equipo y utensilios empleados en las áreas de manipulación de productos alimenticios y que puedan entrar en contacto con ellos, debe ser un material que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores y resistente a la corrosión, y que sea capaz de resistir operaciones de limpieza y desinfección. Las superficies habrán de ser lisas y estar exentas de poros y grietas.

En caso de la industria de alimentos el material más recomendado es el acero inoxidable, especialmente para las superficies que están en contacto con el alimento [22]. La característica de acabado superficial, lo hace ideal para obtener una superficie lisa y de fácil limpieza [22].

En general los tipos AISI 304 y 316 son los más recomendados. Cuando hay que hacer soldadura se recomienda los tipos AISI 304 y 316, para evitar la corrosión inter-granular, especialmente para los procesos de limpieza y en tanques o recipientes donde se almacenan materias primas de productos a granel [22].

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316 y el AISI 304 se presentan en la tabla 4

*Tabla 4 Propiedades mecánicas del acero AISI 316 y el AISI 304*

<b>PROPIEDADES MECANICAS</b>	<b>AISI 316</b>	<b>AISI 304</b>
Límite de Fluencia (MPa)	340	310
Resistencia a la Tracción (MPa)	460-860	460-1100
Resistencia ultima (MPa)	568	568
Dureza Brinell	160-190	160-190
Módulo elástico (GPa)	190-210	190-210
Porcentaje de alargamiento en 50.8 mm	50	55

Fuente: [23]

Como se observa en la tabla 4 las propiedades mecánicas de los dos aceros AISI 316 y AISI 304 son muy similares, por lo tanto para la construcción de la

cámara, las bandejas y placas se utilizara el acero AISI 304 ya que su costo en el mercado es más bajo, comparado con el AISI 316.

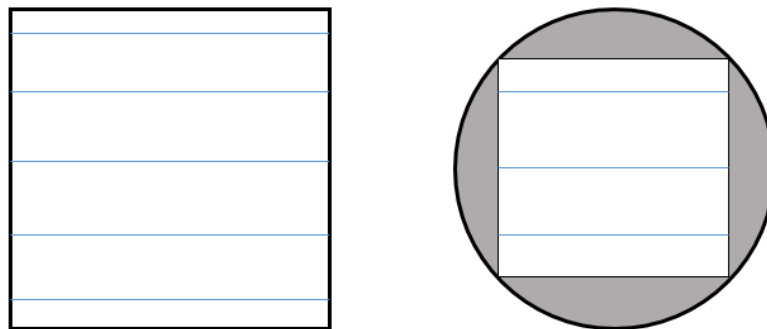
### 2.3.3 FORMA DE LA CÁMARA

Los parámetros que se tuvieron en cuenta en cuanto a la forma de la cámara fueron:

- Función de la cámara, además de poder cargar y descargar el producto.
- Resistencia necesaria para soportar las diferencias de presiones.
- Forma en la cual el material se pueda conseguir en el comercio, por ejemplo tubo, lámina, placa, etc.
- Las facilidades instrumentales para la construcción del cuerpo de la cámara, bridas, conexiones, entre otros. y la comodidad para el mantenimiento.

Las dos formas principales de las cámaras son la cilíndrica y la cúbica. La forma elegida para la cámara es la cúbica, pues permite un mejor aprovechamiento del área de trabajo por metro cuadrado, rapidez y facilidad en la fabricación, facilidad de obtención de materiales en el mercado (lámina) por otro lado, la forma cilíndrica desperdicia una mayor cantidad de área de trabajo como se observa en la Figura 8, ya que se requiere una sección cúbica interna y es donde se ubican bandejas perdiendo espacio por el contorno.

*Figura 8 Aprovechamiento del espacio Forma Cubica Y Cilíndrica*



Fuente: Autores

### 2.3.4 TAMAÑO DE LA CÁMARA

Al establecer el tamaño de la cámara se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Número de placas dentro de la cámara.
- Separación entre cada placa.
- Producto a liofilizar.
- Unidad de evaporación.

Con estos factores se determina el tamaño de la cámara definiendo cada uno de ellos de la siguiente forma: se tomará como referente un máximo de dos placas las cuales quedaron separadas entre sí a una distancia máxima de 10 cm, para tener mejor distribución y acceso a las muestras, donde se crean tres compartimientos en los cuales se ubicó el producto a liofilizar. En el caso de este proyecto, el producto fueron plantas aromáticas las cuales no ocupan un gran volumen en la cámara, el posicionamiento del producto se realiza en cajas Petri las cuales tienen un diámetro de 10 cm cada una, para un total de 18 cajas Petri, con esto se determinó el ancho y largo de las placas el cual fue de 30 cm para poder acomodar 6 cajas Petri por compartimiento, el evaporador consta de una tubería que pasa por el inferior de cada placa la cual tiene un espesor de máximo 1 mm para poder realizar la transferencia de calor al producto y lograr una congelación homogénea.

Finalmente las dimensiones de la cámara de trabajo fueron 30,5 cm de ancho por 36.6 cm de alto y una profundidad de 24 cm.

### **2.3.5 AISLAMIENTO DE LA CÁMARA**

Al interior de la cámara de liofilización la temperatura se definió en  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  al iniciar la operación de liofilización. Con el fin de mantener esta temperatura durante toda la etapa de congelación y evitar altos consumos de refrigerante, es necesario aislar la cámara del ambiente exterior por medio de un material aislante que proporcione una alta resistencia al flujo de calor del exterior al interior de la cámara.

Algunos materiales aislantes empleados son: fibra de vidrio, poliestileno expandido o extruido y poliuretano. Los espesores siempre están relacionados con las condiciones más desfavorables, teniendo en cuenta las temperaturas exteriores más elevadas, para este proyecto se toma una temperatura exterior máxima de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El material aislante debe proporcionar una gran resistencia al flujo de calor. En la Tabla 5 se presenta el coeficiente de conductividad térmica de los aislantes más comunes.

Tabla 5 Conductividad térmica de algunos aislantes

Material	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad [W/(mK)]
Poliestireno expandido	De 10 a 12	0.047
	De 12 a 15	0.044
	De 15 a 20	0.038
	De 20 a 25	0.035
	De 25 a 40	0.033
Poliestireno extruído	De 25 a 30	0.034
	De 30 a 50	0.027
Poliuretano	De 28 a 32	0.023
	De 32 a 40	0.020
	De 40 a 80	0.017
Espumas fenólicas	De 28 a 32	0.038
	De 32 a 40	0.035
	De 40 a 80	0.037
Corcho	De 90 a 110	0.043
	De 110 a 150	0.037
Fibra de vidrio	De 13 a 20	0.048
	De 20 a 50	0.037
	De 50 a 100	0.036
Vidrio celular	De 100 a 140	0.049
	De 140 a 200	0.050

Fuente: [12]

Como se aprecia en la tabla 5, el poliuretano es el material con la conductividad térmica más baja, además de ser de fácil obtención en el mercado, por lo cual se seleccionó este material para el desarrollo del proyecto.

### 2.3.6 SELECCIÓN DE REFRIGERANTE

Los refrigerantes que trabajan en el intervalo de temperatura de -70°C y -50°C son los freones (CFC), el amoníaco, el nitrógeno líquido y el dióxido de carbono. Sin embargo en el protocolo de Montreal hizo un llamado para la eliminación de los CFCs a finales de 1995. La necesidad de refrigerantes amigables con la capa de ozono para reemplazar los CFCs tales como: R-11, R-12 y R-502 llevo a la sustitución de varios de ellos.

Para alcanzar temperaturas inferiores a 0°C, en el caso de este proyecto, era empleado de forma exclusiva el refrigerante R502, pero este refrigerante fue descontinuado y sacado del mercado por no ser amigable con el medio ambiente fue reemplazado por el R507 y R404A. En la siguiente tabla 6 se encuentran las propiedades de cada uno de ellos y así se puede hacer una correcta elección del refrigerante que fue usado para esta aplicación.

El refrigerante R404A es empleado para sistemas grandes de refrigeración comercial, es un reemplazo para el R502.y consiste en una mezcla de R1125, R143A y R134A en proporción 44%, 52% y 4% [10].

El refrigerante R507 es usado para circuitos cerrados de refrigeración en enfriamiento comercial, industrial y en otras aplicaciones de refrigeración a bajas temperaturas. Es una mezcla de R125 y R134A en proporción 50% y 50% [10].

*Tabla 6. Propiedades del refrigerante 404A y R507*

Refrigerante	R 404A	R 507
Apariencia	Líquido volátil blanco con aroma a éter	Incoloro en estado gas o líquido
Punto de ebullición (101.32 kPa)	-46.8°C	-46.7 °C
Presión de vapor (a 25°C)	1270 kPa	No determinado
Densidad relativa (0°C, 101.3 kPa)	1.04	1060
Solubilidad en agua	No determinada	No soluble
Temperatura crítica	72.4°C	70.9 °C
Presión Crítica	3688 kPa	3830 kPa

Fuente: [10].

Al estudiar las propiedades de los anteriores refrigerantes, se observa que el refrigerante R404A y el R507 tienen propiedades similares, lo cual permite utilizar cualquiera de los dos indiferentemente. La elección está enfocada a la oferta comercial de estos refrigerantes, por lo tanto se emplea el R404A, el cual es fácil de adquirir.

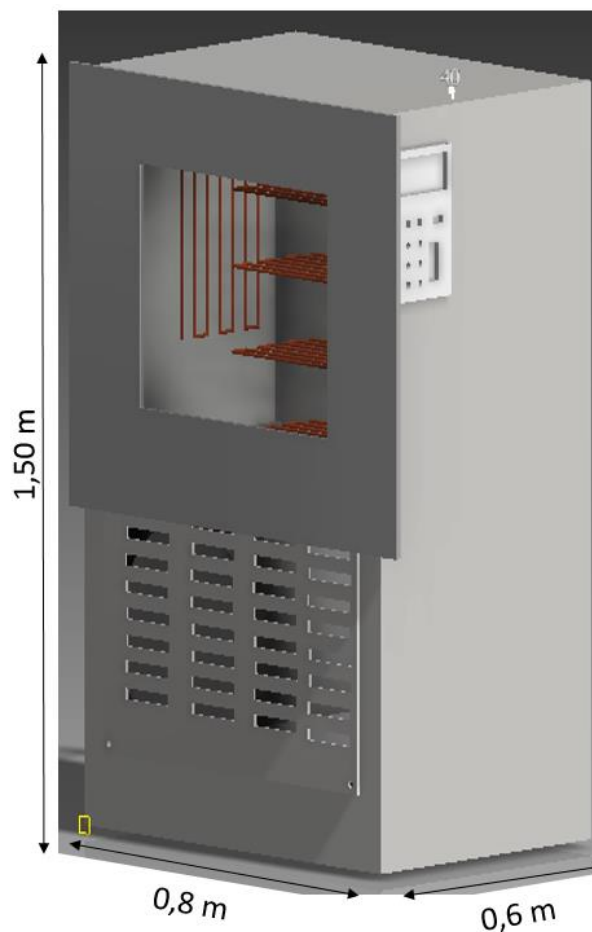
## **2.4 PRESENTACION DE ALTERNATIVAS**

En el desarrollo preliminar del diseño se plantearon 4 alternativas y configuraciones con las cuales se buscó llevar a cabo el proceso de la manera más eficiente. Con base en esto se desarrolló la parte funcional, luego se seleccionó la alternativa que cumpliera con los requerimientos establecidos, y a partir de esto evolucionó hasta definir una propuesta base para el diseño final.

### **2.4.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO 1.**

Es un equipo diseñado de forma rectangular, sus dimensiones son 1,50m de altura X 0,80m de ancho X 0,6m de profundidad, el sistema de refrigeración se ubica en la parte inferior del equipo, el condensador tiene un sistema de descongelamiento por agua caliente la cual se calienta por medio de resistencias instaladas en la parte inferior del tanque de desagüe y el evaporador se ubica alrededor de la cámara de trabajo por lo esto es un sistema de cámara simple, el sistema de calentamiento de las bandejas se realiza por medio de resistencias ubicadas en el inferior de cada bandeja, el desagüe de la cámara de condensación es una superficie inclinada la cual por gravedad lleva el agua hacia el tanque. El sistema de vacío está ubicado en la parte superior de la cámara de trabajo y va directamente desde la bomba de vacío.

Figura 9 Alternativa de diseño # 1 modelada en CAD



Fuente: autores

Tabla 7 Ventajas y desventajas alternativa # 1

➤ VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite realizar el proceso de forma práctica.</li> <li>• Cámara de trabajo cuadrada de fácil construcción.</li> <li>• El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con el sistema de refrigeración se requeriría instalar mucha tubería para lograr bajar la cámara a -40 °C.</li> <li>• Con el sistema de simple cámara no se lograría un proceso continuo de trabajo y el condensador llegaría a su máxima capacidad sin haberse completado el proceso y no se lograría el retiro total de la humedad del producto.</li> <li>• El descongelamiento por agua caliente haría más ineficiente el proceso.</li> </ul>

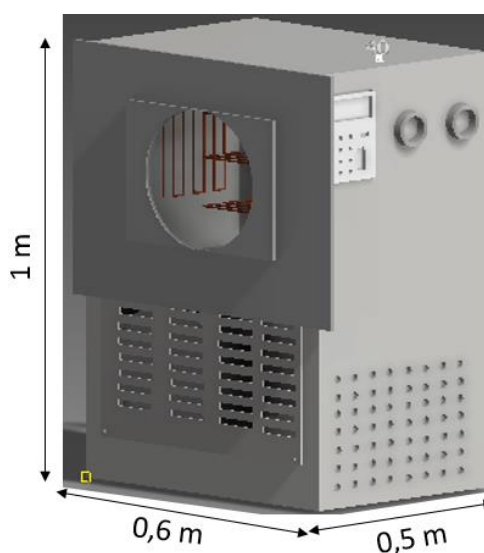
Fuente: autores

### 2.4.2 ALTERNATIVA DE DISEÑO 2.

La segunda alternativa propuesta es un diseño de cámara simple sus dimensiones son 1,0m de altura X 0,6 m de ancho X 0,5 m de profundidad, con doble cámara de condensación para que exista un proceso continuo, en el cual cuando una de las cámaras este absorbiendo humedad la otra se está descongelando por medio de vapor de agua. Ambas cámaras son selladas por un mecanismo de válvulas las cuales son cerradas por resortes de elasticidad elevada y se abren por el vacío generado por la bomba en cada cámara.

El sistema de calentamiento de las bandejas es el mismo que la alternativa 1. Este diseño por ser más individualizado respecto a sus cámaras de condensación presenta una línea de vacío que se divide en cada una de ellas por medio de válvulas a la entrada de cada cámara, para asegurar que las cámaras trabajen de forma alternada.

*Figura 10 Alternativa de diseño # 2 modelada en CAD.*



Fuente: autores

*Tabla 8 Ventajas y desventajas alternativa # 2*

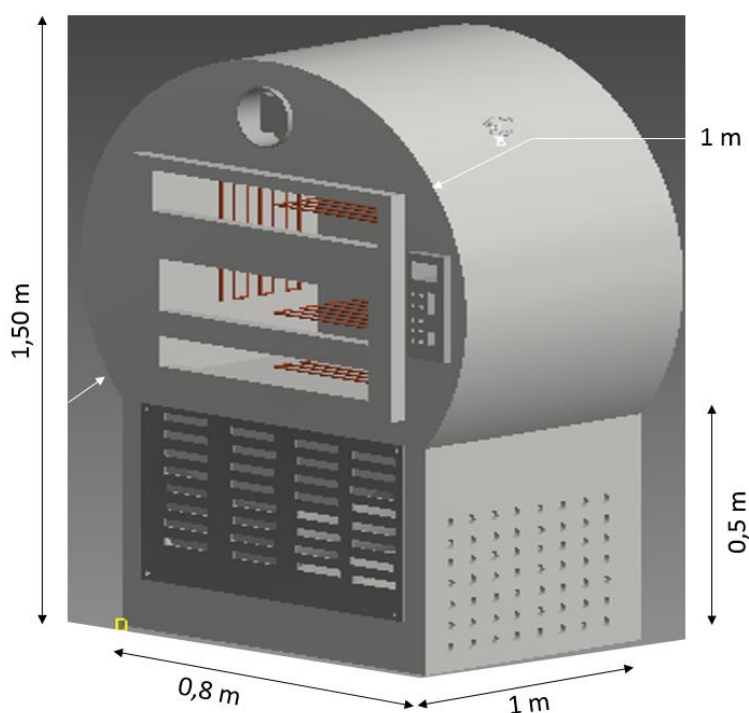
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara cuadrada de fácil construcción.</li> <li>• El sistema de doble cámara permitiría un proceso de retiro de humedad continuo.</li> <li>• El descongelamiento por vapor de agua es más apropiado.</li> <li>• El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es casi imposible llegar a la temperatura deseada, ya que la tubería de refrigeración se encuentra muy alejada del producto a congelar.</li> <li>• El proceso no es completamente eficiente ya que sólo una parte de la tubería de condensación estará trabajando mientras la otra estará apagada.</li> <li>• El equipo presenta mayor dificultad de construcción, por su doble cámara.</li> <li>• Más costoso, mayor cantidad de componentes y complejidad de las cámaras.</li> </ul>

Fuente: autores

### 2.4.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO 3.

Este diseño presenta una forma más compacta respecto a la altura pero mayor profundidad ya que el sistema de refrigeración está ubicado en la parte trasera de la cámara de trabajo, sus dimensiones son 1,50m de altura X 0,8 m de ancho X 1,0 m de profundidad, en la parte inferior presenta un soporte en donde está ubicado el tanque de desagüe y almacenamiento del agua de descongelamiento y la bomba de vacío, el descongelamiento del condensador se realiza por medio de rociadores de agua caliente, presenta un sistema de dos cámaras individuales para garantizar un proceso continuo en donde cada cámara se abre y se cierra con una solenoide, la cual está conectada con el condensador y se activan cuando la capacidad de congelación de vapor de agua del condensador esta al máximo.

Figura 11 Alternativa de diseño # 3 modelada en CAD



Fuente: autores

Tabla 9 Ventajas y desventajas alternativa # 3

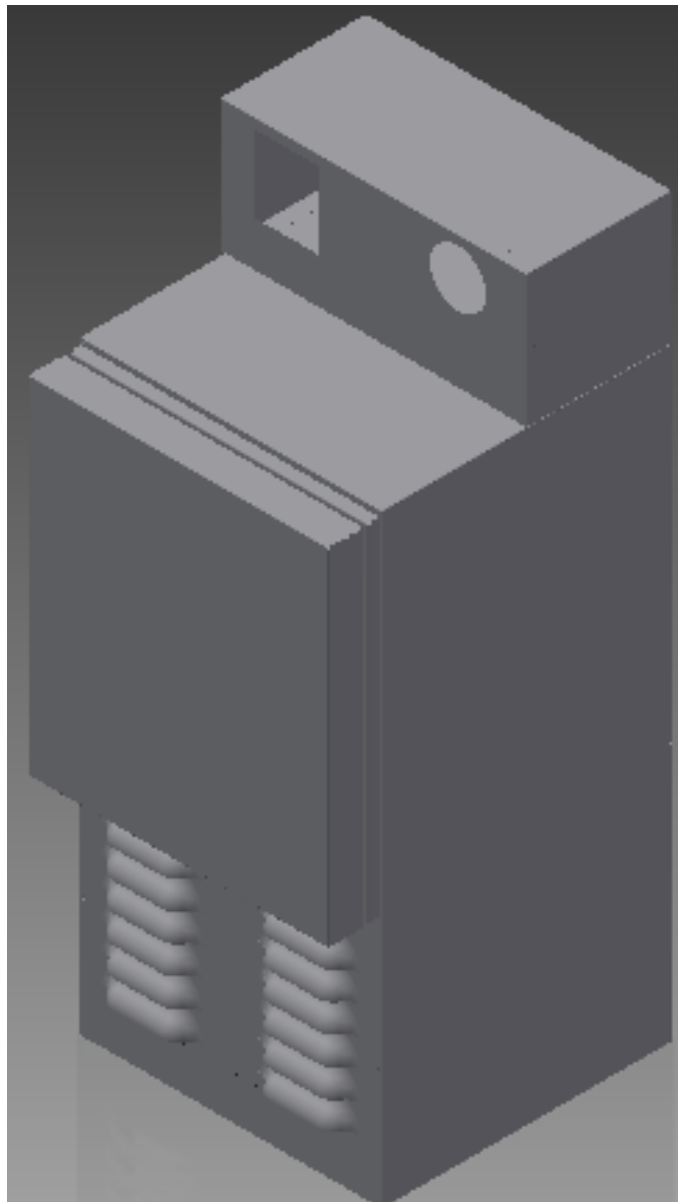
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema de forma cilíndrica garantiza mayor hermeticidad.</li> <li>• El diseño es mucho más compacto</li> <li>• El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a su forma cilíndrica y el diseño de la puerta de la cámara de trabajo la construcción se hace más compleja y por ende costosa.</li> <li>• Es más complejo ubicar la cantidad de tubería requerida.</li> <li>• El descongelamiento por rociadores no es adecuado.</li> </ul>

Fuente: autores

#### 2.4.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO 4

Es un equipo diseñado en una forma rectangular, sus dimensiones son 0,8m de altura X 0,6m de ancho X 0,5 de profundidad, el sistema de evaporación se encuentra alrededor de toda la cámara de trabajo, el sistema de refrigeración se encuentra ubicado en la parte inferior del equipo, el condensador presenta un descongelamiento por aire inducido por medio de un ventilador, el sistema de vacío se encuentra ubicado en la parte superior del equipo y va conectado directamente a la bomba de vacío, la puerta presenta un empaque totalmente hermético para garantizar la hermeticidad de la cámara de trabajo, presenta un interruptor para graduar la velocidad de congelamiento de la cámara de trabajo.

*Figura 12 Alternativa de diseño 4 modelada en CAD*



Fuente: autores

Tabla 10 Ventajas y desventajas alternativa # 4

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La forma del equipo es de fácil construcción.</li> <li>• Fácil acceso para su mantenimiento.</li> <li>• El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> <li>• Bajo costo de construcción.</li> <li>• Adecuado por su tamaño y forma para trabajar como piloto de pruebas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con el sistema de refrigeración se requeriría instalar mucha tubería para lograr bajar la cámara a -40 °C.</li> <li>• Con el sistema de simple cámara no se lograría un proceso continuo de trabajo y el condensador llegaría a su máxima capacidad sin haberse completado el proceso y no se lograría el retiro total de la humedad del producto.</li> </ul>

#### 2.4.4 VALORACION TÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Se realiza una valoración de las características más importantes de las alternativas propuestas, donde se evidencia que la alternativa 4 tiene un mayor valor frente a las otras dos alternativas. En la Tabla 11 se encuentra dicha calificación.

Tabla 11 Valoración de las características técnicas de las alternativas de diseño

CARACTERÍSTICAS	VALOR PORCENTUAL	ALTERNATIVAS DE DISEÑO				VALORES
		N°1	N°2	N°3	N°4	
Tamaño	13%	4	4	2	5	5 Excelente
Forma	16%	4	3	5	4	4 Bueno
Capacidad de trabajo	16%	3	4	3	3	3 Regular
Temperatura	13%	5	4	4	5	2 Malo
Presión	15%	4	4	5	4	1 Deficiente
Peso	15%	4	3	2	4	
Material	12%	4	4	4	4	
Calificación		3,97	3,69	3,58	4,11	

FUENTE: Autores

Realizando un análisis de las ventajas, desventajas y la valoración de las alternativas propuestas anteriormente, se llegó a una propuesta definitiva la cual cumple con las especificaciones y parámetros de diseño, dando así una solución al problema planteado para este proyecto, buscando obtener un equipo de liofilización óptimo para el secado de plantas aromáticas.

### **3. DISEÑO BÁSICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR A ESCALA LABORATORIO.**

Para poder entrar en la etapa de diseño básico y detallado del equipo se tuvo en cuenta cada uno de los parámetros definidos previamente para la propuesta de diseño final y todos los requerimientos y especificaciones estipulados en la parte del diseño preliminar del liofilizador.

#### **3.1 DISEÑO ESTRUCTURAL.**

Es importante resaltar que por tratarse de un liofilizador a escala de laboratorio, debe tener una estructura compacta con una resistencia mecánica suficiente sobre la cual irán apoyados todos sus componentes.

La estructura base del liofilizador está compuesta de un mueble en donde se encuentra la cámara de trabajo dividida por bandejas y los alojamientos de cada uno de los subsistemas que componen el equipo.

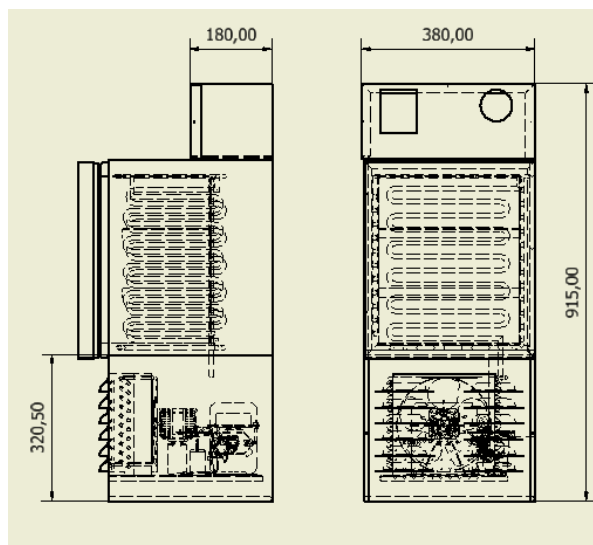
Basados en esto y en el estudio del proceso de liofilización que se realizó anteriormente en la etapa de diseño conceptual del proyecto y la información recopilada, de los equipos de liofilización existentes diseñados por empresas tales como: Labconco, telstar, cima aaptec, esco y direct industry. Se puede afirmar que presentan similitud en características; algunas de ellas son los materiales, los elementos principales del sistema de refrigeración y algunos elementos de control.

Las dimensiones del mueble están definidas de acuerdo a las dimensiones de los componentes del sistema y las dimensiones de la cámara están definidas en la carga máxima de producto que se va a liofilizar.

##### **3.1.1 MUEBLE.**

Como se explicó en las especificaciones de diseño, de acuerdo a las normas se definió la utilización de **Acero Inoxidable Brillante 304 calibre 16**, para la construcción interna de la cámara de trabajo y las bandejas, y la estructura externa del equipo de lámina de **Acero galvanizado calibre 22**.

*Ilustración 1 Vista frontal y lateral de la estructura del liofilizador piloto.*



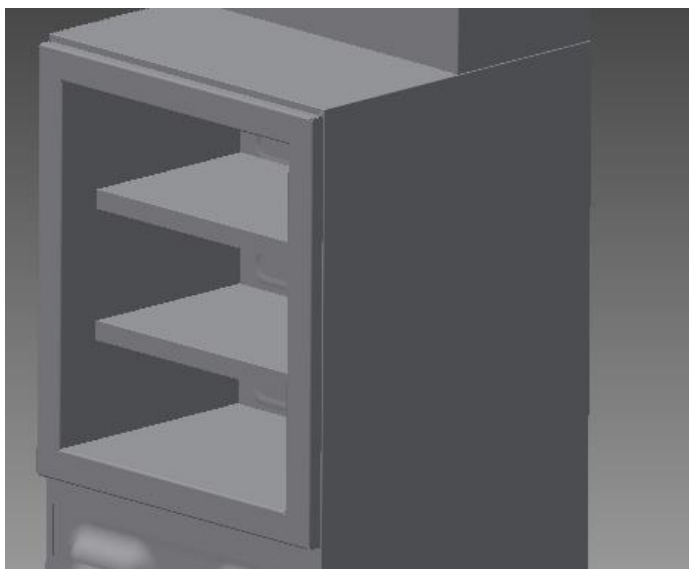
Fuente: autores

El equipo consta de tres zonas claramente identificadas; en la parte inferior se compone de una caja donde están ubicadas los subsistemas de refrigeración y vacío con sus respectivos componentes y toda la tubería del sistema, en la parte media se encuentra la cámara de trabajo, dentro de la cual están ubicadas las bandejas y en la parte superior se encuentra ubicado los controles de temperatura y presión.

### **3.1.2 CÁMARA DE TRABAJO.**

En la cámara de trabajo es el espacio donde se lleva a cabo todo el proceso de liofilización de las plantas aromáticas, se encuentran las bandejas, el sistema de refrigeración esta por todas las paredes de la cámara de trabajo y en las bandejas, el cual se encarga en el intercambio de energía del refrigerante y la cantidad de producto presente.

*Ilustración 2 Cámara de Trabajo modelada en CAD.*



Fuente: autores

### **3.1.3 PUERTA.**

La construcción de la puerta de la cámara de trabajo, la lámina interna está hecha en acero inoxidable brillante 304 calibre 16, con una capa de aislamiento de poliuretano entre la parte externa e interna de la misma, la parte externa está construida con lamina de acero galvanizado calibre 22.

### **3.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACION.**

En el proceso de liofilización el sistema de refrigeración tiene un papel muy importante ya que es el encargado de realizar la primera etapa del proceso el cual consiste en llevar el producto (plantas aromáticas) a una temperatura por debajo de los  $-35^{\circ}\text{C}$ , para el liofilizador a escala de laboratorio se definió un sistema de refrigeración utilizando tubería en cobre por su alta conductividad térmica y su fácil adquisición en el mercado además logra con eficiencia el proceso de congelamiento.

### **3.3 DISEÑO DETALLADO**

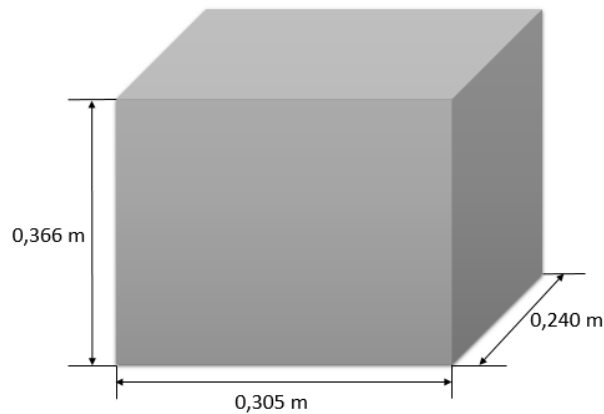
#### **3.3.1 DISEÑO MECÁNICO**

El análisis mecánico del liofilizador a escala de laboratorio comienza con el cálculo del espesor mínimo de la lámina que se utilizó para la construcción de la cámara de trabajo, donde están presentes los esfuerzos más grandes de todo el equipo, este cálculo es de suma importancia ya que al seleccionar una lámina de espesor menor al determinado la cámara de trabajo fallara. Seguido a esto se realizó un modelamiento con elementos finitos para corroborar y garantizar que el material seleccionado para la construcción de la cámara resista los esfuerzos generados por la presión de vacío.

- **DETERMINACION DEL ESPESOR MÍNIMO DE LA LAMINA**

El cálculo del espesor mínimo del material está relacionado con el límite a la fluencia del material seleccionado y las dimensiones de la cámara de trabajo, especificadas en el numeral 2.3.4, en este proyecto es acero inoxidable 304 el cual tiene un límite a la fluencia de 310 MPa, como se muestra anteriormente en el la tabla 5 del numeral 2.3.2.

*Figura 13 Esquema de dimensiones de la cámara de trabajo*



Fuente: Autores

Para determinar el espesor de la lámina de un recipiente sometido a presión de vacío se utilizó la siguiente ecuación [24]:

$$t = 2.45 * L * \sqrt{\frac{\alpha * H * 0.36 * G}{\sigma_y}}$$

Donde

$L$  = Largo del recipiente

$H$  = Alto del recipiente

$G$  = Gravedad específica del aire

$\sigma_y$  = Esfuerzo de fluencia del material ( $S_y$ )

$\alpha$  = Factor que depende de la relación de la longitud y la altura del recipiente  $\left(\frac{H}{L}\right)$

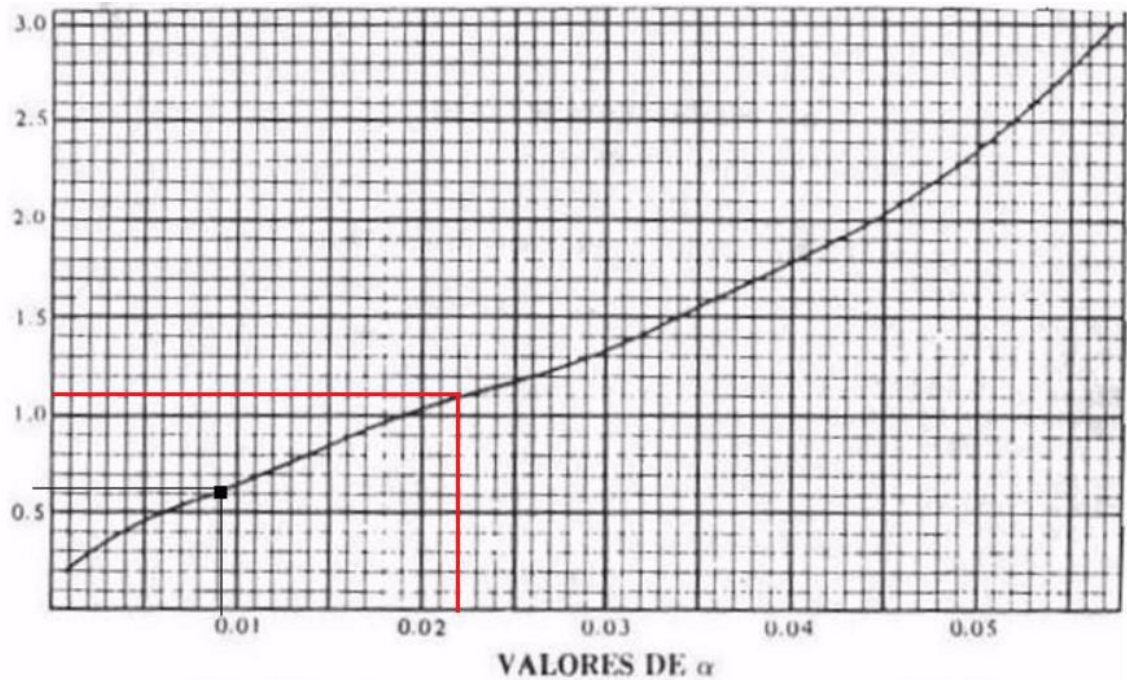
Dimensiones

$$H = 0.366 \text{ m} \cong 12.047 \text{ in}$$

$$W = 3.05 \text{ m} \cong 12 \text{ in}$$

$$L = 0.240 \text{ m} \cong 9.44 \text{ in}$$

**Grafica 1 Relación entre la altura y la profundidad**



Realizando la relación entre la altura y la profundidad de la cámara de trabajo se utilizó la gráfica 1, para determinar el valor de  $\alpha$  el cual se utilizara en la ecuación para determinar el espesor de la lámina.

$$\frac{H}{L} = \frac{12.047in}{9.44in} = 1.27 in$$

$$\alpha = 0.025$$

Se reemplazan todos los datos en la fórmula del espesor.

$$t = 2.45 * (9.44 in) * \sqrt{\frac{0.025 * (12.047 in) * 0.36 * (1)}{44961 PSI}}$$

$$t = 0.035 in \cong 0.89 mm$$

El mínimo espesor determinado es de 0.9 mm, para soportar la resistencia a la fluencia y así la cámara de trabajo no vaya a fallar por este defecto. Con un factor de diseño de 1,5 el espesor mínimo es de 1,35 mm, en el mercado las láminas se consiguen por espesores estandarizados por calibres, para el diseño

seleccionado anteriormente se seleccionó una lámina de calibre 16, el cual hace referencia a un espesor de 1,5 mm.

- **ANÁLISIS MECÁNICO**

El análisis mecánico para este tipo de configuraciones (cubicas), no se puede realizar de forma teórica ya que no existen tablas con información sobre los concentradores de esfuerzo, por lo cual solo hay dos maneras correctas de realizar este análisis y son las siguientes:

- **Norma ASME sección VIII,**
- **Modelación por elementos finitos tipo Shell**

Se seleccionó el método de elementos finitos, para determinar los esfuerzos mecánicos soportados por la lámina debido a la presión de vacío dentro de la cámara, la cual mostró los resultados del esfuerzo máximo y las deformaciones máximas las cuales comparadas con los permitidos por la norma ASME y las propiedades del material dan como resultado un diseño aprobatorio.

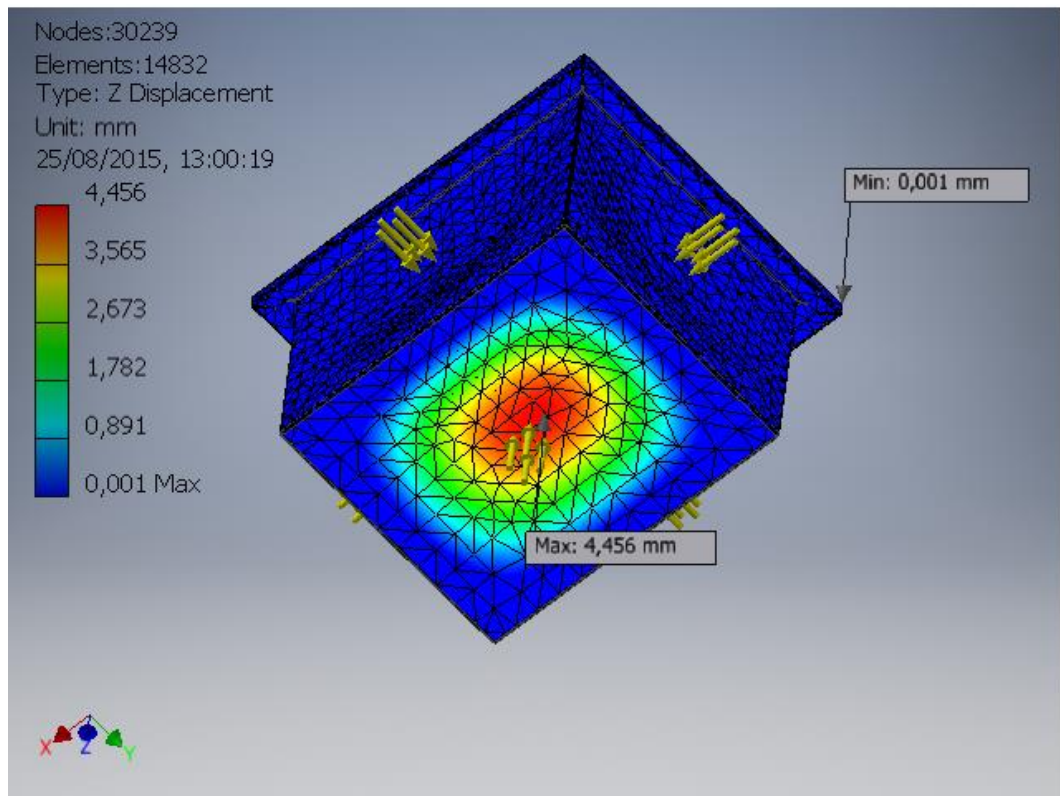
- **MODELACIÓN POR ELEMENTOS**

El software empleado fue inventor, el cual tiene un módulo para simulaciones de elementos finitos. Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes: tamaño de malla, presión ejercida sobre la cámara de trabajo, espesor de la lámina y área de contacto.

- Tamaño de malla, entre más pequeña sea la malla seleccionada para hacer la simulación, el resultado es mucho más apegado a la realidad ya que presenta mayor cantidad de nodos para simular comportamiento de la cámara de trabajo bajo la presión definida.
- Espesor de la lámina, para el diseño de la cámara es de 1,5 mm según los cálculos anteriores.
- Área de contacto, esta área hace referencia al área donde ejercerá la fuerza externa de vacío.
- Presión, 0.074 MPa correspondiente al vacío generado por la bomba de vacío utilizada.

Se realizó la simulación con elementos finitos para la cámara de trabajo, donde se evidencio que el desplazamiento máximo es de 4,456 mm, en la parte trasera de la cámara la cual presenta una mayor área, como se ve en la figura 14. Según la norma ASME sección VIII división I, la deflexión máxima permitida para recipientes a presión es de:  $A=L/500$ , donde L es el lado más largo del recipiente [25]. Resolviendo esta fórmula la deflexión máxima permitida para la cámara diseñada es de 0,732 mm, por lo cual esta cámara presentara fallas por pandeo cuando funcione el sistema de vacío en el equipo.

Figura 14 Desplazamiento máximo de la cámara de trabajo



Fuente: Autores

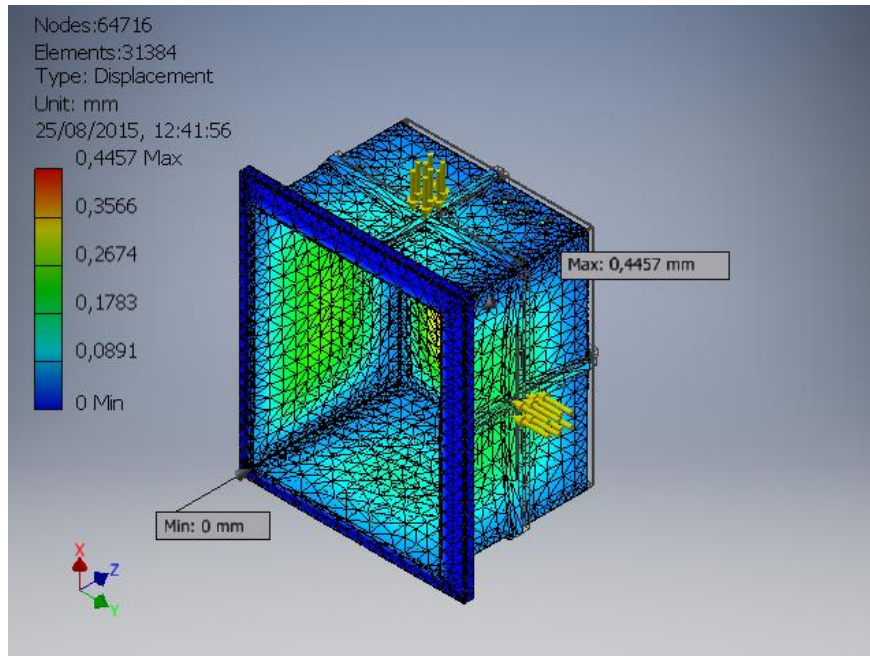
Para evitar que la cámara presente fallas por pandeo como se mostró anteriormente en la figura 14, se realizó un diseño de unos soportes en varilla cuadrada de acero 304 los cuales están soldados en la parte exterior de la cámara para disminuir el esfuerzo y el desplazamiento máximo que se genera por la fuerza externa de vacío. Este diseño se realizó en dos configuraciones las cuales son:

- Soportes de 10mm X 10mm en forma de cruz.
- Soportes de 10mm X 10mm en forma de X.

Para seleccionar las dimensiones de los soportes se realizaron diferentes simulaciones, hasta que se obtuvo un resultado de desplazamiento que se encontró por debajo del máximo permitido.

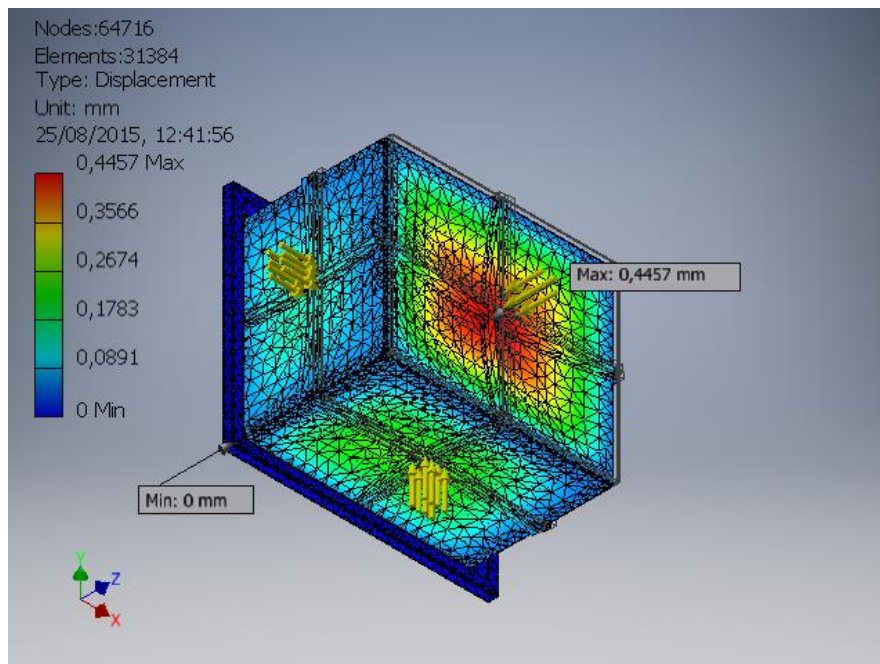
- **Simulación de la cámara de trabajo con soporte en cruz**

*Figura 15 Desplazamiento máximo soporte en cruz*



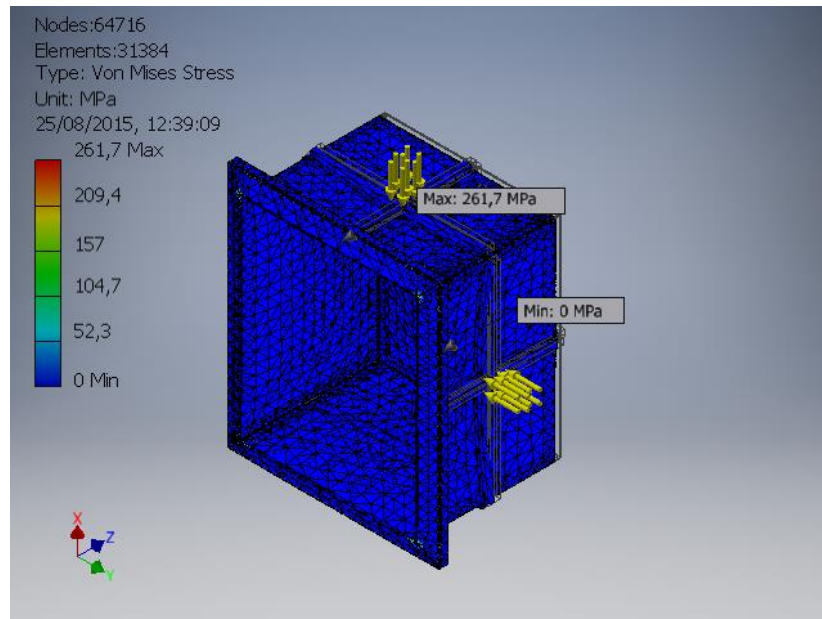
Fuente: Autores

*Figura 16 Desplazamiento máximo con soporte en cruz*



Fuente: Autores

*Figura 17 Esfuerzo máximo con soportes en cruz*

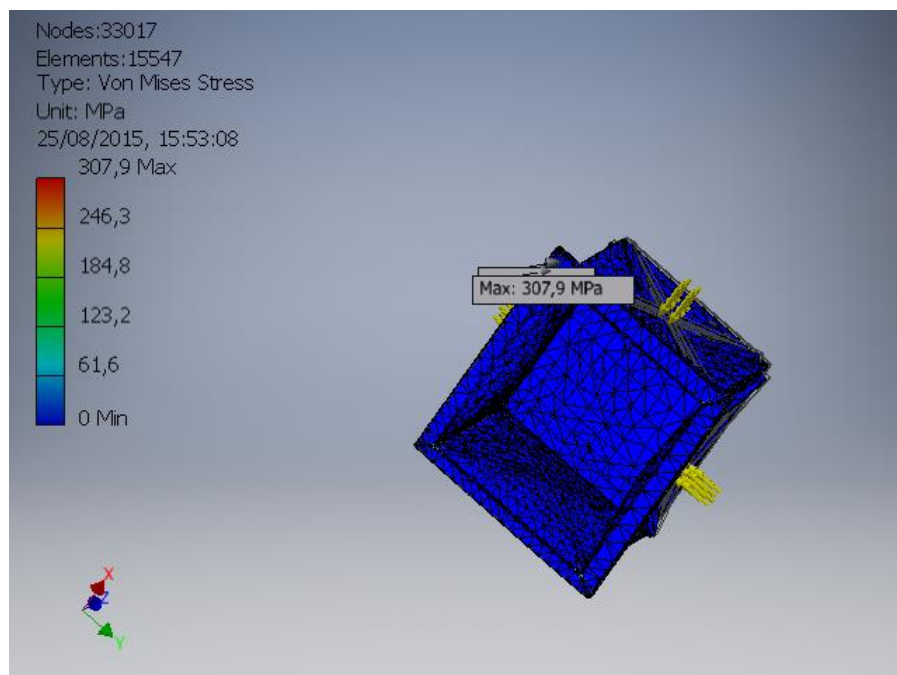


Fuente: Autores

Como se aprecia en las figuras 15, 16 y 17, el desplazamiento máximo con el soporte en cruz se reduce en comparación con la simulación anterior, y es de 0,4456 mm, el cual está por debajo de la deflexión máxima permitida. Y su esfuerzo máximo es de 261,69 MPa.

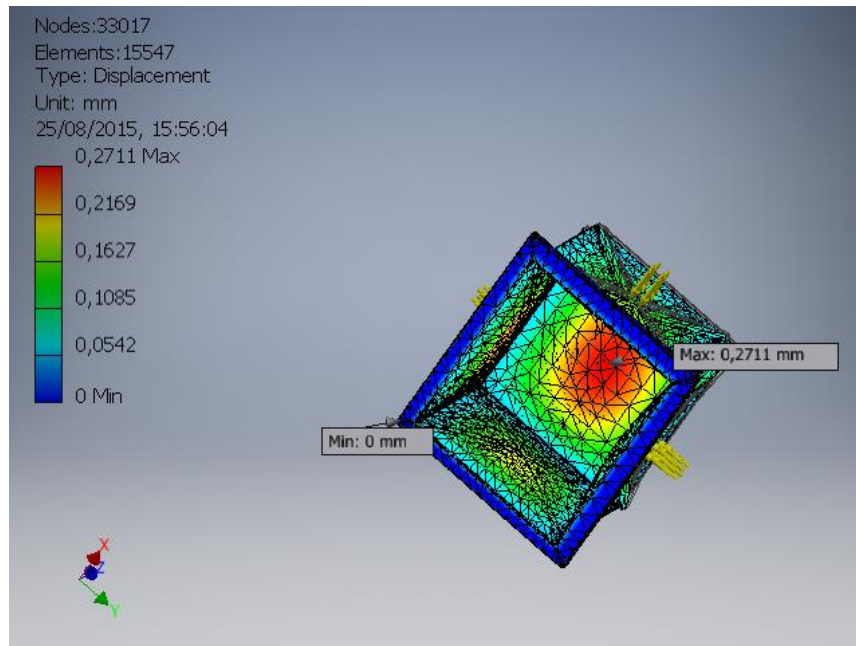
- **Simulación de la cámara de trabajo con soporte en X**

*Figura 18 Esfuerzo máximo con soporte en X*



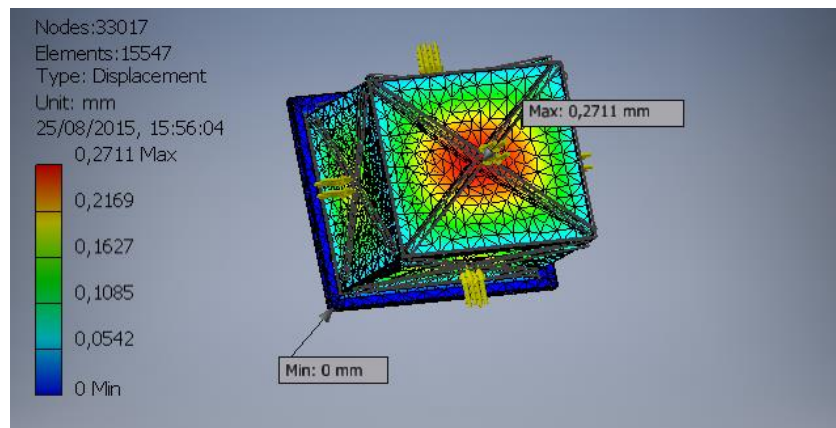
Fuente: Autores

Figura 19 Desplazamiento máximo con soporte en X



Fuente: Autores

Figura 20 Desplazamiento máximo con soporte en X



Fuente: Autores

Como se muestra en las figuras 18, 19 y 20, con los soportes en X disminuye el desplazamiento máximo con un valor de 0,2711 mm y un esfuerzo máximo de 307,9 MPa.

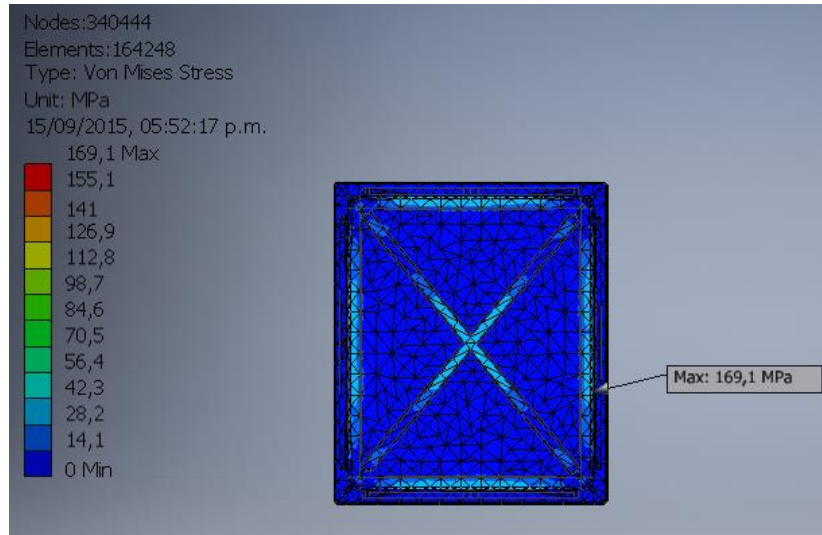
- **Selección de la configuración de los soportes.**

Con estas simulaciones se comprobó que las dos configuraciones funcionan, ya que disminuyen el desplazamiento y el esfuerzo máximo, se seleccionó la configuración de soporte en x porque es la que presenta una reducción mayor en el desplazamiento.

- **Simulación final**

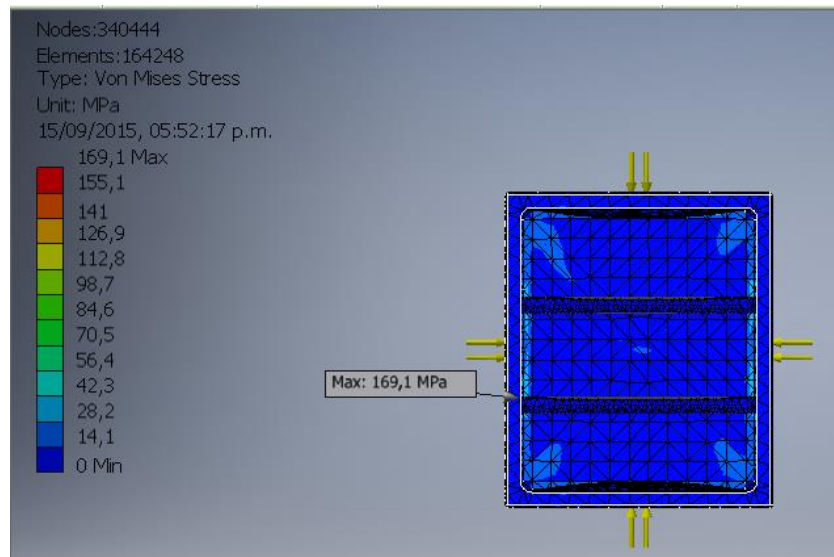
A continuación de ser seleccionado la configuración del refuerzo se realizó la simulación final de la cámara de trabajo con todos sus componentes como lo son las bandejas, donde se obtuvo los resultados finales de desplazamiento y esfuerzo máximo.

*Figura 21 Esfuerzo máximo Von Mises simulación final*



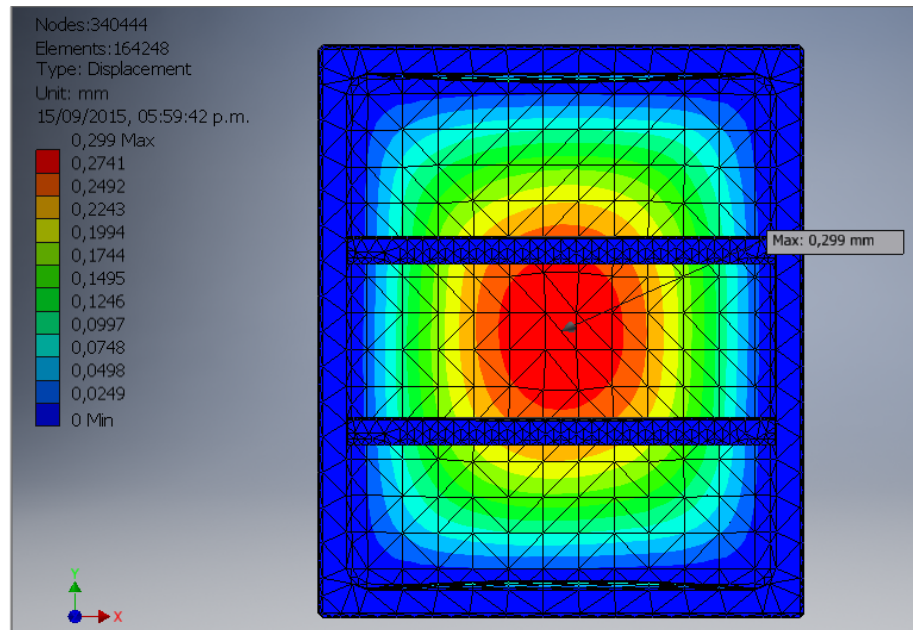
Fuente: Autores

*Figura 22 Esfuerzo máximo Von Mises simulación final*



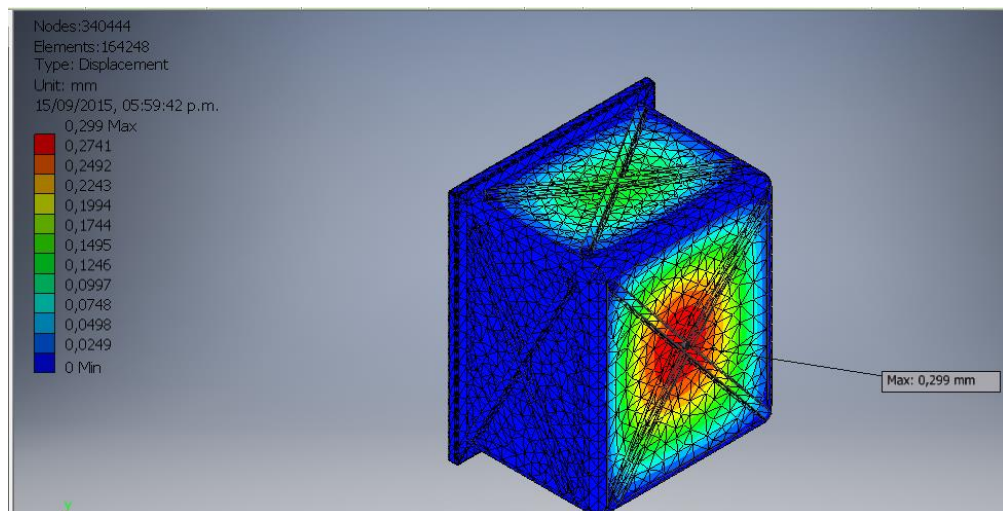
Fuente: Autores

Figura 23 Desplazamiento máximo simulación final



Fuente: Autores

Figura 24 Desplazamiento máximo simulación final



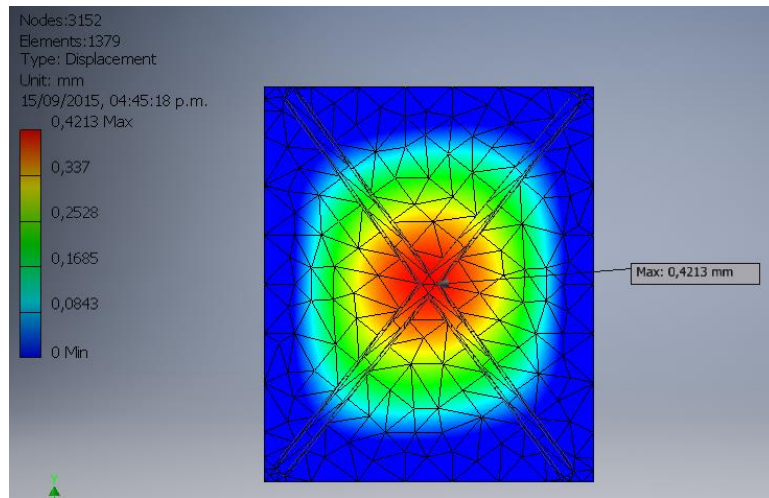
Fuente: Autores

Como se muestra en las figuras 21, 22, 23 y 24 con los soportes en X, las bandejas, el desplazamiento máximo es de 0,299 mm y un esfuerzo máximo de 169 MPa.

- **Simulación de la puerta**

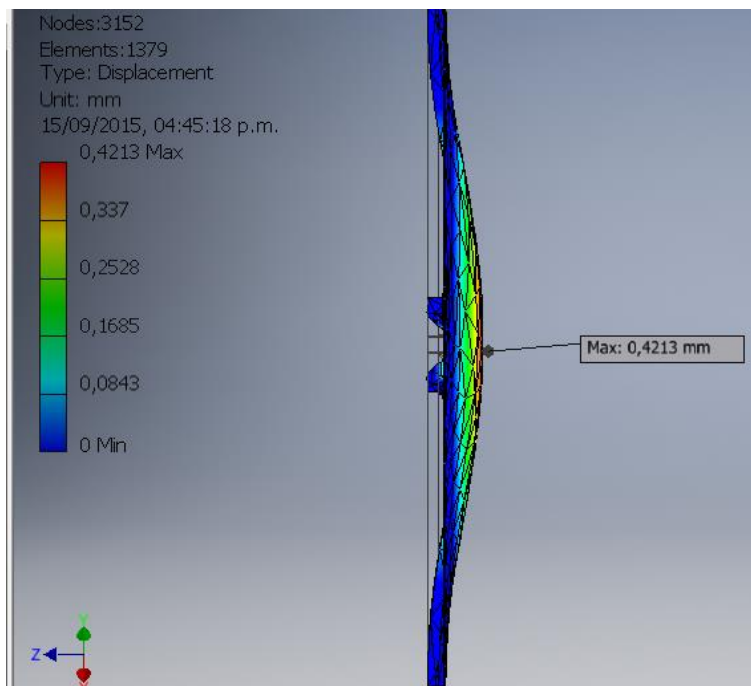
La simulación de la puerta se realiza de forma independiente de la cámara de trabajo, ya que al no estar unidos no generan algún tipo de esfuerzo sobre el otro. La puerta también presenta un refuerzo de varilla cuadrada de 10 mm X 10 mm, con una configuración en X.

*Figura 25 Desplazamiento máximo en la puerta*



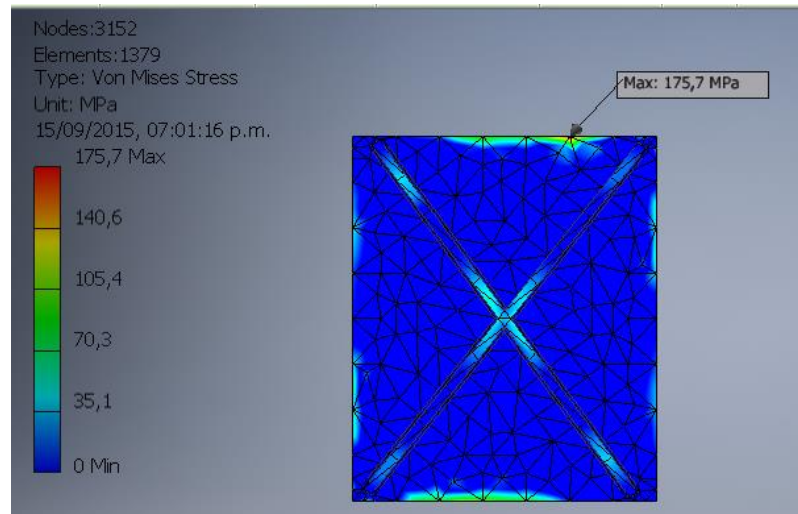
Fuente: Autores

*Figura 26 Desplazamiento máximo en la puerta*



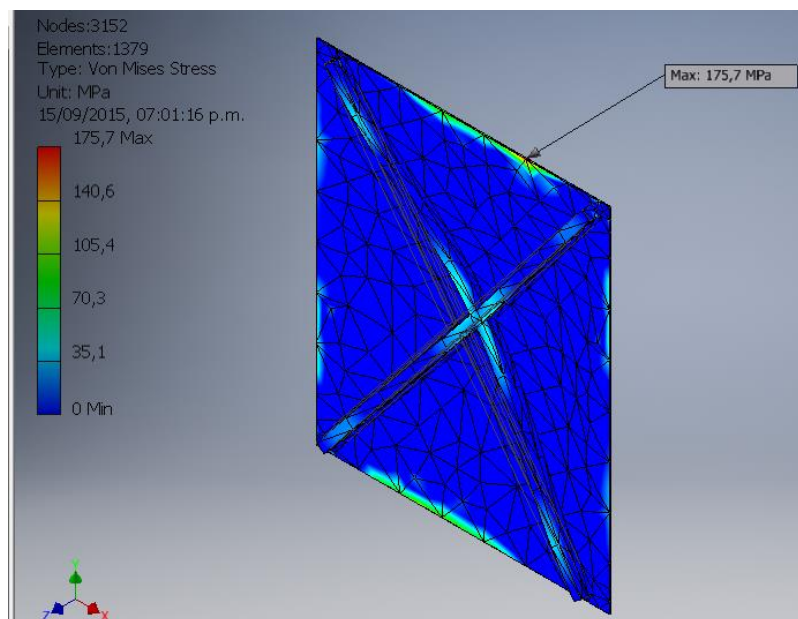
Fuente: Autores

*Figura 27 Esfuerzo máximo Von Mises en la puerta*



Fuente: Autores

*Figura 28 Esfuerzo máximo Von Mises en la puerta*

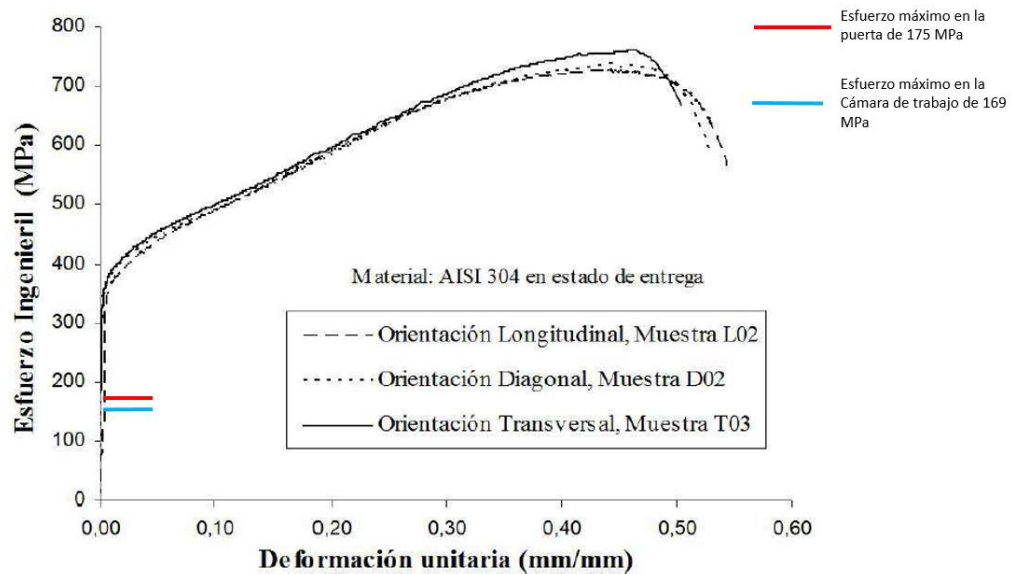


Fuente: Autores

Como se observó en las figuras 25, 26, 27 y 28 el desplazamiento máximo en la puerta es de 0,4213 mm y el esfuerzo máximo es de 175,7 MPa, son mayores que los de la cámara de trabajo, ya que el análisis está basado en una lámina plana.

Como la cámara de trabajo y la puerta son del mismo material, se realizó una comparación con la gráfica de esfuerzo deformación del acero AISI 304, para verificar que los valores de esfuerzo y desplazamiento obtenidos en la simulación de cada uno de ellos estén por debajo de los valores máximos permitidos según la gráfica 2.

Grafica 2 Esfuerzo – deformación del acero inoxidable 304



Fuente: [26]

Como se observó en la gráfica 2 el recipiente diseñado sometido a presión de vacío resiste los esfuerzos y se encuentran por debajo de los esfuerzos y la deformación máxima permitida para este tipo de acero.

### 3.3.2 DISEÑO TÉRMICO

El análisis térmico del liofilizador a escala de laboratorio arranca con el cálculo de la carga total de energía a extraer por parte del sistema de refrigeración. Este cálculo es de suma importancia ya que el diseño del prototipo final maneja características que difieren de las cámaras de refrigeración o neveras convencionales, las cuales también manejan un ciclo por compresión de vapor, pero la diferencia del prototipo de liofilización es que alcanza temperaturas hasta de  $-35^{\circ}\text{C}$  y presiones de vacío menores de  $0.610\text{ kPa}$ , por tal motivo se deben definir previamente los parámetros de entrada requeridos por el sistema, los cuales son:

Temperatura ambiente, temperatura mínima de la cámara de trabajo, temperatura de condensación.

- **DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS.**

- **TEMPERATURA DE AMBIENTE EXTERIOR**

Según el INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) la temperatura máxima en la ciudad de Bogotá varía de acuerdo a la época del año, la máxima temperatura se alcanza en el tercer mes del año y corresponde a  $25^{\circ}\text{C}$ , y es ésta la temperatura ambiente usada en el diseño de la cámara para efectos de seguridad [26].

$$\text{temperatura ambiente externa} = 25^{\circ}\text{C}$$

- **TEMPERATURA PARA EL DISEÑO DE LA CÁMARA**

Según el estudio del proceso de liofilización la temperatura a obtener dentro de la cámara de trabajo debe ser la requerida para llevar los productos a deshidratar por debajo de  $-35^{\circ}\text{C}$ , basados en los rangos de temperaturas de los liofilizadores comerciales plasmada en la tabla 3 es de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $-60^{\circ}\text{C}$ , se define:

$$\text{temperatura de diseño de la camara} = -40^{\circ}\text{C}$$

- **CÁLCULO DE CARGA DEL SISTEMA**

Las fuentes de calor que producen aumento de la temperatura interior del sistema se puede considerar que son las siguientes:

- Cargas por paredes.
- Cargas de los productos a liofilizar
- Cargas internas varias (motor del ventilador evaporador)

- **CARGAS POR PAREDES**

La carga representada por la cantidad de calor a través de las paredes se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad [W]$$

$$R = \frac{L}{K * A} \quad [K/W]$$

$R$  = resistencia de transferencia  $[K/W]$

$L$  = espesor de la pared  $[m]$

$K$  = conductividad térmica del material  $[W/m * K]$

$A$  = área  $[m^2]$

En este proyecto el aislante que se utilizó fue el poliuretano, como se explica en el numeral 2.3.5. Es un material ampliamente acogido en la industria de la refrigeración. La cámara de trabajo está construido con lámina de acero inoxidable 304 como se evidencia en el numeral 2.3.2.

Datos de cálculo

- Temperaturas

$$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$T_{cam} = -40^{\circ}\text{C} = 233 \text{ K}$$

$$\Delta T = T_{amb} - T_{cam} = 25^{\circ}\text{C} - (-40^{\circ}\text{C}) = 65^{\circ}\text{C} = 338 \text{ K}$$

- Conductividades Térmicas

Los datos se toman bajo condiciones de temperatura ambiente, la conductividad térmica del poliuretano se toma de la tabla 8.

Poliuretano:  $K_{poliu} = 0.023 [W/mK]$

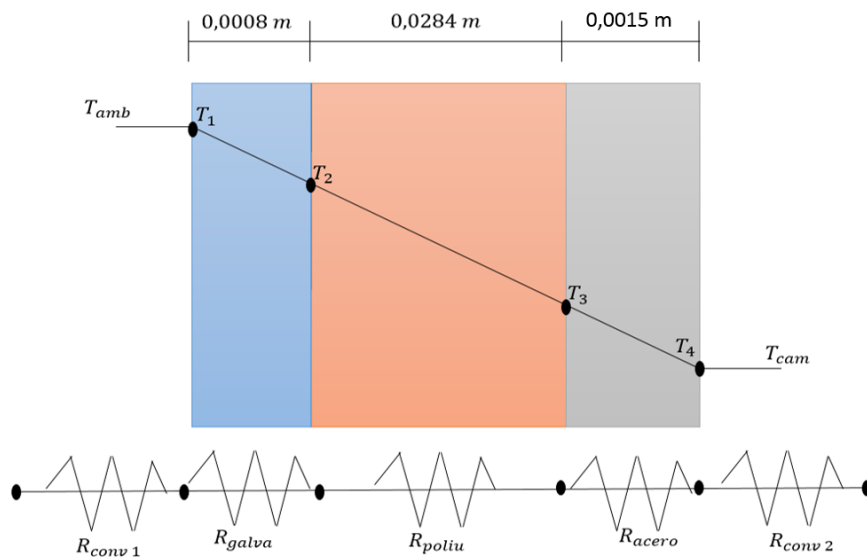
Acero inoxidable:  $K_{acero} = 16,3 [W/mK] [12]$

Acero Galvanizado:  $K_{galva} = 47 [W/mK] [12]$

- **RESISTENCIA POR CONVECCION 1**

Para los cálculos de transferencia de calor en las paredes de la máquina se debe entender que estas se comportan como unas resistencias eléctricas por lo cual se empieza hallando el valor de cada una de las resistencias térmicas que presenta cada uno de los materiales presentes en las paredes de la máquina donde se presenta tres materiales los cuales son: acero galvanizado, acero inoxidable y poliuretano como se ve en la figura 29.

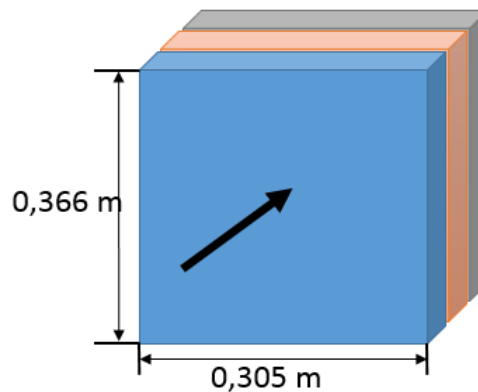
*Figura 29 Esquema de las resistencias térmicas de la cámara*



Fuente: autores

El área de transferencia de calor es la misma para los tres materiales, ya que depende de las dimensiones de la altura y el ancho más no del espesor de cada uno de ellos como se observa en la Figura 30.

Figura 30 Esquema del área de transferencia de calor de las paredes del equipo



Fuente: autores

Pero también se presenta la resistencia por convección natural y la resistencia por convección al interior de la cámara la cual es despreciable ya que no hay presencia de aire el cual es el medio de transferencia de la misma, para determinar el valor de la resistencia por convección del ambiente se utiliza la siguiente ecuación.

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A} \quad [^{\circ}C/W]$$

$h$ : es el coeficiente de conductividad termica por conveccion.  $[W/m^2K]$

Conociendo la temperatura ambiente la cual es de 25 °C se utiliza la tabla A-15 del libro de transferencia de calor de Cengel donde se encuentran los valores de la conductividad térmica del aire, la viscosidad del aire y el número de Prandtl. [12].

$$K = 0.02588 \frac{W}{m * K}$$

$$\mu = 1,608 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$Pr = 0.7282$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \text{ Por ser un gas ideal}$$

Con estos valores se utiliza la ecuación del número de Grashof la cual se describe de la siguiente forma [12].

$$Ra_l = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2} * Pr$$

$g$ : aceleracion Gravitacional,  $[m/s^2]$ .

$\beta$ : coeficiente de expansion volumetrica,  $[1/k (\beta = 1/T \text{ para los gases ideales})]$ .

$T_s$ : temperatura de la superficie, [°C].

$T_\infty$ : temperatura del fluido lejos de la superficie, [°C].

$L$ : Longitud de la configuración geométrica., [m].

$\gamma$ : Viscosidad cinemática del fluido,  $M^2/s$ .

$$R_{al} = \frac{(9.8 \text{ m/s}^2) * (3,27 \times 10^{-3} \text{ K}) * (298 \text{ K} - 233 \text{ K}) * (0,3 \text{ m})^3}{(1,608 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2} * (0,7282)$$

$$R_{al} = 158390,90 \times 10^3$$

Al haber determinado el número de Grashof, acorde a la tabla 9-1 del libro de transferencia de calor de Cengel donde el promedio del número de nusselt se halla de la forma [12].

$$N_U = \left( 0,825 + \frac{0,387 * R_{al}^{1/16}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{0,5625} \right)^{0,2962}} \right)^2$$

$$N_U = \left( 0,825 + \frac{0,387 * (158390,64 \times 10^3)^{0,166}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492}{0,7282} \right)^{0,5625} \right)^{0,2962}} \right)^2$$

$$N_U = 70,37$$

Al determinar el valor del número de Nusselt, se utiliza la ecuación para hallar el valor promedio de convección.

$$h = \frac{K}{L} * N_u$$

$$h = \frac{0,02588 \text{ W/m} * K}{0,3 \text{ m}} * 70,37$$

$$h = 6,070 \text{ W/m}^2 * K$$

Con este valor de convección natural, se reemplaza en la ecuación de resistencia por convección natural

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{conv1} = \frac{1}{0,775 \text{ W/m}^2 \text{ K} * 2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$R_{conv1} = 53,763 \times 10^3 \text{ K/W}$$

Para hallar la resistencia del acero inoxidable, poliuretano y acero galvanizado se utilizara la siguiente ecuación

$$R = \frac{L}{K * A} \quad [K/W]$$

$$R_{conv1} = \frac{1}{6.070 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.11\text{m}^2}$$

$$R_{conv1} = 1,83 \text{ K/W}$$

$$R_{1galva} = \frac{0.0015 \text{ m}}{47 \text{ W/m K} * 0,11 \text{ m}^2}$$

$$R_{1galva} = 2.901 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_{2potiu} = \frac{0,0284 \text{ m}}{0,023 \text{ W/m K} * 0,11\text{m}^2}$$

$$R_{2potiu} = 13.379 \text{ K/W}$$

$$R_{3acero} = \frac{0.0015 \text{ m}}{16.3 \text{ W/m K} * 0.11\text{m}^2}$$

$$R_{3acero} = 8.365 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

En transferencia de calor se analiza como si fueran resistencias eléctricas se puede hacer una sumatoria total de todas las resistencias térmicas del sistema para determinar la resistencia térmica total sobre la superficie en este caso es la pared del liofilizador.

$$R_{total} = 1,83 \frac{K}{W} + 2.901 \times 10^{-4} \frac{K}{W} + 13,379 \frac{K}{W} + 8.365 \times 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{total} = 15.210 \text{ K/W}$$

Ahora se halla la razón de transferencia de calor que existe en la pared del liofilizador utilizando la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

$$Q_{pared} = \frac{298 \text{ K} - 233 \text{ K}}{15.210 \text{ K/W}}$$

$$Q_{pared} = 4.273 \text{ W}$$

Para verificar que la transferencia de calor en la superficie es correcta se hallan las temperaturas de cada una de ellas y en la temperatura final debe ser igual a la temperatura definida para la cámara de trabajo

$$T_1 = T_{\infty 1} - Q * R_{1galva}$$

$$T_1 = 298 \text{ K} - (4.273 \text{ W} * 1.547 \times 10^{-4} \text{ K/W})$$

$$T_1 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_1 - Q * R_{2potiu}$$

$$T_2 = 24 \text{ }^\circ\text{C} - (4.273\text{W} * 13.719 \text{K/W})$$

$$T_2 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_3 = T_2 - Q * R_{3 \text{ aereo}}$$

$$T_3 = -30 \text{ }^\circ\text{C} - (4.273\text{W} * 4.461 \times 10^{-4} \text{K/W})$$

$$T_3 = -34 \text{ }^\circ\text{C}$$

Como este análisis se realizó para una sola pared el resultado de la razón de transferencia se debe multiplicar por seis para determinar el valor total de transferencia de calor sobre toda la cámara de trabajo.

$$Q_{total} = Q_{pared} * 6$$

$$Q_{total} = 4.273 \text{ W} * 6$$

$$Q_{total} = 25.638 \text{ W}$$

### • CARGAS DE LOS PRODUCTOS

En el cálculo de las cargas por producto hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Calor sensible cedido por encima del punto de congelación
- Calor latente de congelación
- Calor sensible cedido por debajo del punto de congelación, hasta su temperatura final.
- Calor de respiración o de evolución del producto.

Para el cálculo de estos calores son necesarios los siguientes datos:

- Masa del producto a liofilizar  $m = 500\text{gr} = 0.500 \text{ kg}$
- Calor específico por encima del punto de congelación  $C_{ph} = 3.851 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
- Factor de rapidez de enfriamiento  $F_r = 0.7$
- Calor latente promedio  $h_{fi} = 316.33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Calor específico por debajo del punto de congelación  $C_{pi} = 1.925 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
- Temperatura de congelación  $T_c = -1,66 \text{ }^\circ\text{C} = 271.3 \text{ K}$
- Temperatura ambiente  $T_{amb} = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
- Temperatura de la cámara  $T_{cam} = -35 \text{ }^\circ\text{C} = 238 \text{ K}$

Estos valores fueron tomados del libro de principios de refrigeración de Dossat.

### • CALCULO DEL CALOR SENSIBLE POR ENCIMA DEL PUNTO DE CONGELACIÓN

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{enf} = \frac{m * C_p * \Delta T}{F_r}$$

$$Q_{enf} = \frac{0.500 \text{ kg} * 3.851 \text{ KJ}/\text{KgK} * (298\text{K} - 271.3\text{K})}{0.7}$$

$$Q_{enf} = 73.44 \text{ kJ}$$

- **CALCULO DEL CALOR LATENTE POR CONGELACIÓN**

Para encontrar esta carga se aplica la siguiente ecuación.

$$Q_{sol} = m * h_{fi}$$

$$Q_{sol} = 0.500 \text{ kg} * 316.33 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$Q_{sol} = 158.165 \text{ kJ}$$

- **CALCULO DEL CALOR SENSIBLE POR DEBAJO DEL PUNTO DE CONGELACIÓN.**

Para encontrar esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{alm} = m * C_{pi} * \Delta T$$

$$Q_{alm} = 0.500 \text{ kg} * 1.925 \text{ KJ}/\text{kg} * (271.3 \text{ K} - 238\text{K})$$

$$Q_{alm} = 32.051 \text{ kJ}$$

- **CALCULO DE RESPIRACIÓN DEL PRODUCTO**

Es el calor eliminado por los productos durante su almacenamiento ya que estos son productos con vida y sufren un proceso mediante el cual el oxígeno del aire se combina con los carbohidratos en el tejido de la planta dando como resultado formación de dióxido de carbono y calor. Este calor debe ser considerado cuando la cantidad de producto es considerable y al ser almacenado por encima de su temperatura de congelación.

Para el cálculo de esta carga, es necesario definir el tiempo de duración del proceso de almacenamiento del producto en la cámara, para lo cual se toma 36 horas.

Por lo tanto para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{res} = m * C_{resp} * t$$

$$Q_{res} = 0.500 \text{ kg} * 4.304 \text{ kJ}/\text{kg h} * 36\text{h}$$

$$Q_{res} = 77.472 \text{ kJ}$$

- **CARGA TOTAL DEL PRODUCTO**

Al haber determinado las cargas que están presentes en el producto se realizó una sumatoria para determinar la carga total.

$$Q_{total} = Q_{enf} + Q_{sol} + Q_{alm} + Q_{res}$$

$$Q_{total} = 73.44 \text{ kJ} + 158.165 \text{ kJ} + 32.051 \text{ kJ} + 77.472 \text{ kJ}$$

$$Q_{total} = 341.128 \text{ kJ}$$

- **CARGAS VARIAS**

Para aumentar la tasa de transferencia de calor en el interior de la cámara, y la homogeneidad de temperatura en ella, se instaló un pequeño ventilador en la parte superior del evaporador, el cual tiene las siguientes características:

Velocidad = 2600 Rpm  
 Corriente = 0.62 A  
 Frecuencia = 60 Hz  
 Voltaje= 110 V

El calor cedido por el ventilador es igual a la potencia consumida por el ventilador en las 36 horas de trabajo del sistema de refrigeración, por lo tanto, la ecuación a utilizar en este caso es:

$$P_{ot} = V * I$$

$$P_{ot} = 110 V * 0.62 A$$

$$P_{ot} = 68,2 W$$

Multiplicando por las horas de trabajo del sistema de refrigeración:

$$Q_{vent} = 68.2 * 36 h$$

$$Q_{vent} = 2455.2 KJ$$

Conociendo cada una de las cargas presentes dentro de la cámara de trabajo se elaboró la tabla de la carga total a extraer por el sistema de refrigeración, para esto se suman los valores de las cargas debidas a paredes, productos y las cargas varias presentes. (Ver tabla 12)

*Tabla 12 Carga Total a extraer del equipo*

	Q [ kJ]	Q [kJ/h]
CARGA PAREDES	25.638	3,625
CARGA PRODUCTOS	341.128	158,637
CARGA VARIAS	2455.2	68,2
SUMA DE CARGAS	2821.966	87,43
factor de seguridad	10%	10%
CARGA TOTAL A EXTRAER POR EL EQUIPO	3104.162	96,173

Fuente: Autores

Si no se dispone de la información suficiente, se puede calcular como un 5% o 10% de la carga por transmisión de los parámetros, respiración del producto, enfriamiento del producto. (Se toma un 5% si se conoce la maquinaria y un 10% si no se conoce). Ver tabla 12 [6].

### 3.3.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

- **TEMPERATURA DEL CONDENSADOR**

La temperatura de condensación depende del tipo del medio de condensación utilizado, aire o agua, la temperatura ambiente de diseño o la temperatura del agua y la capacidad del condensador seleccionado. Los condensadores enfriados por aire se seleccionan comúnmente para funcionar a diferencias de temperatura (DT) que oscilan entre los 10°F y los 30°F, utilizándose normalmente, la diferencia de temperatura más baja para las aplicaciones de baja temperatura y la diferencia de temperatura más elevada para las aplicaciones de alta temperatura en donde la relación de compresión es menos crítica [27] Para los fines del proyecto se utilizó una diferencia de temperatura del condensador de 10°F.

$$DT = T_{cond} - T_{amb}$$

DT=diferencias de temperatura del Condensador por aire.

$$T_{cond} = DT + T_{amb}$$

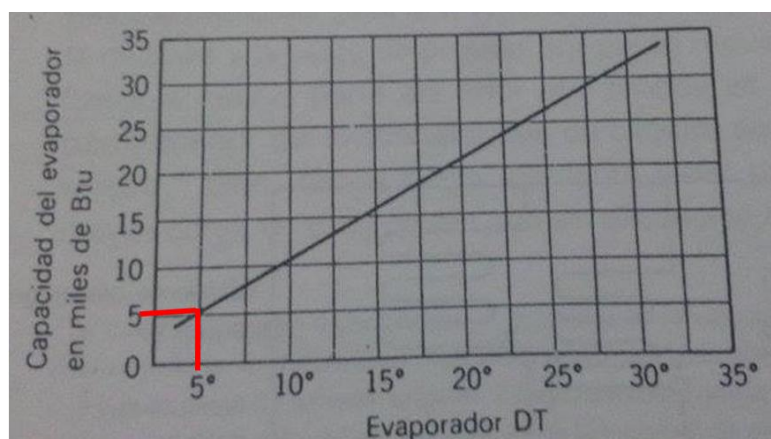
$$T_{cond} = 17F + 77F$$

$$T_{cond} = 94 F = 35^{\circ}C$$

- **SELECCIONES DEL SISTEMA DE EVAPORADOR**

Para conocer la temperatura de evaporación del refrigerante a utilizar es necesario saber la carga del sistema y la humedad relativa deseada para así calcular la capacidad del evaporador a diseñar y así por medio de una gráfica calcular la DT del evaporador que se define como la diferencia entre la temperatura del aire que llega al evaporador tomada generalmente como la temperatura de diseño de la cámara y la temperatura de saturación del refrigerante correspondiente a la presión de salida del evaporador. (Ver grafica 3)

*Grafica 3 Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador*



Fuente: [10]

$$DT = 5^{\circ}F$$

Con este resultado se halla la temperatura del refrigerante

$$DT = T_{camara} - T_{evap}$$
$$5\text{ }^{\circ}F = -40\text{ }^{\circ}F - T_{evap}$$

Despejando la ecuación se halla la temperatura de evaporación

$$T_{evap} = -40\text{ }^{\circ}F - 5\text{ }^{\circ}F$$
$$T_{evap} = -45\text{ }^{\circ}F = -43\text{ }^{\circ}C$$

Otros datos para cálculo:

Capacidad requerida = 3104.162 kJ

Tiempo total de trabajo del evaporador = 36h

Ancho de la cámara = 305 mm

Con estos datos se obtiene la capacidad requerida por hora de trabajo

$$Q_{sis} = \frac{3104.162\text{ KJ}}{36\text{ h}} = 86.226\text{ kJ/h}$$

### 3.3.4 SELECCIÓN UNIDAD CONDENSADORA

#### • CÁLCULOS DEL COMPRESOR

Para el cálculo de la unidad condensadora fue necesario definir el refrigerante a utilizar para la aplicación, donde se seleccionó por el R404A, ya que es un refrigerante ecológico y económico que cumple con las condiciones termodinámicas para lograr los estados requeridos en el proceso. Como primer paso se debe tener en cuenta las temperaturas de evaporación y condensación del refrigerante, ya que de acuerdo con el ciclo ideal de refrigeración, estas temperaturas son claves para determinar los estados en los diferentes puntos del sistema. Para hallar la potencia mínima necesaria para comprimir el vapor de refrigerante llamada potencia teórica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = W * m \left[ \frac{kJ}{min} \right]$$

W= trabajo de compresión

m= Flujo másico del refrigerante.

Donde el trabajo y el flujo másico se pueden encontrar de las siguientes ecuaciones.

$$W = h_d - h_c \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad [28]$$

$h_d$ : entalpia de vapor sobrecalentado a la salida del compresor, se halla siguiendo la línea isotrópica del refrigerante en la gráfica presión-entalpia, desde el estado de salida del evaporador hasta interceptar con la línea de presión absoluta de líquido saturado de condensación.

$h_c$ : entalpia vapor saturado a la temperatura de evaporacion del refrigerante

$$m = \frac{Q_{sis}}{ER} \quad [26]$$

$$Q_{sis} = \text{carga del sistema}$$

$$ER = \text{efecto refrigerante del sistema}$$

$$ER = h_c - h_b \left[ \frac{kJ}{kg} \right] [26]$$

$h_b$ : entalpia liquido saturado a la salida del tubo capilar la cual es igual a la entalpia a la salida del condensador ya que es un proceso isoentalpico.

$$T_{evap} = -50^\circ C$$

$$P_{eva} = 85.1 \text{ kPa}$$

$$T_{cond} = 35^\circ C$$

$$P_{cond} = 1617 \text{ kPa}$$

$$Q_{sis} = 96.208 \quad [kJ/min]$$

Con estos datos iniciales se entra en la tabla de propiedades termodinámicas del refrigerante R-404A (ver Anexo N°1) se encuentra lo siguiente:

Condición en estado C “entrada al compresor”

$$T_c = T_{eva} = -50^\circ C$$

$$h_c = 339.61 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_c = 85.1 \text{ kPa}$$

$$S_c = 1.6569 \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$$

Condiciones en el estado D “Salida del compresor” se halla con la gráfica p vs h del refrigerante

$$T_d = T_{cond} = 35^\circ C$$

$$h_d = 390 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_d = 1617 \text{ kPa}$$

$$S_c = S_d = 1.6569 \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$$

Condiciones en el estado A “entrada al tubo capilar”

$$P_{cond} = P_a = 85.1 \text{ kPa}$$

$$T_d = 35^\circ C$$

$$h_a = 255.51 \text{ [kJ/kg]}$$

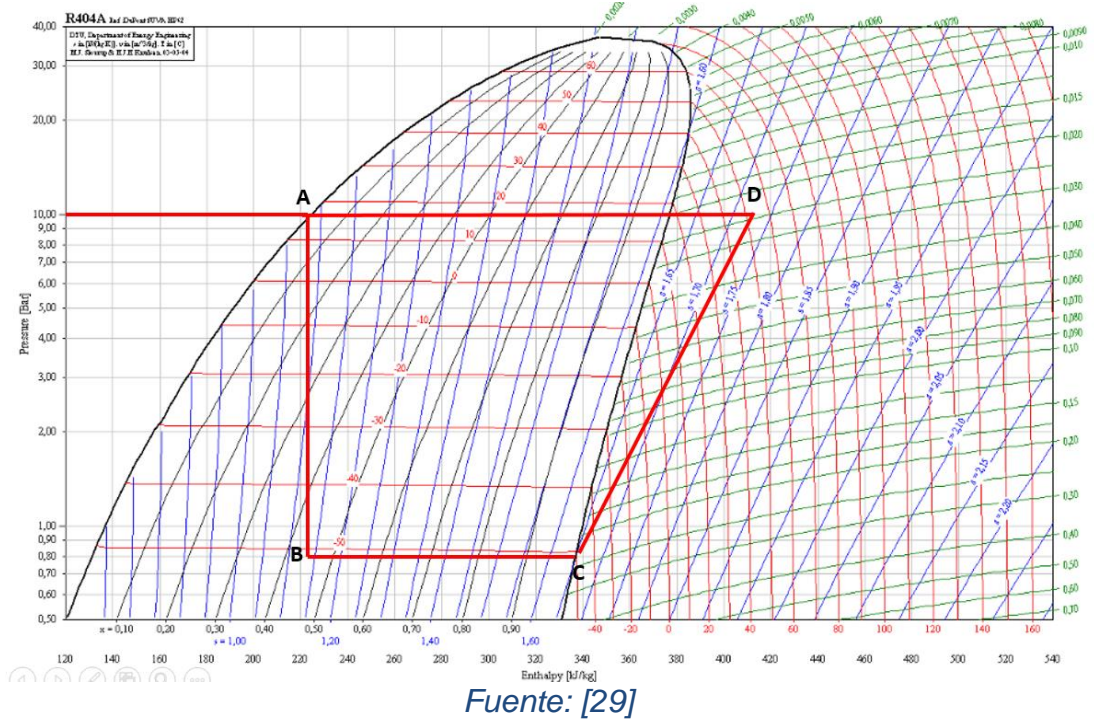
Estado B

$$P_{eva} = P_c = 85.1 \text{ kPa}$$

$$h_b = h_a = 255.51 \text{ [kJ/kg]}$$

Estos estados se evidencian en la (grafica 4.)

Grafica 4 Diagrama de presión. Entalpia para (R-404 A) en unidades de SI



Fuente: [29]

Con las ecuaciones antes explicadas se encuentra:

$$ER = h_c - h_b = 339.61 - 255.51$$

$$ER = 84.1 \text{ [kJ/kg]}$$

Con esto se despeja el flujo másico

$$\dot{m} = \frac{Q_{sis}}{ER} = \frac{86.226 \text{ kJ/h}}{84.1 \text{ kJ/Kg}}$$

$$\dot{m} = 1.025 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El trabajo del compresor es:

$$w = h_d - h_c = 390 \text{ kJ/Kg} - 339.61 \text{ kJ/Kg}$$

$$w = 50.39 \text{ kJ/Kg}$$

La potencia mínima es:

$$Pot = w * m$$

$$Pot_{min} = \frac{50.39 \text{ kJ}}{\text{kg}} * 1.025 \text{ kg/h}$$

$$Pot_{min} = 51.64 \text{ kW}$$

Para hallar la potencia en hp

$$P_{min} = \left[ 54.64 \text{ [kJ/h]} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right] * \left[ \frac{1 \text{ hp}}{44.755 \text{ [kJ/min]}} \right]$$

$$P_{min} = 0.02 \text{ hp}$$

Esta potencia, representa la potencia necesaria para comprimir al vapor en un sistema de 100% de eficiencia. En donde no se toma en cuenta la potencia necesaria para vencer la fricción en la compresión y otras pérdidas de potencia. La potencia real es por lo general 30 a 50% mayor que la potencia teórica calculada dependiendo de la eficiencia del compresor. [10]

Por lo tanto teniendo en cuenta todos estos factores, se suma un 50% de potencia por seguridad, lo cual nos da una potencia de:

$$P = 0.02 + (0.02 * 0.5)$$

$$P = 0.03 \text{ hp}$$

Por lo tanto se seleccionó un compresor de 1/5 hp, ya que cumple con la necesidad de extraer la humedad del producto en un 90%, además de esto permite la realización de pruebas con productos que tengan que extraer mayor porcentaje de humedad.

#### • SELECCIÓN DE LA UNIDAD CONDENSADORA

Para el diseño del liofilizador piloto se hace necesaria la selección de una unidad condensadora en la cual vienen integrados compresor y condensador, teniendo en cuenta las capacidades calculadas tanto para compresor como para condensador, se seleccionó una unidad TECUMSEH CAJ2432Z la cual cumple con todas las especificaciones de diseño y capacidades tanto para compresor como para condensador. Ver anexo 5 y 6.

#### • SELECCIÓN DEL TUBO CAPILAR

Dado que no existen fórmulas matemáticas que nos indiquen la dimensión exacta del capilar en determinada aplicación, se utilizó para este proyecto unos métodos que fue encontrado para la selección de tubos capilares.

El cual consiste en la utilización del software CAP TUBE, proporcionado por la misma empresa fabricante del compresor, Tecumseh de Brasil, en la cual se introducen los parámetros de trabajo del sistema, tales como: refrigerante, diámetro interno del tubo capilar (1mm), carga térmica del sistema, temperatura de evaporación, temperatura de condensación; temperatura de succión y grado de sub-enfriamiento (dados por el fabricante del compresor). Donde finalmente la longitud del tubo capilar es de: 0.7994 m .Ver en anexo 3.

### 3.3.5 COSTO ENERGÉTICO DEL EQUIPO

Hallando la potencia mínima que consume el compresor podemos calcular el costo de operación del equipo, para poder estimar un costo de operación.

$$Pot\ minima\ compresor = 398,22\ w$$

$$398,22\ w * 36\ \frac{h}{dia} = 14335.92\ \frac{Wh}{dia}$$

$$\frac{14335.92\ \frac{Wh}{dia}}{1000} = 14.33592\ \frac{kWh}{dia}$$

$$Costo(\$)de\ kWh\ en\ Colombia = 379,5659$$

$$\begin{aligned} Costo\ (\$)\ del\ consumo\ energetico\ del\ compresor \\ = 14.33592\ \frac{kWh}{dia} * 379,5659\ kWh \end{aligned}$$

$$Costo\ (\$)consumo\ energetico\ del\ compresor = \$ 5441.42\ pesos/dia$$

$$Pot\ minima\ bomba\ de\ vacio = 372,84\ w$$

$$372,84\ w * 36\ \frac{h}{dia} = 13422.24\ \frac{Wh}{dia}$$

$$\frac{13422.24\ \frac{Wh}{dia}}{1000} = 13.422\ \frac{kWh}{dia}$$

$$Costo(\$)de\ Kwh\ en\ Colombia = 379,5659$$

$$\begin{aligned} Costo\ (\$)\ del\ consumo\ energetico\ de\ la\ bomba\ de\ vacio \\ = 13.422\ \frac{kWh}{dia} * 379,5659\ Kwh \end{aligned}$$

$$Costo\ (\$)consumo\ energetico\ del\ compresor = \$ 5094.62\ pesos/dia$$

$$Costo\ total\ del\ consumo\ energetico = 5441.42 + 5094.62$$

*( $\$$ )Costo total consumo energetico = 10536.04 pesos/dia*

Según los cálculos realizados anteriormente de consumo energético se obtuvo un costo de \$ 10536.04 pesos/día, este valor es utilizado como base para estimar el precio al cual se puede prestar el servicio de liofilización en el equipo diseñado.

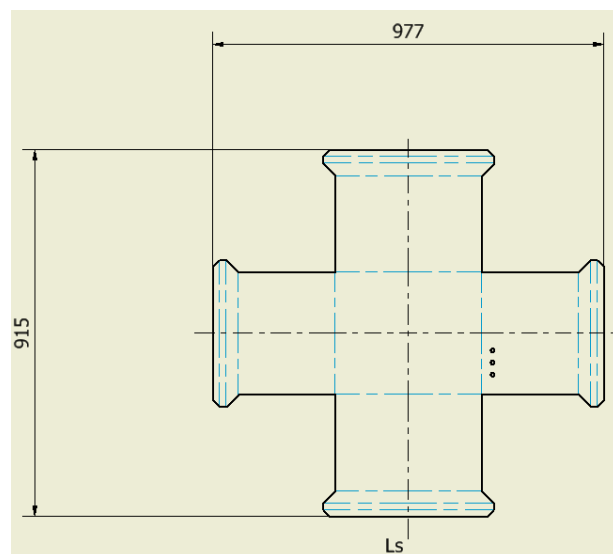
### 3.3.6 proceso de manufactura del equipo diseñado

Teniendo en cuenta los materiales seleccionados para la construcción junto a los parámetros de diseño mecánico y térmico del equipo, se realizó un proceso de manufactura de cada uno de los componentes.

- **Cámara de trabajo**

Se realizó el plano de construcción de la cámara de trabajo, como se observa en la figura 31, el cual indica el tamaño de la lámina que se debe comprar para realizar el proceso de construcción y reducir los desperdicios de material y exceso de costos, el tamaño de la lámina comprada fue de 1m por 1m de acero inoxidable 304 calibre 16.

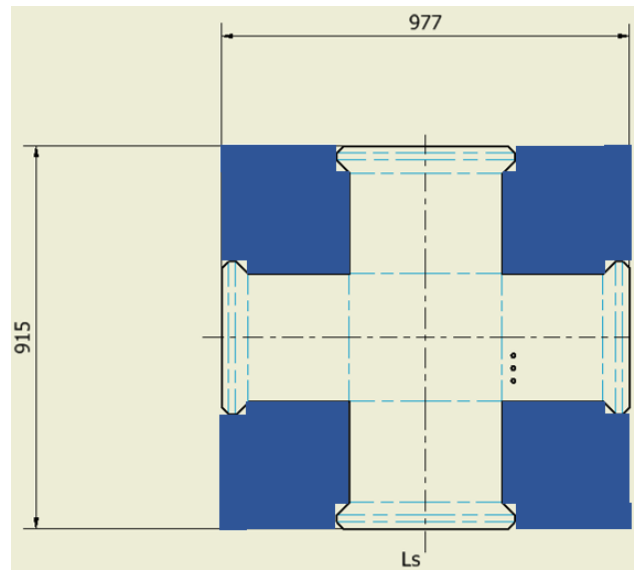
*Figura 31 Plano de construcción cámara de trabajo*



Fuente: Autores

Continuo a esto se realizó un proceso de corte con guillotina donde se obtuvo la forma indicada para realizar su dobles y se realizan los tres agujeros taladrados mostrados en el plano.

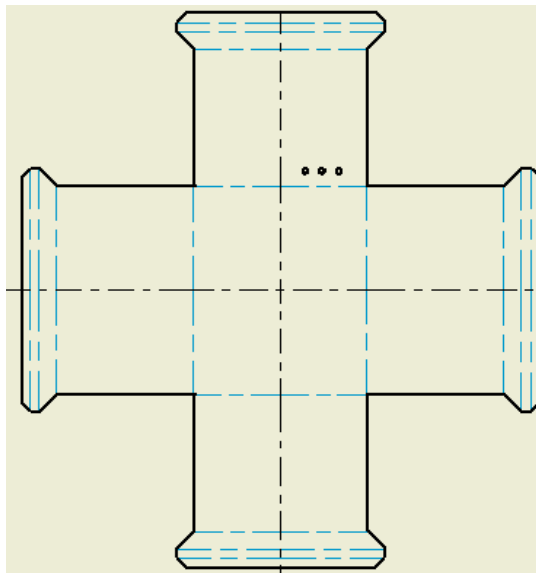
Figura 32 Especificación de las áreas cortadas para la cámara de trabajo



Fuente: Autores

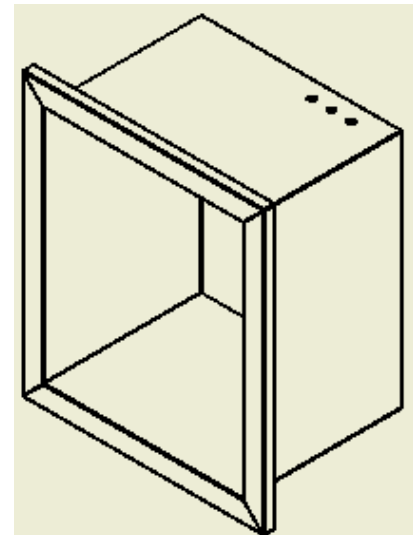
Posteriormente se efectúa el proceso de doblado indicado en el plano, las líneas no continuas azules son las guías para cada dobles, como se muestra en la figuras 33 y 34

Figura 33 Planos de doblado para la cámara de trabajo



Fuente: Autores

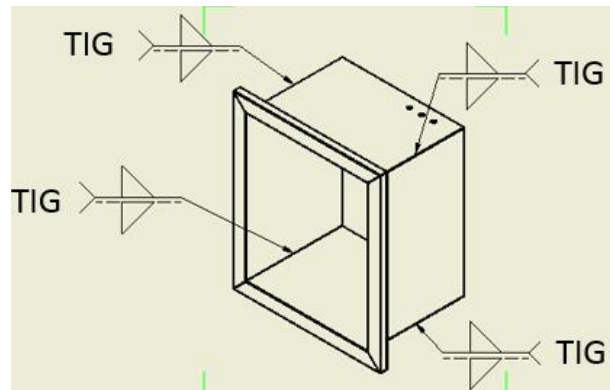
Figura 34 Resultado del doblado de la lámina de la cámara de trabajo



Fuente: Autores

Para finalizar la construcción se realizó el proceso de soldadura mediante la técnica TIG con electrodo 308L a tope y en filete, en la parte interna y externa de la cámara, realizando un proceso de pulido para evitar los concentradores de esfuerzo. Ver figura 35.

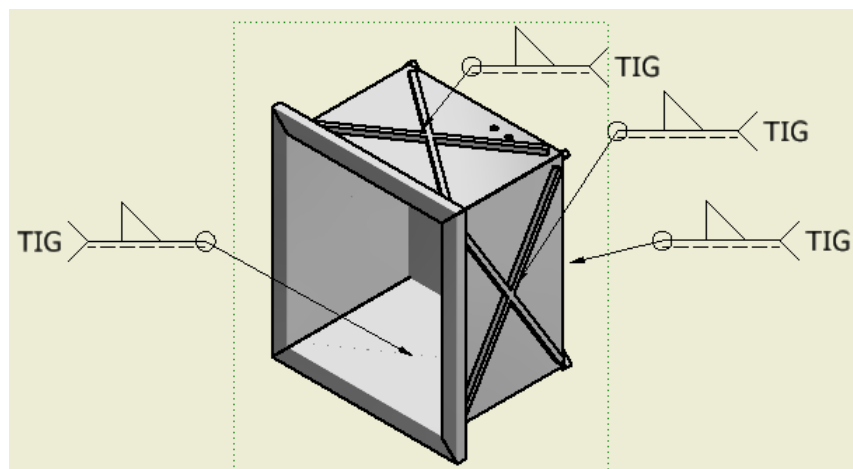
*Figura 35 Proceso de soldado para la cámara de trabajo*



Fuente: Autores

Adicional se sueldan los refuerzos en X de 10mm de ancho por 10 mm de espesor de varilla cuadrada en acero inoxidable 304, en las caras exteriores de la cámara de trabajo, bajo la técnica de soldadura TIG con electrodo 308 L en filete, se realizó por todo el contorno de cada refuerzo, como se evidencia en la figura 38.

*Figura 36 Soportes en cruz soldados a la cámara de trabajo*

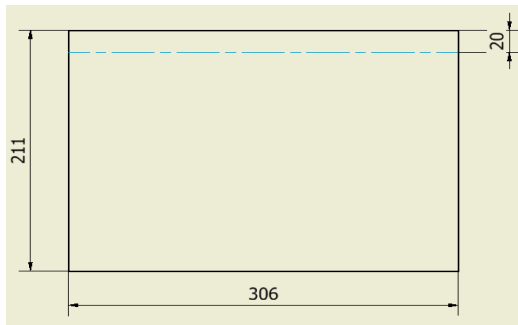


Fuente: Autores

- **Sistema de placas**

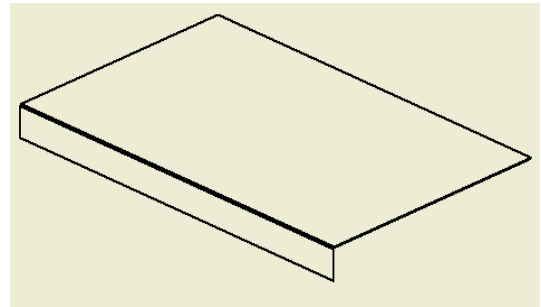
De las cuatro (4) áreas sobrantes de la lámina cortada para construir la cámara de trabajo (ver figura 24), dos (2) se utilizaron para la fabricación del sistema de placas, donde se realizó el proceso de corte y de doblado. Ver figuras 37 y 38

*Figura 37 Plano de construcción del sistema de placas*



Fuente: Autores

*Figura 38 Placa cortada y doblada del sistema de placas*

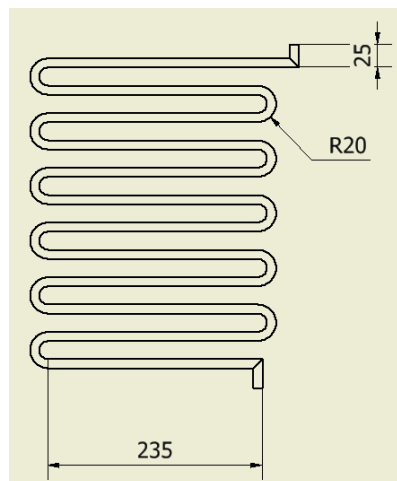


Fuente: Autores

- **Sistema de refrigeración**

Se compraron 12 metros de tubería de cobre de diámetro 10 mm shedule 40, el cual va conectado al compresor y tubo capilar, conformando el evaporador pasando por la paredes de la cámara de trabajo y el sistema de placa, se realizó atreves de un proceso de doblado con un radio de dos centímetros para generar un serpentín generando 12 líneas de enfriamiento como se evidencia en la figura 39.

*Figura 39 Plano del serpentín de refrigeración*

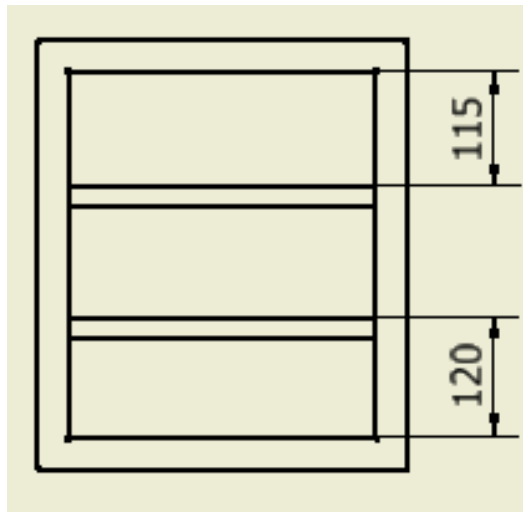


Fuente: Autores

- **Ensamble cámara de trabajo**

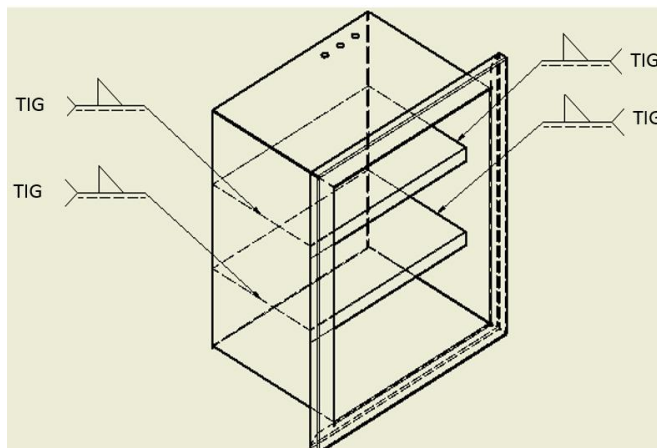
Se instaló el sistema de placas dentro de la cámara de trabajo, bajo la técnica de soldadura TIG con electrodo 308 L a tope en la parte interior. Ver figura 40 y 41.

*Figura 40 Plano de ensamble del sistema de placas en la cámara de trabajo*



Fuente: Autores

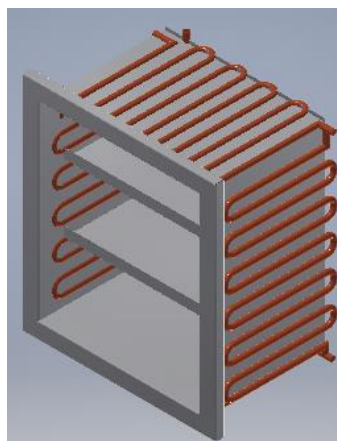
*Figura 41 Proceso de soldadura del sistema de placas dentro de la cámara de trabajo*



Fuente: Autores

En la figura 42 se muestra la instalación de un serpentín que rodea tanto la cámara de trabajo como también la parte inferior del sistema de bandejas, el cual forma parte del sistema de refrigeración y conforma el evaporador.

Figura 42 Instalación del serpentín que conforma el evaporador



Fuente: Autores

- **Estructura del equipo**

Para la carcasa del equipo se realizó la compra de la lámina de acero galvanizado A36 de calibre 22 como se relaciona en la tabla 13.

Tabla 13 Especificaciones de las láminas que conforman toda la estructura del equipo

Ítem	Pieza
1	Para la carcasa del equipo de se compró una lámina de 1,95m X 0,38m.
2	Para la tapa trasera de la carcasa del equipo se compró una lámina de 0,38m X 0,75m.
3	Para la carcasa del cajón de sensores se compró una lámina de 0,2 m X 0,72m.
4	Para la tapa trasera del cajón de sensores se compró una lámina de 0,17m X 0,38m.
5	Para la tapa delantera del cajón de sensores se compró una lámina de 0,19m X 0,43m.
6	Para la placa de la puerta se compró una lámina de 0,56m X 0,51m.
7	Para el soporte de la cámara de trabajo se compró una lámina de 0,79m X 0,43m.
8	Para la tapa de ventilación se compró una lámina de 0,38m X 0,33m.

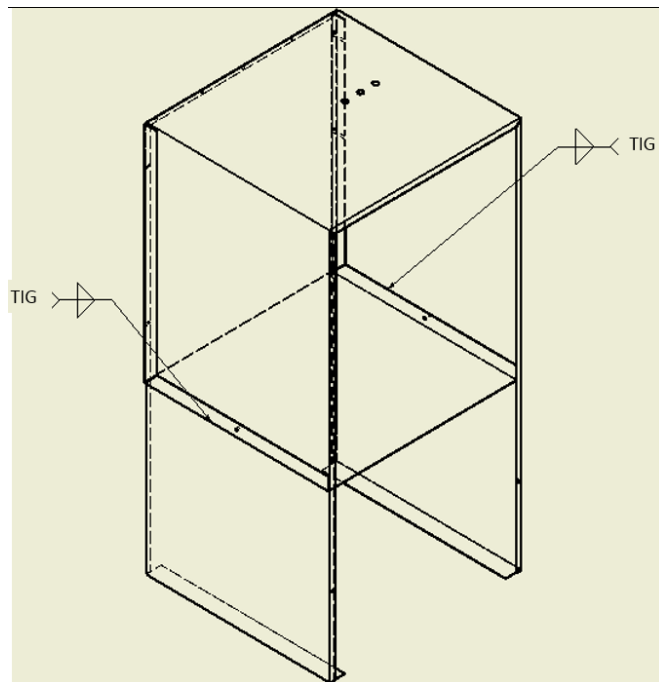
Fuente: Autores

- Para los ítem 1, 3, 5 y 6 se realizó un proceso de corte, doblado y taladrado según las especificaciones de los planos de construcción, adjuntos en el anexo 2.
- Para los ítem 2 y 4 se realizó un proceso de corte y taladrado, bajo las especificaciones dadas en los planos de construcción de cada uno de estos, encontrados en el anexo 2.
- Al ítem 8, se le realizó un taladrado y adicional un proceso de repujado para crear las rejillas de ventilación, especificando sus medidas en los planos de construcción, del anexo 2.
- Para el ítem 7 se realiza un proceso de corte y doblado, bajo las especificaciones de los planos de construcción. Ver anexo 2

- **PROCESO DE ENSAMBLE DEL EQUIPO DISEÑADO**

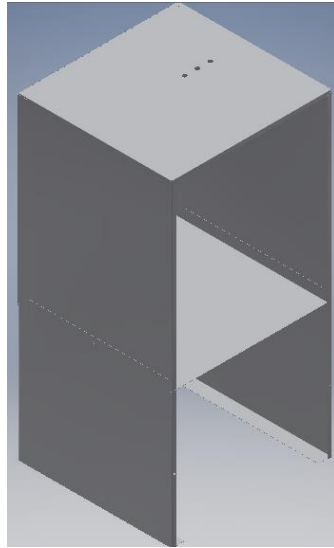
Este proceso debe estar bajo las especificaciones de los planos de ensamble, encontrados en el anexo 2, para su facilidad se llevó un orden de ensamble comenzando por la carcasa del equipo y el soporte de la cámara de trabajo, los cuales se unieron por un proceso de soldadura en filete por todo el contorno, como se observa en las figuras 43 y 44.

*Figura 43 Plano de ensamble de la carcasa y la placa de soporte de la cámara*



Fuente: autores

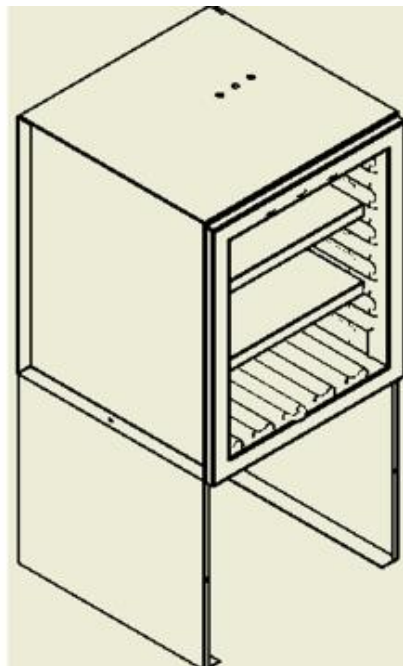
*Figura 44 Ensamble de la carcasa y la lámina de soporte*



Fuente: autores

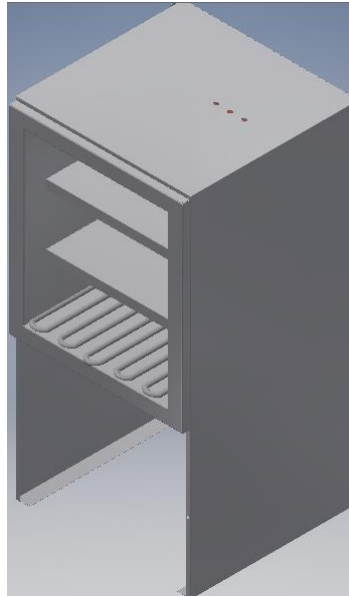
Seguido a esto se introdujo la cámara de trabajo con el serpentín ensamblada anteriormente, la cual es soldada en filete por todo el contorno contra el soporte interno que se instaló en la carcasa del equipo. Y se aplica el poliuretano expandido el cual sirve como aislante térmico. Como se aprecia en las siguientes figuras 45 y 46.

*Figura 45 Plano de ensamble de la cámara de trabajo y la carcasa*



Fuente: Autores

*Figura 46 Ensamble cámara de trabajo con la carcasa*



Fuente: Autores

Seguido a esto se aplicó el poliuretano expandido, el cual es una mezcla de catalizador y resina de poliéster en porcentajes de 50% cada uno de ellos (ver figura 47 y 48), alrededor de toda la cámara de trabajo y la carcasa, asegurando que no va quedar ningún espacio libre por el cual se presente una gran transferencia de calor.

*Figura 47 Resina poliéster y catalizador*



Fuente: Autores

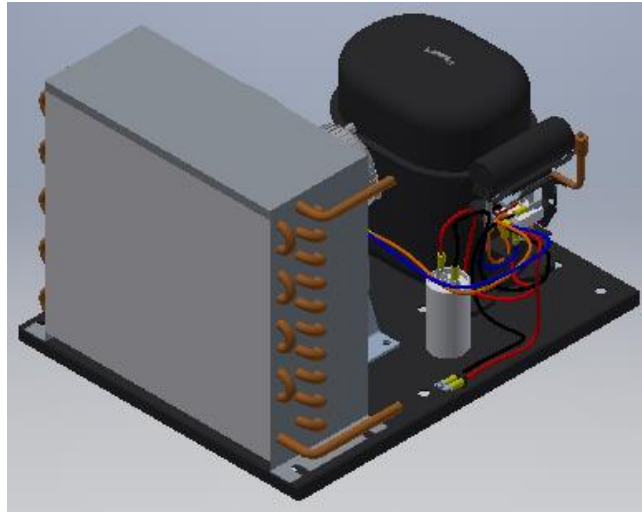
*Figura 48 Poliuretano expandido*



Fuente: Autores

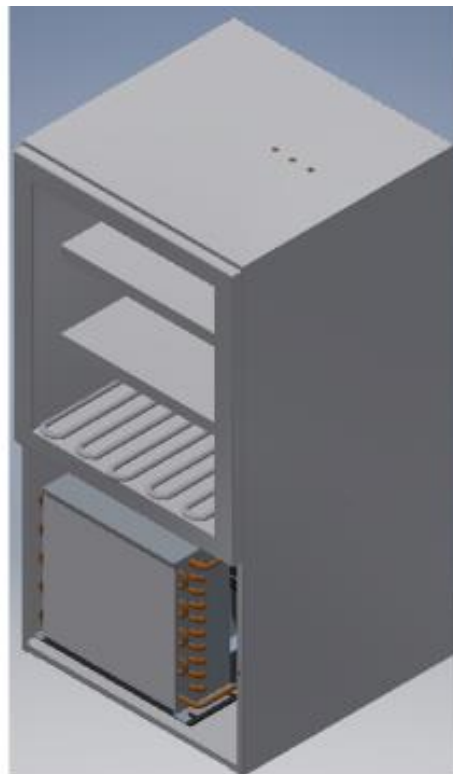
Se instala el sistema de refrigeración, compuesto por el compresor, ventilador y el disipador de calor en la parte inferior de la carcasa justamente debajo de la cámara de trabajo para aprovechar el espacio disponible. Ver figuras 49 y 50

*Figura 49 Unidad de sistema de refrigeración*



Fuente: Autores

*Figura 50 ensamble unidad refrigeradora en la carcasa*



Fuente Autores

Se muestra una evidencia fotográfica del equipo diseñado y construido para corroborar que se cumple con todo el diseño propuesto a lo largo del documento. Ver figuras 51, 52, 53 y 54.

*Figura 51 Carga del sistema de refrigeración*



Fuente: Autores

*Figura 52 Ensamble completo del equipo*



Fuente: autores

*Figura 53 Acabados superficiales del equipo*



Fuente: Autores

*Figura 54 construcción final del equipo de liofilización*



Fuente: Autores

#### 4. PUESTA EN MARCHA DEL LIOFILIZADOR Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos al realizar el proceso de liofilización para plantas aromáticas con el equipo diseñado en este proyecto. Se desarrollaron curvas de liofilización, en donde se determinó el tiempo necesario para lograr extraer la mayor cantidad de humedad posible. Este estudio se realizó a dos tipos de plantas aromáticas: yerbabuena y albahaca.

##### 4.1 CALCULO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LAS PLANTAS AROMÁTICAS

Para este proceso inicialmente se tomaron muestras de las plantas aromáticas en su estado natural (yerbabuena y albahaca) y se determinó el peso inicial en una balanza analítica. Posteriormente estas muestras se colocaron en un horno a una de temperatura de 60 °C; periódicamente se retiraron del horno, se dejó alcanzar la temperatura ambiente y se registró el peso hasta alcanzar peso constante. Se consideró que la variación en el peso se debe a la pérdida de humedad. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 14:

*Tabla 14. Contenido de humedad de plantas aromáticas*

Planta aromática	peso inicial (g)	peso final (g)	% de humedad
yerbabuena con tallo	4,2	0,62	85%
yerbabuena hoja	2,66	0,41	85%
albahaca	3,19	0,44	86%

Fuente: Autores

El tiempo empleado para el secado de las plantas aromáticas fue de 24 horas, el cual es bastante alto ya que se alcanza a perder parte de las propiedades organolépticas de las plantas (aroma, sabor y color).

##### 4.2 Curva de Liofilizado de la yerbabuena y albahaca

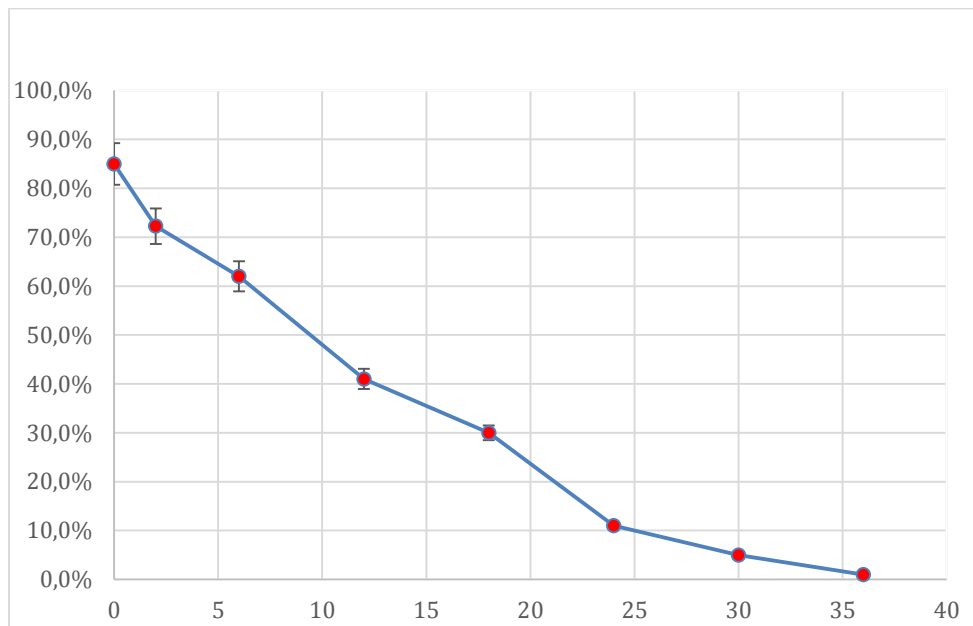
Para evaluar el funcionamiento del equipo de liofilización, se utilizó el equipo para deshidratar por debajo del punto triple del agua muestras de yerbabuena y albahaca. Se tomaron muestras de estas dos plantas y se colocaron en caja de Petri, se determinó el peso inicial de cada una de las cajas, se congelaron y se sometieron a liofilización. Cada 6 horas se sacaron algunas cajas y se pesaron para determinar el porcentaje de humedad que perdieron.

Durante el proceso de liofilización el equipo permaneció a una temperatura de -35°C y presión de vacío de 0.533 kPa. La congelación de las muestras se realizó durante 2 horas sin la aplicación de vacío. Una vez congeladas las muestras, se inició el proceso de liofilización mediante la aplicación de vacío. Una vez se ha concluido la liofilización (alrededor de la hora 30) se suspende el sistema de refrigeración y queda solo en funcionamiento la bomba de vacío durante 4 horas más hasta que la cámara de trabajo llegue a la temperatura ambiente y presión

atmosférica. Se retiran las muestras y se procede a la descongelación del equipo y el lavado del mismo (Ver anexo 7).

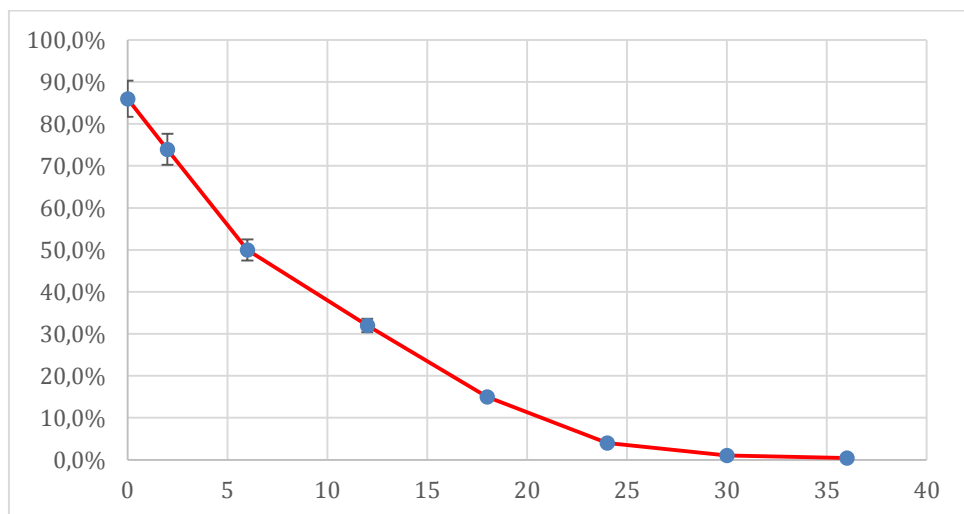
En las figuras 55 y 56 se presentan las curvas de pérdida de humedad a través del tiempo para el proceso de liofilización de la yerbabuena y la albahaca. La pérdida de humedad durante sus primeras 12 horas es mayor ya que se trata del agua libre dentro del producto; después de dicho tiempo la liofilización se vuelve más difícil ya que el agua a retirar es agua ligada a la estructura interna de las plantas, por lo cual es más demorada la sublimación.

*Figura 55 Curva de liofilizado de la yerbabuena*



FUENTE: Autores

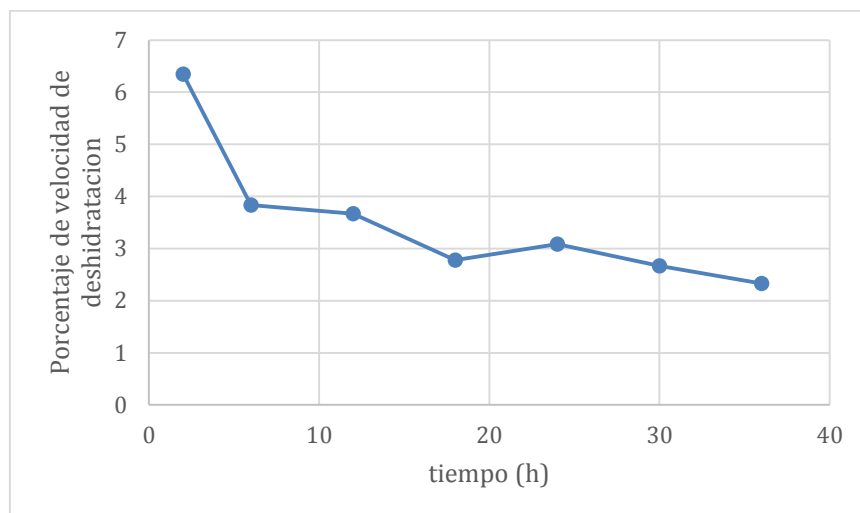
*Figura 56 Curva de liofilizado de la albahaca*



FUENTE: Autores

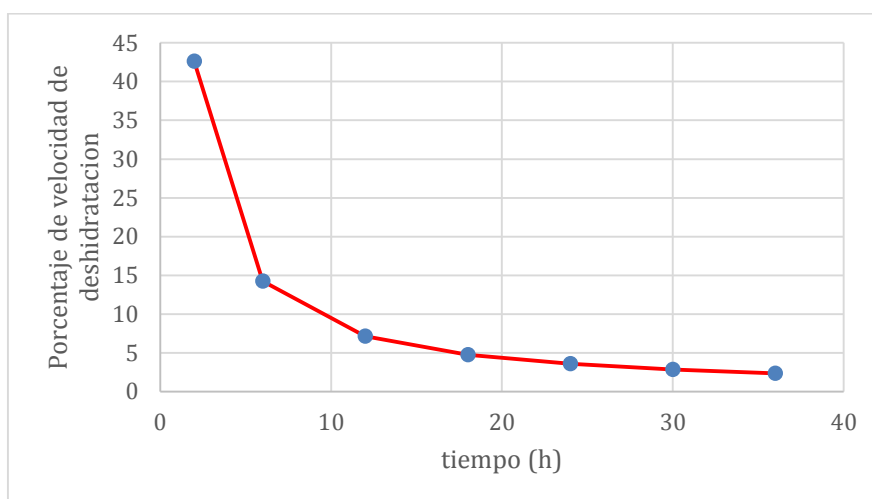
Con base en las curvas anteriores se calculó la pendiente que corresponde a la velocidad con la cual es deshidratada la muestra. De manera gráfica se presentan en las figuras 57 y 58 se puede apreciar que la velocidad de secado disminuye a través del tiempo del proceso de liofilizado. También se ratifica que durante las primeras 12 horas de liofilización se tiene una mayor velocidad de secado, y luego de dicho tiempo se alcanza el estado estacionario.

*Figura 57 Velocidades de secado durante el proceso de liofilización de la yerbabuena*



FUENTE: Autores

*Figura 58 Velocidades de secado durante el proceso de liofilización de la albahaca*



FUENTE: Autores

A partir del análisis de las gráficas anteriores se puede concluir que el tiempo necesario para realizar la liofilización de las plantas es de 36 horas, ya que se alcanzan niveles de humedad cercanos al 1%. Un tiempo adicional puede

conducir a una disminución de la humedad, pero el gasto de energía asociado con el funcionamiento del equipo podría no justificar su operación. Por el contrario, un tiempo menor a 36 horas podría llevar a un contenido de humedad superior al 5% lo cual puede no ser apropiado para el proceso ya que sería bastante alto.

El tiempo empleado para la liofilización es similar al empleado para el secado (alrededor de 24-36 horas), lo cual implica que en el desarrollo de un proceso industrial la implementación de la liofilización no ocasionaría cambios en los tiempos que se manejan para el proceso de deshidratación de las plantas, con la ventaja de emplear baja temperatura que favorece la conservación de las propiedades organolépticas.

#### 4.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PRUEBAS DE LABORATORIO

El objetivo principal de esta parte del estudio estadístico es obtener un modelo de regresión que permita predecir el número de horas necesarias para lograr el porcentaje de humedad deseada (0,01) en las plantas de Yerbabuena y Albahaca.

En primer lugar, se colocaron en cajas pettry, muestras de cada planta de tal forma que el peso de estas muestras fuera lo más similar posibles en todas las cajas. Para cada planta, se utilizaron seis cajas que fueron llevadas a la máquina de secado y fueron inspeccionadas con una frecuencia de seis horas entre cada inspección, que consistía en tomar una muestra al azar y medir la proporción de agua que se encontraba presente en ese momento. Este proceso se repitió seis veces. Los datos recolectados se muestran en las tablas 15 y 16

*Tabla 15 Tiempo de secado VS porcentaje de humedad de la yerbabuena*

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Porcentaje de humedad</b>
0	0.85
6	0.62
12	0.41
18	0.30
24	0.11
30	0.05
36	0.01

Fuente: Autores

Tabla 16 Tiempo de secado VS porcentaje de humedad de la albahaca

Tiempo (h)	Porcentaje de humedad
0	0.86
6	0.50
12	0.32
18	0.15
24	0.04
30	0.01
36	0.005

Fuente: Autores

Con base en estos datos se realizó una regresión polinomial entre la variable dependiente porcentaje de humedad y la variable independiente tiempo, mediante el método de los mínimos cuadrados. Como resultado, se obtuvieron los siguientes modelos para cada una de las variedades

- Modelo de regresión polinomial para el porcentaje de humedad en la albahaca en función del tiempo:

$$P(t)_A = (0,0009t^2 - 0,0545t + 0,897)$$

- Modelo de regresión polinomial para el porcentaje de humedad en la yerbabuena en función del tiempo:

$$P(t)_Y = (0,0005t^2 - 0,0402t + 0,8324)$$

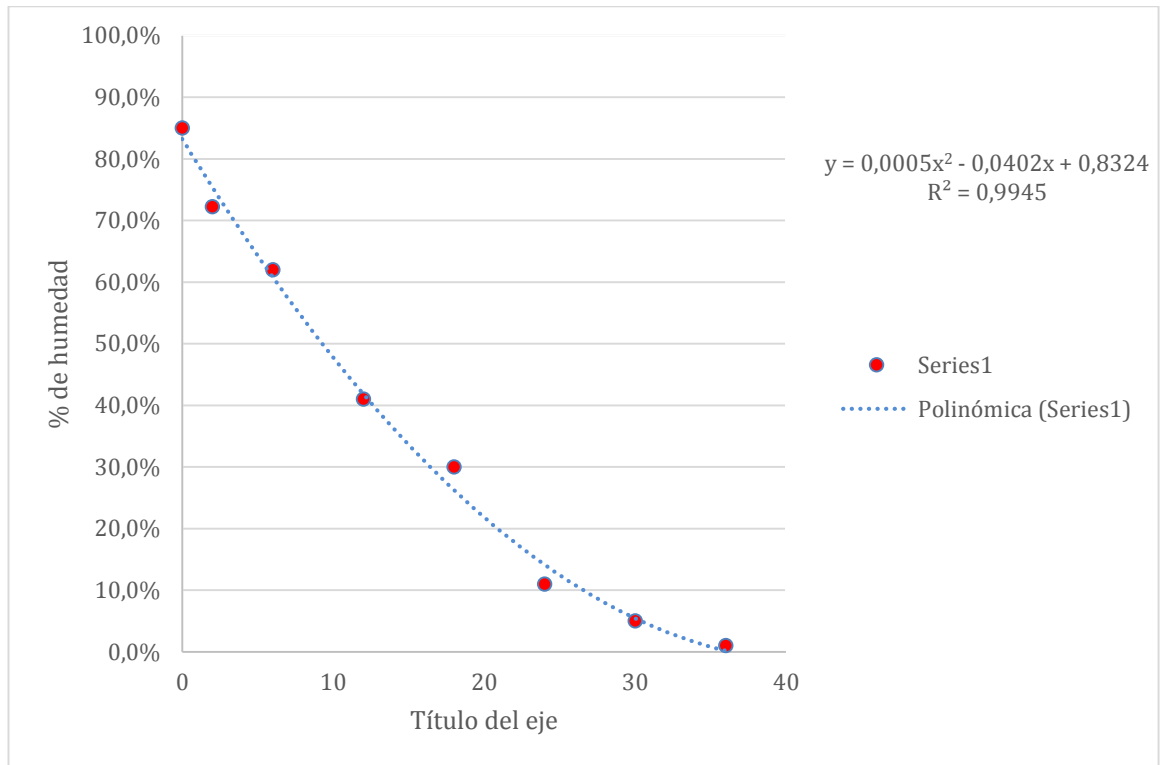
El coeficiente de determinación de cada modelo  $R_y^2$  y  $R_A^2$ , tiene el siguiente valor:

$$R_y^2 = 0.9945$$

$$R_A^2 = 0.9964$$

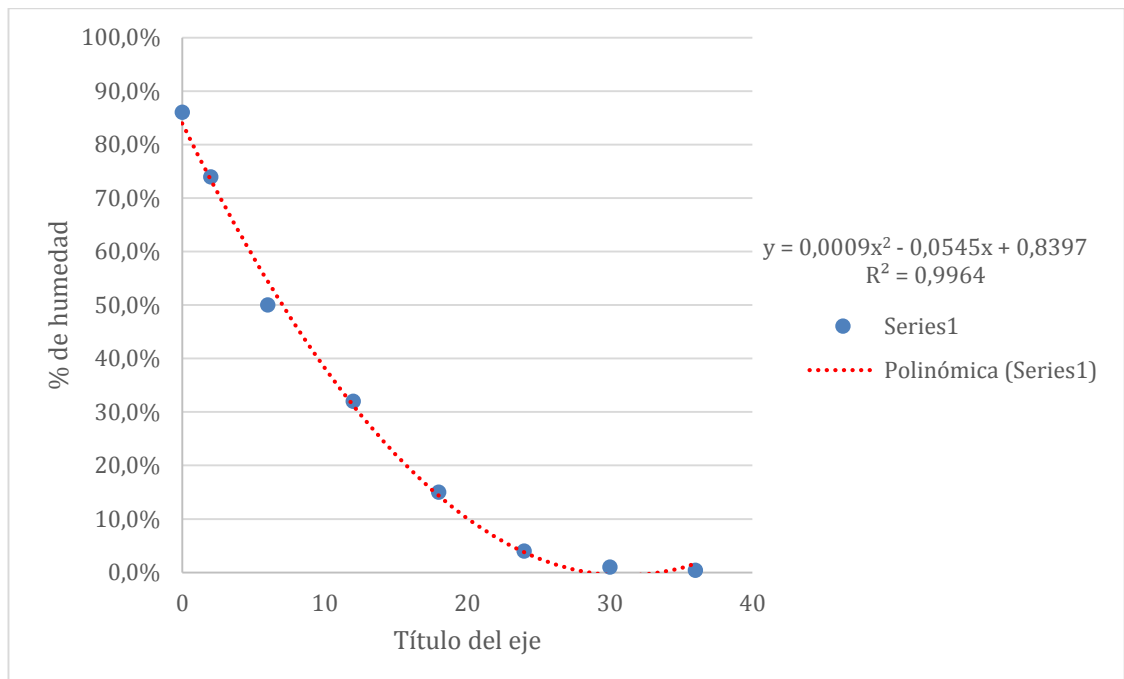
Lo que significa que el 99,45% de la variabilidad total de los datos para la yerbabuena y el 99.64% para la albahaca es explicada por cada modelo. Esto se corrobora con las gráficas 5 y 6, cada modelo sobre su respectiva nube de punto.

Grafica 5 Porcentaje de agua en la Yerbabuena VS tiempo



Fuente: Autores

Grafica 6 Porcentaje de agua en la Albahaca VS tiempo



Fuente: Autores

A partir de estos modelos, se encontró el valor de tiempo para el cual se lograba tener el menor porcentaje de humedad posible, es decir, el punto en donde la derivada de las funciones es igual a cero. Esto se representa en las siguientes ecuaciones:

- Derivada de la función de yerbabuena

$$\frac{d}{dt}(0,0005t^2 - 0,0402t + 0,8324) = 0.001t - 0.0402 = 0$$

- Derivada de la función de albahaca

$$\frac{d}{dt}(0,0009t^2 - 0,0545t + 0,8397) = 0.0018t - 0.0545 = 0$$

La solución de estas ecuaciones dio como resultado  $t_Y = 40.2 \text{ h}$  y  $t_A = 30.27 \text{ h}$ , Para estos tiempos se obtuvo que la menor proporción de agua que se puede alcanzar según los modelos tanto en la yerbabuena como en la albahaca fue de

$$P_Y = 0.01 \text{ y } P_A = 0.005$$

Como se puede observar, en el modelo de la yerbabuena el mínimo porcentaje de humedad es la misma proporción requerida, lo que significa que es necesario someter a la planta al proceso alrededor de 40.2 horas. Sin embargo, como la precisión del modelo no es del 100% sino del 99,51%, existe un error del 0,49%, por lo tanto se puede armar un intervalo de tiempo para la yerbabuena teniendo en cuenta dicho error, lo que daría como resultado:

$$t_y = 40.2 \pm 0.2 \text{ h} = (40.4 ; 40)h$$

En el caso de la albahaca, se puede observar que el mínimo porcentaje de humedad es de 0,005. Sin embargo, como en el caso de la yerbabuena, se puede establecer un intervalo de tiempo de secado teniendo en cuenta el error del modelo. Esto es:

$$t_y = 30.27 \pm 0.2 \text{ h} = (30.07 ; 30,47)h$$

Finalmente, es de resaltar que aunque los modelos encontrados son polinomios de grado dos (parábolas) y en teoría después de su tiempo mínimo el porcentaje de humedad debe empezar a aumentar, sólo se asimilaran los resultados obtenidos dentro de un intervalo de tiempo que se encuentre entre 0 y el tiempo mínimo para ambas plantas.

### 4.3 Análisis técnico económico

Colombia por ser un país con una gran diversidad geográfica presenta una amplia variedad de alimentos los cuales son apetecidos para la exportación. Algunas empresas dedicadas a la deshidratación de alimentos que hacen

presencia en Colombia son: fruty Reyes, Caribbean Exotics, Delfruto, Drycol y Liofrutt.

Las empresas fruty Reyes (carrera 125 # 65 A – 23 Bogotá – tel 2530120 – sales@frutireyes.com), Cariibbean Exotics (vereda cimarronavia marinilla km 1 Rio negro – tel 4489050 – carex@caribbeanexotics.com.co) y Delfruto (km1 el Guamo Tolima – 3214742738) son empresas que deshidratan por método convencional y cobran por kilogramos de producto a deshidratar, y la variación en sus precios depende del producto ya que entre más humedad presente mayor será su costo, se realizaron cotizaciones a estas empresas el promedio es de \$3.000 pesos por kilogramo. Estas empresas solicitan que el producto sea llevado hasta sus instalaciones, dependiendo el producto dan tres opciones de entrega las cuales son: tajado, picado o molido. El tiempo de entrega está en promedio entre 24 a 36 horas para una cantidad de masa de producto de 100 kg.

Se realizó esta misma investigación con las empresas Drycol y Liofrutt que son empresas que prestan el servicio de liofilización, la forma de trabajo es la misma; solicitan que el producto sea llevado hasta sus instalaciones, ofrecen tres formas de entrega del producto final que son tajado, picado o molido. La cantidad mínima de la masa a liofilizar son 100 kg tienen tiempos de entrega de 24 a 48 horas, en promedio el costo por kilogramo es de \$ 10.536 pesos, con variaciones mínimas en su costo según el producto.

Como se evidencia que la forma de entrega y tiempos de entrega son muy similares para estas empresas, se presenta una diferencia en la parte de costos, la cual muestra una mayor economía deshidratando alimentos por método convencional, la diferencia radica en la calidad del producto final y los beneficios que presenta cada uno de estos métodos.

Un primer análisis podría llevar a descartar la liofilización como alternativa de deshidratación; sin embargo como ejemplo de éxito de este proceso se puede mencionar que Federación Nacional de Cafeteros [30] ha venido exportando café liofilizado que permite conservar sus propiedades organolépticas. A nivel internacional este producto es preferido al compararlo con el secado, y aunque es más costoso, los usuarios prefieren pagar el valor agregado sabiendo que el producto es similar al café fresco.

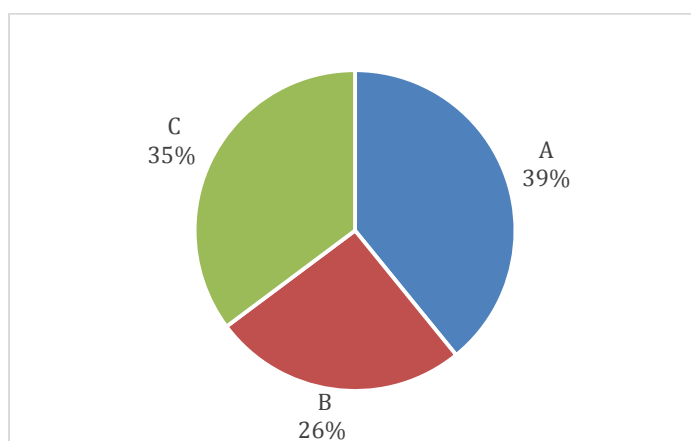
Lo anterior lleva a concluir que aunque la liofilización sea una alternativa de mayor costo para la deshidratación de alimentos, puede llegar a ser competitiva. Esta tesis presento el diseño y construcción de un liofilizador para plantas aromáticas, donde se realizaron diferentes pruebas para calcular el tiempo requerido en dicho proceso. Solamente un estudio de pre-factibilidad y factibilidad podrá concluir si es viable o no, establecer la liofilización como proceso para secar yerbabuena y albahaca.

Con base en un tiempo de liofilizado de 24 a 36 horas el cual es calculado mediante las curvas de liofilizado (ver figura 8 y 9) de las plantas aromáticas, el costo de liofilizar las plantas aromáticas es de \$10.536 pesos. Este costo está estipulado con base en el cálculo del consumo energético total del equipo diseñado como se puede observar en el capítulo 3, solo se tuvo en cuenta el consumo energético del compresor y la bomba de vacío, en comparación con las empresas como Drycol y Liofrut el costo que ellos manejan presentan más factores tales como: mano de obra, empaquetadura y tratamiento del producto, para este proyecto nada de eso se tuvo en cuenta ya que es a equipo piloto de laboratorio y no se necesita ninguna de estas.

Para verificar la calidad de las plantas aromáticas liofilizadas, se realizó un formato para un panel sensorial (ver anexo 6) donde se evaluó la intensidad del olor, color y sabor. Este panel se realizó con una cantidad de 50 personas, a las cuales se les dio a conocer tres muestras de agua aromática sin que supieran cual era la liofilizada, la deshidratada por método convencional y la natural, pidiendo que la califique de 0 a 5 siendo 5 el valor más alto.

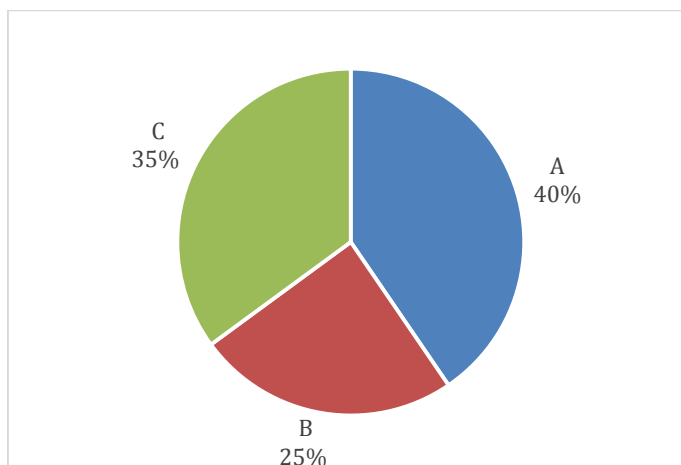
El panel de muestreo pedía calificar tres opciones las cuales eran A (planta aromática natural), B (Planta aromática deshidratada), C (Planta aromática liofilizada). Como se evidencia en las figuras 59, 60 y 61, la mejor calificada en los tres ítem es la A seguido de la C, donde se concluye que la liofilización conserva las propiedades organolépticas mucho mejor que las deshidratadas por método convencional.

*Figura 59 Intensidad del Sabor*



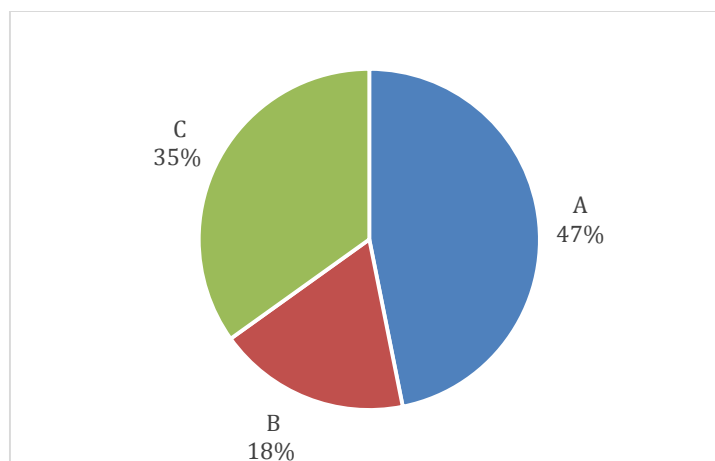
Fuente: Autores

*Figura 60 Intensidad del olor*



Fuente: Autores

*Figura 61 Intensidad del color*



Fuente: autores

El olor es la propiedad que presentan una mayor conservación seguido del sabor y por último el color, esto se debe a que las muestras liofilizadas y las secadas por método convencional presentan una pérdida de color significativa en comparación con las plantas naturales.

#### **4.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PANEL SENSORIAL**

- **Determinación del tamaño de la muestra**

Para estimar el tamaño de la muestra en la cual se sometió a evaluación el panel sensorial se usó la fórmula de cálculo de muestras por proporciones en poblaciones infinitas [31]. La cual es:

$$n = \frac{Z^2 * (p * q)}{\epsilon^2}$$

Donde

P: porción de personas que les guste

q: porción de personas que no les guste

Z: valor teórico de tabla normal

E: valor teórico establecido basado en el porcentaje de error

$$p=0.5$$

$$q=0.5$$

$$z= 1.64$$

$$\epsilon=0,116$$

$$n = \frac{1.64^2 * (0.5 * 0.5)}{0.116^2}$$

$$n=50$$

- **Pruebas de normalidad**

Se realizó el test de kolmogorov smirnov para contrastar el comportamiento de las variables con la distribución normal, tomando como nivel de confianza el 90% [32], sometiendo a verificación la siguiente hipótesis: (ver tabla 17)

$H_0$ : La distribución de los datos se ajusta a los parámetros de la distribución normal.

*Tabla 17 Pruebas de kolmogorov smirnov para la muestra*

		Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor de las tres opciones A, B y C [A]	Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor de las tres opciones A, B y C [B]	Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor de las tres opciones A, B y C [C]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor de las tres opciones A, B y C [A]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor de las tres opciones A, B y C [B]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor de las tres opciones A, B y C [C]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color de las tres opciones A, B y C [A]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color de las tres opciones A, B y C [B]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color de las tres opciones A, B y C [C]
N		50	50	50	50	50	50	50	50	50
parametros normales a, b	Media	4,18	2,74	3,76	4,20	2,54	3,64	4,62	1,80	3,44
	Desviacion tipica	0,596	0,876	0,744	0,535	0,838	0,964	0,830	1,069	0,787
Diferencias mas extremas	Absoluta	0,339	0,217	0,247	0,386	0,228	0,206	0,396	0,206	0,262
	Positiva	0,339	0,203	0,227	0,386	0,220	0,187	0,324	0,206	0,212
	Negativa	-0,281	-0,217	-0,247	-0,294	-0,228	-0,206	-0,396	-0,154	-0,262
z de kolmogorov-smirnov		2,395	1,532	1,743	2,728	1,615	1,454	2,803	1,455	1,851
sig. Asintot. (bilateral)		0,000	0,018	0,005	0,000	0,011	0,029	0,000	0,029	0,002
a. la distribucion de contraste es la Normal										
b. se han calculado a partir de los datos										

Fuente: [32]

Se rechaza la hipótesis nula, porque en la curva de distribución normal más del 5% de los datos están por fuera del área ocupada por la media presenta una desviación estándar de +/- 2, y se asume que la distribución de los datos en todas las variables no se ajusta a los parámetros de la distribución normal. (p<0.05)

- **Estadística descriptiva**

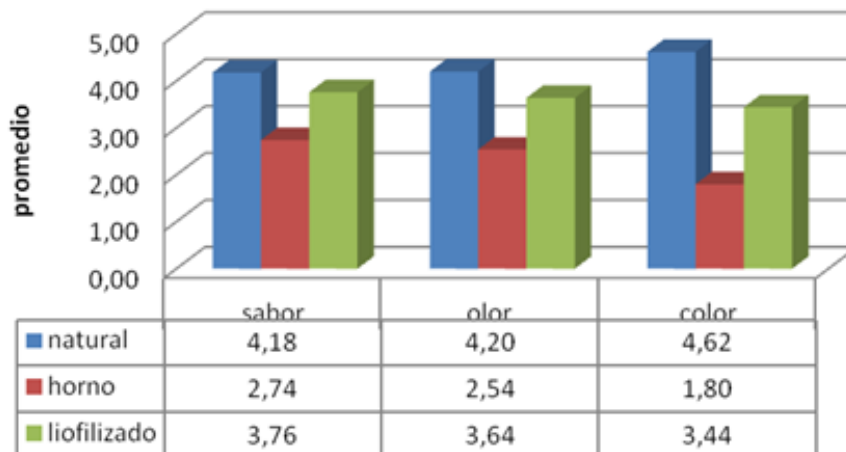
En la tabla 18 se realizó el análisis descriptivo de las variables de evaluación de las propiedades organolépticas de las plantas aromáticas para cada uno de los métodos de secado de las mismas; secado natural, por método convencional y liofilizado y en la gráfica 7 muestra el comportamiento.

*Tabla 18 Propiedades organolépticas*

	N	Percentiles		
		25	50 (Mediana)	75
sabor	150	3,00	4,00	4,00
olor	150	3,00	4,00	4,00
color	150	2,00	4,00	5,00
grupo	150	1,00	2,00	3,00

Fuente: [32]

*Grafica 7 Propiedades Organolépticas*



Fuente: Autores

- **Análisis multivariado**

Una vez establecidos los parámetros de normalidad de las variables se realizó la prueba *DE KUSKALL WALLIS* para establecer diferencia en las medidas de las propiedades organolépticas de las plantas según el método de secado encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre las tres estrategias de secado ( $p < 0,05$ ) [31]. Ver tablas 19 y 20

*Tabla 19 Rangos de los grupos*

grupo	N	Rango promedio
sabor 1	50	103,10
2	50	40,86
3	50	82,54
Total	150	
olor 1	50	106,09
2	50	38,81
3	50	81,60
Total	150	
color 1	50	117,43
2	50	33,41
3	50	75,66
Total	150	

Fuente: [31]

*Tabla 20 Datos estadísticos de las constantes a y b*

	sabor	olor	color
Chi-cuadrado	59,274	67,068	97,892
gl	2	2	2
Sig. asintót.	,000	,000	,000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: grupo

En la tabla 21, para establecer las diferencias entre cada una de los métodos de secado de manera independiente se usó la prueba *t* de comparación de medias por parejas [32].

*Tabla 21 Datos estadísticos de contraste*

	Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor [ B ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor [ C ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor [ C ] - [ B ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor [ B ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor [ C ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del olor [ C ] - [ B ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color [ B ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color [ C ] - [ A ]	Califique de 0 a 5 la intensidad del color [ C ] - [ B ]
Z	-5,976 <sup>a</sup>	-3,541 <sup>a</sup>	-5,476 <sup>b</sup>	-5,986 <sup>a</sup>	-3,378 <sup>a</sup>	-4,976 <sup>b</sup>	-6,074 <sup>a</sup>	-5,168 <sup>a</sup>	-5,969 <sup>b</sup>
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,000


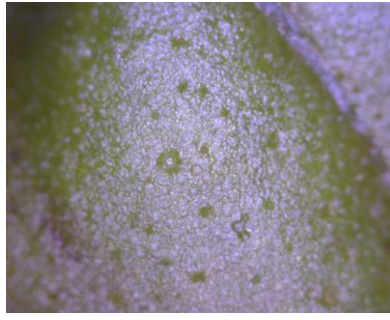
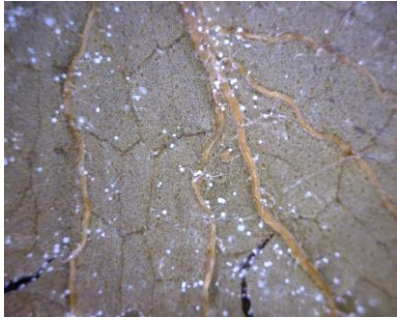



- a. Basado en los rangos positivos.
- b. Basado en los rangos negativos.
- c. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Con las tablas 20 y 21 presentadas anteriormente, se concluye que existe un valor estadísticamente significativo entre cada muestra por lo cual se confirmó que las propiedades de las plantas liofilizadas se conservan en mayor porcentaje que las deshidratadas por método convencional.

#### **4.4 TOMA DE FOTOS CON ESPECTRÓMETRO**

Para complementar este estudio se realizó una toma de fotos a la superficie de las hojas de la albahaca para el estado natural, deshidratada por secado convencional y liofilizado. Mediante la ayuda de un estereoscopio, con un zoom de 30X se pudo determinar la variación de cada una de las hojas. Las Figuras 62, 63, 64, 65, 66 y 67, muestra las fotografías tomadas.

Tabla 22 Fotos estructura molecular

<i>Figura 62 Yerbabuena natural</i>	<i>Figura 63 Albahaca Natural</i>	Descripción
		<p>En estas dos imágenes se puede observar la cantidad de agua presente, además de esto se evidencia la intensidad del color.</p>
<p data-bbox="316 730 724 786"><i>Figura 64 Yerbabuena deshidratada en horno</i></p> 	<p data-bbox="762 730 1147 786"><i>Figura 65 Albahaca deshidratada en horno</i></p> 	<p>En esta figura se observa la pérdida de color y daños en la superficie; además no hay presencia de agua en la superficie.</p>
<p data-bbox="316 1167 663 1196"><i>Figura 66 Yerbabuena Liofilizada</i></p> 	<p data-bbox="762 1167 1070 1196"><i>Figura 67 Albahaca Liofilizada</i></p> 	<p>En esta muestra se observa que existe pérdida de color, ausencia de agua en toda la superficie y color más homogéneo.</p>

Fuente: Autores

Como se muestra en la Figura anterior se presentan la superficie de las 3 hojas, donde la muestra A (planta aromática natural) presenta mejores condiciones de color y una estructura más homogénea pero con mucha cantidad de agua, la muestra B (planta aromática seca) y C (planta aromática liofilizada) presentan una pérdida de color similar pero la cantidad de agua presente en su estructura es mínima; es de resaltar que la muestra liofilizada tiene una estructura más compacta y la presencia de agua es nula, en comparación con la muestra secada por método convencional, la muestra liofilizada presenta una mayor porosidad lo cual presenta beneficios para la rehidratación ya que su estructura presentara

una mayor facilidad de absorción del agua, por lo cual se ratifican los beneficios que garantiza la liofilización en comparación con un secado convencional.

## **5. Conclusiones**

De acuerdo a la revisión bibliográfica se identificaron la temperatura y la presión como los parámetros que controlan el proceso, y teniendo en cuenta que se van a procesar materiales orgánicos principalmente plantas aromáticas, los rangos de operación del equipo se definieron de  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$  para la temperatura del producto y la presión dentro de la cámara de trabajo se definió 0,6 kPa.

Se planteó el diseño detallado de un equipo de liofilización a escala de laboratorio, que consta de una cámara de secado con capacidad de masa de 1 kg de producto inicial, de 30 cm de ancho X por 30 cm de alto X 30 cm de profundidad, con tres placas intercambiadoras de calor de 30 cm de ancho X 30 cm de longitud y 2 mm de espesor, las cuales se utilizaron para distribución de las bandejas contenedoras del producto; un condensador interno, un sistema de vacío con una capacidad de vacío de 140 L/min y un vacío último de 0,610 kPa, un sistema de refrigeración constituido por un compresor de etapa simple, para la temperatura en las placas intercambiadoras de calor.

Se evaluó el costo del consumo energético del equipo con base en la información presentada en el documento y se estableció un costo de 10.536 pesos por kilogramo de producto procesado, este costo solo está basado en la potencia total del equipo y no se tienen en cuenta factores como la mano de obra, manejo del producto.

Se realizó panel sensorial como complemento del estudio técnico económico para comparar los beneficios de la liofilización respecto al secado convencional, obteniendo que las propiedades organolépticas en los productos liofilizados se conservan en mayor porcentaje que las secadas por método convencional.

## 6. Recomendaciones

Con el fin de optimizar el funcionamiento del liofilizador piloto se recomienda:

- Analizar la posibilidad de construir la puerta del equipo en acrílico, con el fin de permitir la visualización del producto durante todo el proceso de liofilización, de esta forma lograr un diseño más académico.
- La instalación de manómetros en las líneas de baja y de alta presión.
- Cambiar el cierre de manijas de apriete por una manija de con cierre apernado y bisagras fijas para facilitar el cierre.
- La instalación de resistencias eléctricas dentro de la cámara de trabajo para acelerar el proceso de descongelamiento del producto y los tiempos de proceso se reduzcan.
- Para romper el vacío al interior de la cámara de trabajo se sugiere la instalación de una válvula, con un filtro en su interior de partículas sólidas y de humedad, con el fin que el gas que entra a la cámara solo sea aire y no contamine el producto en su interior.
- La humedad relativa del ambiente debe ser baja para impedir que el producto absorba humedad del medio en el transcurso del retiro de la cámara a su posterior empaque, para ello se debe controlar la temperatura y humedad del laboratorio por medio de un sistema de acondicionamiento del ambiente, si es necesario.

## 7. Referencias

- [1] UPV, «Universidad del País Vasco,» [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/proteinas/desnaturalizacion.htm>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [2] B. A. FERNANDEZ, «Fundamentos de la liofilización,» de *liofilización de productos farmacéuticos*, Valencia España, LIMUSA, 1998, pp. 53 - 120 .
- [3] S. Bosca y D. Fissore, «Chemical Engineering science,» *Chemical Engineering Science*, 20 JULIO 211. [En línea]. [Último acceso: 8 10 2014].
- [4] G. BARBOSA, *Deshidratación de alimentos*, Zaragoza, España: ACRIBIA, 2000, pp. 40 - 135.
- [5] C. G. BARBOSA, *variables de diseño*, Zaragoza (España): Acribia. S.A., 2000, pp. 35-80.
- [6] M. BARRERA, *Cámaras Frigoríficas*, Barcelona: Ceas, 1996.
- [7] C. YUNUSA y T. ROBERT H, *Fundamentals of thermal-fluid sciences*, Mc Graw-Hill, 2004, p. 78.
- [8] P. FELLOWS, «Tecnología del Proceso de los alimentos, Principios y Practicas,» ZARAGOZA, ESPAÑA, ACRIBIA S.A, 1994, pp. 613 - 687.
- [9] Y. CENGEL y M. BOLES, *Termodinámica*, Ciudad de México: McGraw-Hill, 2009.
- [10] ROY J DOSSAT, *principios de refrigeración*, Prentice Hall, 2002.
- [11] RODOLFO MARTINEZ Y OSCAR PRADA, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO*, BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2008.
- [12] C. Y. A, *Transferencia de Calor*, 2 ed., McGraw-Hill, 2007.
- [13] U. Nacional, «Universidad Nacional Sede Manizales,» Facultad de Ingeniería Y Arquitectura, [En línea]. Available: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap1/leccion11\\_2.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap1/leccion11_2.htm). [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [14] R. P. A. A. B. DAVIDE FISSORE, «Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process,» *Journal of Food Engineering*, vol. 123, pp. 179-187, 2014.
- [15] A. V. ALESSIO CARULLO, «Measurement uncertainty issues in freeze-drying processes,» *Measurement*, vol. 45, p. 1706–1712, 2012.
- [16] LABCONCO, «LABCONCO,» [En línea]. Available: <http://www.labconco.com/product/freezone-105c-45-liter-benchtopy-freeze-dry-systems/87>. [Último acceso: 04 06 2015].
- [17] TELSTAR, «<http://www.telstar.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.telstar-lifesciences.com/Technologies/Freeze%20Drying%20Systems.htm>. [Último acceso: 04 06 2015].

- [18] C. INDUSTRIES, «<http://www.cimaindustries.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.cimaindustries.com/es/>. [Último acceso: 04 06 2015].
- [19] AAPTEC, «<http://www.aaptec.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.aaptec.com/freeze-dryers-i-92.html?osCsid=los4ie111tdoj2inp2lphd8et5>. [Último acceso: 04 06 2015].
- [20] DIRECTINDUSTRY, «<http://www.directindustry.es/>,» [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/liofilizador-75079.html>. [Último acceso: 04 06 2015].
- [21] ESCO, «[www.escoglobal.es](http://www.escoglobal.es/),» [En línea]. Available: <http://www.escoglobal.es/product/liofilizadores/liofilizador/FDL-S/L/>. [Último acceso: 04 06 2015].
- [22] H. R.C., *Mecanica de materiales*, Mexico: Pearson prentise hall, 2006.
- [23] A. H. COMMITTEE, *Metals handbook*, California: American Society for Metals, 1989.
- [24] P. Buthod, *Pressure Vessel Handbook*, Oklahoma: Pressure Vessel Handbook Publishing, INC, 1995.
- [25] ASME, ASME Seccion VIII division I.
- [26] «Evaluación de la anisotropía en las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 laminado en frío,» *Revista de ingeniería (universidad carabobo Venezuela)*, vol. 19, pp. 7-15, 2012.
- [27] IDEAM, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia,» 16 Junio 2000. [En línea]. Available: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/bogota/temperatura.htm>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [28] COPELAND, *Manual de refrigeracion*, 1983.
- [29] G. PITA EDGARD, *principios y sistemas de refrigeracion*, limusa, 2000, p. 75.
- [30] ORC, «[http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/2011\\_09\\_24\\_archive.html](http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/2011_09_24_archive.html),» [En línea]. Available: <http://2.bp.blogspot.com/-9G542wTifXs/Tn4zbNOR4DI/AAAAAAAAA7s/2USEIM0YU78/s1600/r404a-747956.gif>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [31] «FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS,» [En línea]. Available: <http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [32] R. E. Walpole, *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Mexico: Pearson Educacion, 1999.
- [33] I. L. Chao, *Estadística para las ciencias administrativas*, Mexico: McGRaw-Hill, 1993.
- [34] S. SALVADOR ESCODA, «SALVADOR ESCODA SA,» *catalogo tecnico gas refrigerante R-404a*.
- [35] Ramirez, «Refrigeracion,» de *Liofilización de Alimentos*, Cali, Colombia, Recitela, 1994, p. 31.

- [36] B. Fernandez, liofilizacion de productos farmaceuticos, valencia: Editorial Limusa S.A., 1998, p. 53.
- [37] A. Ribas, Biografia de vacio. su historia filosofica y cientifica desde la edad antigua a ka moderna, 4 ed., BARCELONA, sunya, 2008.
- [38] S. A. A. GARCIA, PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DE LIOFILIZACION PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, SANTA FE DE BOGOTA: UNIVERSIDAD DE LA SABANA, 2002.
- [39] E. ESPINOSA, S. SANDOVAL y S. ZAMBRANO, *PLAN DE NEGOCIOS PRODUCTOS LIOFILIZADOS FRUT-LI*, U. D. L. SABANA, Ed., Chia, 2007.
- [40] J. E. Garcia Enrique, *MODELO DE UNIDAD PRODUCTIVA DE PLANTAS AROMATICAS PARA EXPORTACION BASADO EN LA ESPECIE ROMERO (Rosmarinus EXPORTACION BASADO EN LA ESPECIE ROMERO (Rosmarinus officinalis) officinalis)*, BOGOTA D.C.: UNIVERSIDAD DE LA SALLE, 2007.
- [41] ROY J DOSSAT, principios de refrigeracion, Prentice Hall, 2002.
- [42] C. Y. A, Transferencia de Calor, 2 ed., McGraw-Hill, 2007.
- [43] U. Nacional, «Universidad Nacional Sede Manizales,» Facultad de Imgenieria Y Arquitectura, [En línea]. Available: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap1/leccion11\\_2.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/lecciones/cap1/leccion11_2.htm). [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [44] R. P. A. A. B. DAVIDE FISSORE, «Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process,» *Journal of Food Engineering*, vol. 123, pp. 179-187, 2014.
- [45] A. V. ALESSIO CARULLO, «Measurement uncertainty issues in freeze-drying processes,» *Measurement*, vol. 45, p. 1706–1712, 2012.
- [46] H. R.C., Mecanica de materiales, Mexico: Pearson prentise hall, 2006.
- [47] A. H. COMMITTEE, Metals handbook, California: American Society for Metals, 1989.
- [48] IDEAM, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia,» 16 Junio 2000. [En línea]. Available: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/bogota/temperatura.htm>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [49] COPELAND, Manual de refrigeracion, 1983.
- [50] G. PITA EDGARD, principios y sistemas de refrigeracion, limusa, 2000, p. 75.
- [51] ORC, «[http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/2011\\_09\\_24\\_archive.html](http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/2011_09_24_archive.html),» [En línea]. Available: <http://2.bp.blogspot.com/-9G542wTifXs/Tn4zbNOR4DI/AAAAAAAAA7s/2USEIM0Yu78/s1600/r404a-747956.gif>. [Último acceso: 07 Julio 2015].
- [52] «FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS,» [En línea]. Available: <http://organic-rankine-cycle.blogspot.com/>. [Último acceso: 07 Julio 2015].

- [53] P. Buthod, Pressure Vessel Handbook, Oklahoma: Pressure Vessel Handbook Publishing, INC, 1995.
- [54] R. E. Walpole, Probabilidad y estadística para ingenieros, Mexico: Pearson Educacion, 1999.
- [55] I. L. Chao, Estadística para las ciencias administrativas, Mexico: McGRaw-Hill, 1993.

## **8. ANEXOS**

***Anexo 1 CATALOGO TECNICO GAS REFRIGERANTE R-404<sup>a</sup>***

**01 GAS REFRIGERANTE  
R-404A**

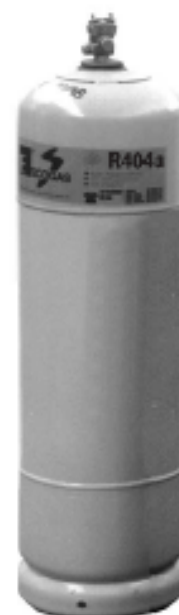
- ✓ Refrigerante zeotrópico que contiene R-125, R-143a y R-134a (44/52/4 % en peso).
- ✓ El refrigerante debe ser cargado por fase líquida.
- ✓ Propiedades físicas y termodinámicas comparables al R502.
- ✓ No Inflamable.
- ✓ Los compresores deben ser cargados con aceites poliolester.

**R-404A**  
El sustituto  
del R502  
sin más...

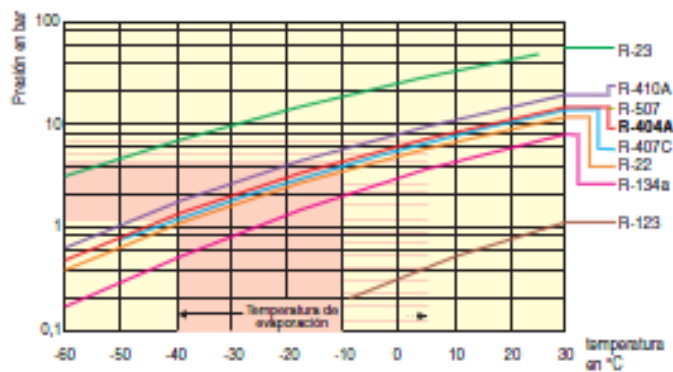
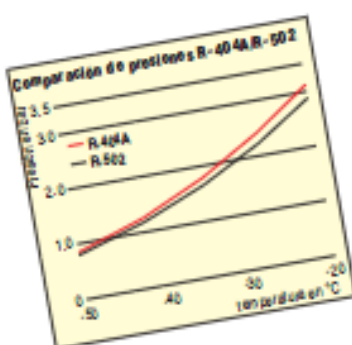
**Aplicaciones:**

- Almacenamiento de productos refrigerados.
- Máquinas de hielo.
- Sustitución del R502 en el transporte refrigerado.
- Expositores de supermercado.
- Retrofit de instalaciones de R502.

Especificaciones técnicas		R-404A
Descripción química		Pentafluoroetano/ 1,1,1-Trifluoroetano/ 1,1,1-Tetrafluoroetano
Fórmula química		CHF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> /CH <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> / CF <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> F
Peso molecular	Kg/kmol	97,60
Punto de ebullición a 1.013 bar	°C	-46,4/45,7
Punto burbuja/Punto rocío		
Temperatura crítica	°C	72,07
Presión crítica	bar	37,32
Densidad crítica	Kg/m <sup>3</sup>	485
Volumen crítico	m <sup>3</sup> /Kg	2,06 x 10 <sup>-3</sup>
Densidad del líquido a 25°C	Kg/m <sup>3</sup>	1,045
Densidad del vapor saturado a 25°C	Kg/m <sup>3</sup>	64,033
Calor de vaporización a 25°C	kJ/kg	143,68
Calor específico a 25°C (líquido)	kJ/kgK	1,64
Calor específico a 25°C y 1.013 bar (vapor)	kJ/kgK	1,03



**Rango de aplicaciones:**

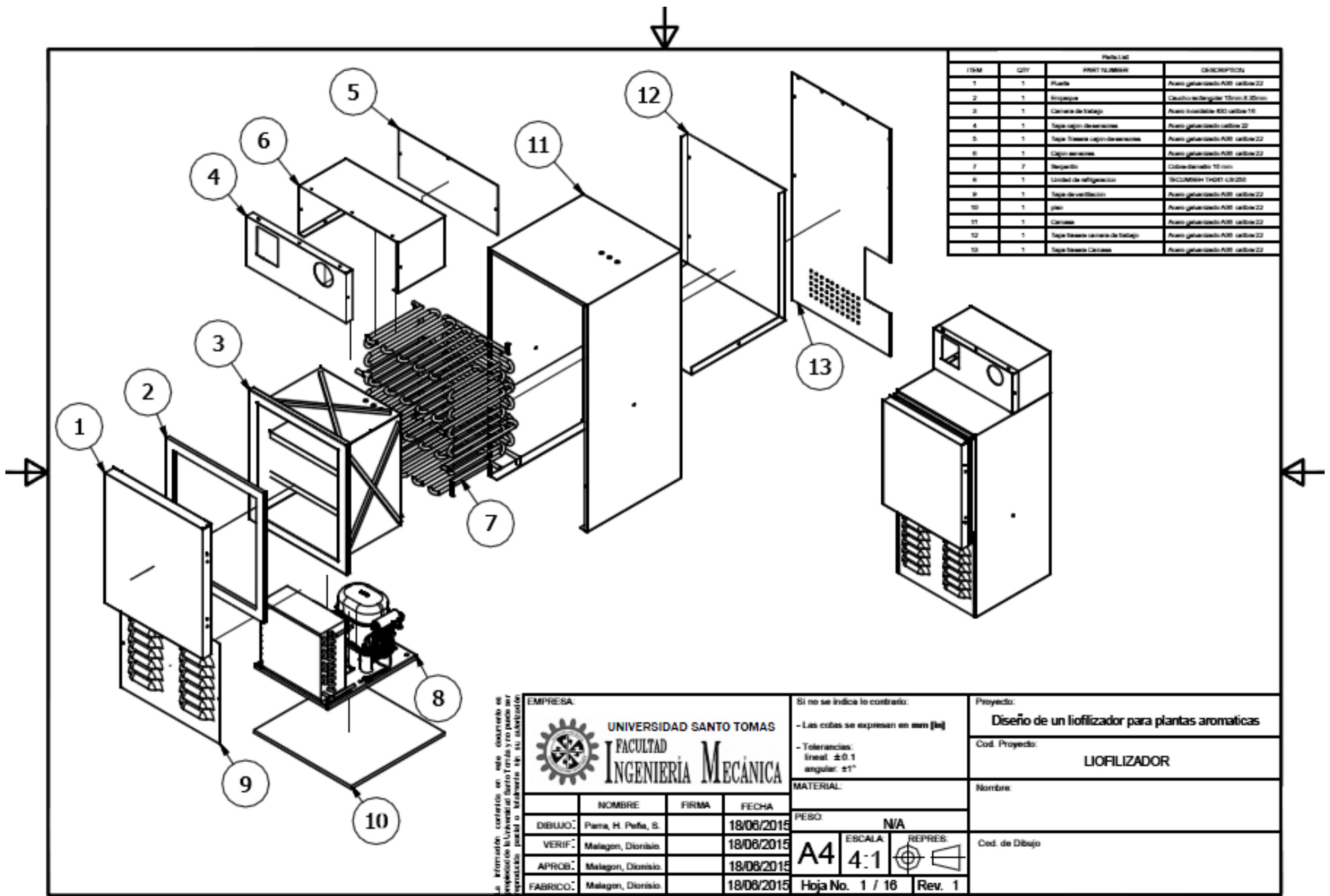


**Propiedades termodinámicas del R-404A:**

t	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	v <sub>l</sub>	v <sub>v</sub>	r	z	z'
°C	bar	bar	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	kg/kg	kg/kg
-30	0.024	0.082	0.536	202.81	1.367	7.707	114.62	200.07	739.65	0.2462	0.2710
-28	0.032	0.105	0.536	202.55	1.360	7.681	114.87	200.70	737.86	0.2471	0.2694
-26	0.042	0.138	0.536	202.18	1.350	7.639	115.28	201.38	735.55	0.2483	0.2678
-24	0.054	0.180	0.536	201.67	1.338	7.583	115.84	202.03	732.66	0.2496	0.2662
-22	0.068	0.231	0.536	201.01	1.323	7.514	116.53	202.74	729.15	0.2510	0.2646
-20	0.084	0.291	0.536	200.21	1.305	7.432	117.33	203.50	725.09	0.2524	0.2630
-18	0.102	0.359	0.536	199.28	1.284	7.338	118.22	204.31	720.46	0.2538	0.2614
-16	0.122	0.434	0.536	198.22	1.260	7.233	119.18	205.17	715.25	0.2552	0.2598
-14	0.144	0.516	0.536	197.03	1.233	7.118	120.20	206.08	709.46	0.2566	0.2582
-12	0.168	0.604	0.536	195.71	1.203	6.994	121.27	207.03	703.09	0.2580	0.2566
-10	0.194	0.698	0.536	194.27	1.170	6.862	122.38	208.02	696.14	0.2594	0.2550
-8	0.222	0.797	0.536	192.71	1.134	6.723	123.52	209.05	688.62	0.2608	0.2534
-6	0.252	0.901	0.536	191.03	1.095	6.578	124.69	210.11	680.54	0.2622	0.2518
-4	0.284	1.009	0.536	189.24	1.053	6.428	125.88	211.20	671.90	0.2636	0.2502
-2	0.318	1.121	0.536	187.34	1.008	6.273	127.08	212.31	662.70	0.2650	0.2486
0	0.354	1.237	0.536	185.33	0.960	6.114	128.29	213.44	652.94	0.2664	0.2470
2	0.392	1.357	0.536	183.21	0.909	5.951	129.50	214.58	642.62	0.2678	0.2454
4	0.432	1.480	0.536	180.98	0.855	5.785	130.71	215.73	631.74	0.2692	0.2438
6	0.474	1.606	0.536	178.64	0.798	5.617	131.91	216.88	620.30	0.2706	0.2422
8	0.518	1.734	0.536	176.19	0.738	5.447	133.10	218.03	608.30	0.2720	0.2406
10	0.564	1.864	0.536	173.63	0.675	5.275	134.27	219.17	595.74	0.2734	0.2390
12	0.612	2.006	0.536	170.96	0.609	5.102	135.42	220.30	582.62	0.2748	0.2374
14	0.662	2.159	0.536	168.18	0.540	4.928	136.54	221.41	568.94	0.2762	0.2358
16	0.714	2.323	0.536	165.29	0.468	4.753	137.63	222.50	554.70	0.2776	0.2342
18	0.768	2.497	0.536	162.29	0.393	4.577	138.68	223.57	539.90	0.2790	0.2326
20	0.824	2.681	0.536	159.18	0.315	4.401	139.69	224.62	524.54	0.2804	0.2310
22	0.882	2.874	0.536	155.96	0.234	4.225	140.66	225.64	508.62	0.2818	0.2294
24	0.942	3.076	0.536	152.63	0.150	4.050	141.58	226.63	492.14	0.2832	0.2278
26	1.004	3.286	0.536	149.19	0.063	3.876	142.45	227.58	475.20	0.2846	0.2262
28	1.068	3.503	0.536	145.64	0.000	3.703	143.27	228.49	457.80	0.2860	0.2246
30	1.134	3.727	0.536	141.98	0.000	3.531	144.03	229.35	440.04	0.2874	0.2230
32	1.202	3.957	0.536	138.21	0.000	3.360	144.74	230.16	421.92	0.2888	0.2214
34	1.272	4.193	0.536	134.34	0.000	3.191	145.39	230.91	403.44	0.2902	0.2198
36	1.344	4.434	0.536	130.37	0.000	3.024	146.00	231.60	384.60	0.2916	0.2182
38	1.418	4.680	0.536	126.30	0.000	2.859	146.56	232.23	365.40	0.2930	0.2166
40	1.494	4.931	0.536	122.13	0.000	2.696	147.07	232.80	345.84	0.2944	0.2150
42	1.572	5.187	0.536	117.86	0.000	2.535	147.53	233.31	325.94	0.2958	0.2134
44	1.652	5.448	0.536	113.49	0.000	2.376	147.94	233.76	305.68	0.2972	0.2118
46	1.734	5.714	0.536	109.02	0.000	2.219	148.30	234.15	285.06	0.2986	0.2102
48	1.818	5.985	0.536	104.45	0.000	2.064	148.61	234.48	264.08	0.2999	0.2086
50	1.904	6.260	0.536	100.00	0.000	1.911	148.87	234.75	242.74	0.3012	0.2070
52	1.992	6.539	0.536	95.67	0.000	1.761	149.08	234.96	221.04	0.3024	0.2054
54	2.082	6.822	0.536	91.46	0.000	1.613	149.24	235.11	198.98	0.3035	0.2038
56	2.174	7.108	0.536	87.27	0.000	1.468	149.35	235.20	176.56	0.3045	0.2022
58	2.268	7.397	0.536	83.10	0.000	1.325	149.41	235.24	153.78	0.3054	0.2006
60	2.364	7.689	0.536	78.95	0.000	1.185	149.42	235.23	130.64	0.3062	0.1990
62	2.462	7.983	0.536	74.82	0.000	1.047	149.38	235.17	107.14	0.3069	0.1974
64	2.562	8.279	0.536	70.71	0.000	0.912	149.29	235.06	83.38	0.3075	0.1958
66	2.664	8.577	0.536	66.62	0.000	0.780	149.15	234.90	59.36	0.3080	0.1942
68	2.768	8.876	0.536	62.55	0.000	0.651	148.96	234.69	35.08	0.3083	0.1926
70	2.874	9.176	0.536	58.50	0.000	0.525	148.72	234.43	10.64	0.3084	0.1910
72	2.982	9.477	0.536	54.47	0.000	0.402	148.43	234.12	-13.06	0.3083	0.1894
74	3.092	9.779	0.536	50.46	0.000	0.282	148.09	233.76	-36.50	0.3080	0.1878
76	3.204	10.081	0.536	46.47	0.000	0.165	147.70	233.35	-60.00	0.3074	0.1862
78	3.318	10.384	0.536	42.50	0.000	0.051	147.26	232.89	-83.60	0.3065	0.1846
80	3.434	10.687	0.536	38.55	0.000	0.000	146.77	232.38	-107.30	0.3053	0.1830
82	3.552	10.990	0.536	34.62	0.000	0.000	146.23	231.82	-131.10	0.3038	0.1814
84	3.672	11.292	0.536	30.71	0.000	0.000	145.64	231.21	-155.00	0.3020	0.1798
86	3.794	11.594	0.536	26.82	0.000	0.000	145.00	230.55	-179.00	0.3000	0.1782
88	3.918	11.895	0.536	22.95	0.000	0.000	144.31	229.84	-203.20	0.2977	0.1766
90	4.044	12.195	0.536	19.10	0.000	0.000	143.57	229.08	-227.60	0.2952	0.1750
92	4.172	12.494	0.536	15.27	0.000	0.000	142.78	228.27	-252.20	0.2924	0.1734
94	4.302	12.791	0.536	11.46	0.000	0.000	141.94	227.41	-277.00	0.2893	0.1718
96	4.434	13.087	0.536	7.67	0.000	0.000	141.05	226.50	-302.00	0.2859	0.1702
98	4.568	13.381	0.536	3.90	0.000	0.000	140.11	225.54	-327.20	0.2821	0.1686
100	4.704	13.673	0.536	0.15	0.000	0.000	139.12	224.53	-352.60	0.2779	0.1670

t	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	ρ <sub>l</sub>	ρ <sub>v</sub>	v <sub>l</sub>	v <sub>v</sub>	r	z	z'
°C	bar	bar	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	kg/kg	kg/kg
0	0.354	0.082	0.536	202.81	1.367	7.707	114.62	200.07	739.65	0.2462	0.2710
1	0.359	0.083	0.536	202.55	1.360	7.681	114.87	200.70	737.86	0.2471	0.2694
2	0.364	0.084	0.536	202.18	1.350	7.639	115.28	201.38	735.55	0.2483	0.2678
3	0.369	0.085	0.536	201.67	1.338	7.583	115.84	202.03	732.66	0.2496	0.2662
4	0.374	0.086	0.536	201.01	1.323	7.514	116.53	202.74	729.15	0.2510	0.2646
5	0.379	0.087	0.536	200.21	1.305	7.432	117.33	203.50	725.09	0.2524	0.2630
6	0.384	0.088	0.536	199.28	1.284	7.338	118.22	204.31	720.46	0.2538	0.2614
7	0.389	0.089	0.536	198.22	1.260	7.233	119.18	205.17	715.25	0.2552	0.2598
8	0.394	0.090	0.536	197.03	1.233	7.118	120.20	206.08	709.46	0.2566	0.2582
9	0.399	0.091	0.536	195.71	1.203	6.994	121.27	207.03	703.09	0.2580	0.2566
10	0.404	0.092	0.536	194.27	1.170	6.862	122.38	208.02	696.14	0.2594	0.2550
11	0.409	0.093	0.536	192.71	1.134	6.723	123.52	209.05	688.62	0.2608	0.2534
12	0.414	0.094	0.536	191.03	1.095	6.578	124.69	210.11	680.54	0.2622	0.2518
13	0.419	0.095	0.536	189.24	1.053	6.428	125.88	211.20	671.90	0.2636	0.2502
14	0.424	0.096	0.536	187.34	1.008	6.275	127.08	212.31	662.70	0.2650	0.2486
15	0.429	0.097	0.536	185.33	0.960	6.114	128.29	213.44	652.94	0.2664	0.2470
16	0.434	0.098	0.536	183.21	0.909	5.951	129.50	214.58	642.62	0.2678	0.2454
17	0.439	0.099	0.536	180.98	0.855	5.785	130.71	215.73	631.74	0.2692	0.2438
18	0.444	0.100	0.536	178.64	0.798	5.617	131.91	216.88	620.30	0.2706	0.2422
19	0.449	0.101	0.536	176.19	0.738	5.447	133.10	218.03	608.30	0.2720	0.2406
20	0.454	0.102	0.536	173.63	0.675	5.275	134.27	219.17	595.74	0.2734	0.2390
21	0.459	0.103	0.536	170.96	0.609	5.102	135.42	220.30	582.62	0.2748	0.2374
22	0.464	0.104	0.536	168.18	0.540	4.928	136.54	221.41	568.94	0.2762	0.2358
23	0.469	0.105	0.536	165.29	0.468	4.753	137.63	222.50	554.70	0.2776	0.2342

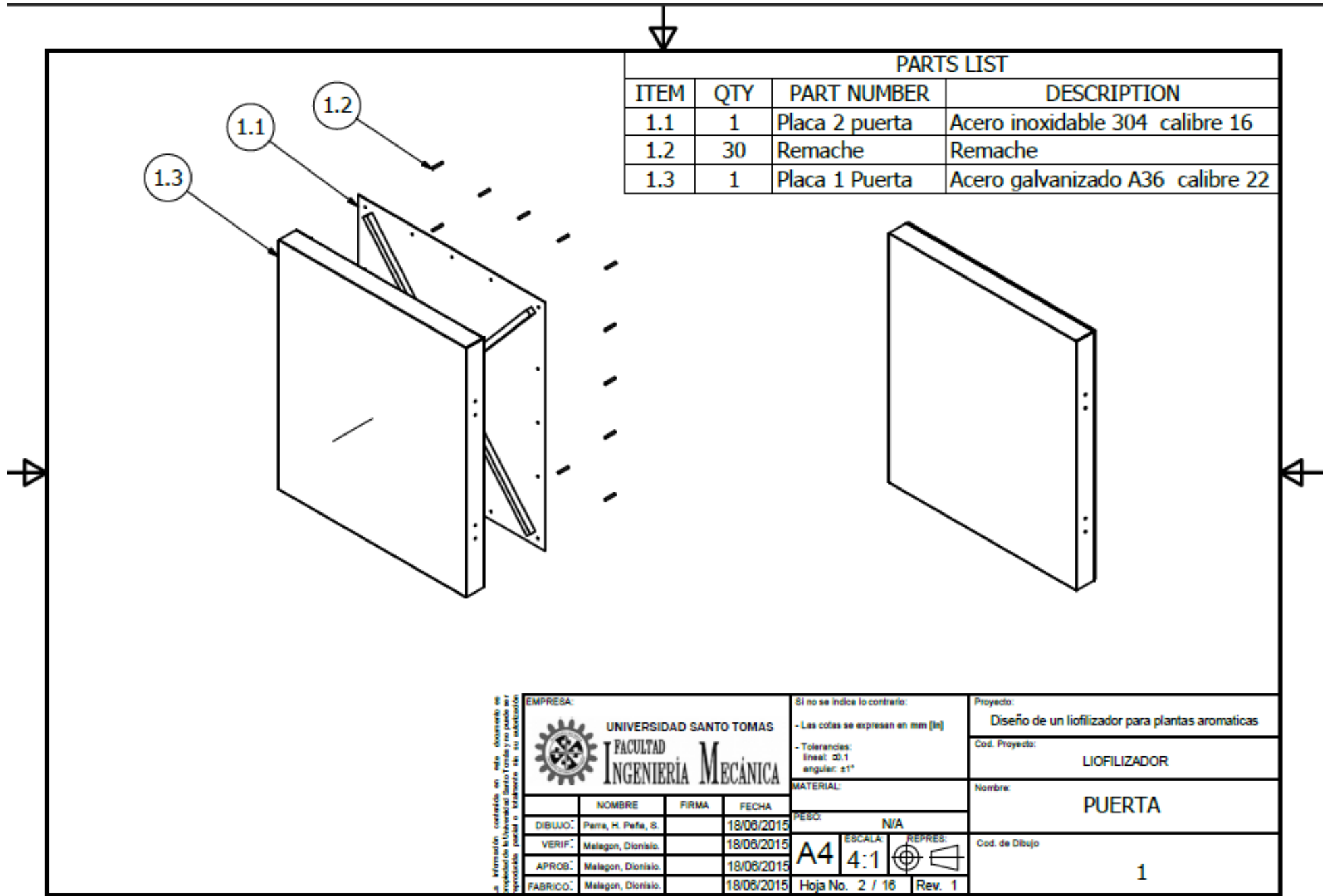
***Anexo 2 PLANOS DE CONSTRUCCIÓN***





Part List			
IDM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPCION
1	1	Puerta	Acero galvanizado AISI calibre 22
2	1	Empuñadura	Caulín rectangular 15mm x 25mm
3	1	Cámara de trabajo	Acero inoxidable AISI calibre 18
4	1	Tapa superior de cámara	Acero galvanizado calibre 22
5	1	Tapa inferior cámara de cámara	Acero galvanizado AISI calibre 22
6	1	Cajón superior	Acero galvanizado AISI calibre 22
7	7	Refrigerador	Condensador 10 mm
8	1	Unidad de refrigeración	TRUCKER TH01-L3020
9	1	Tapa de ventilación	Acero galvanizado AISI calibre 22
10	1	Motor	Acero galvanizado AISI calibre 22
11	1	Carcasa	Acero galvanizado AISI calibre 22
12	1	Tapa inferior cámara de trabajo	Acero galvanizado AISI calibre 22
13	1	Tapa superior Cámara	Acero galvanizado AISI calibre 22

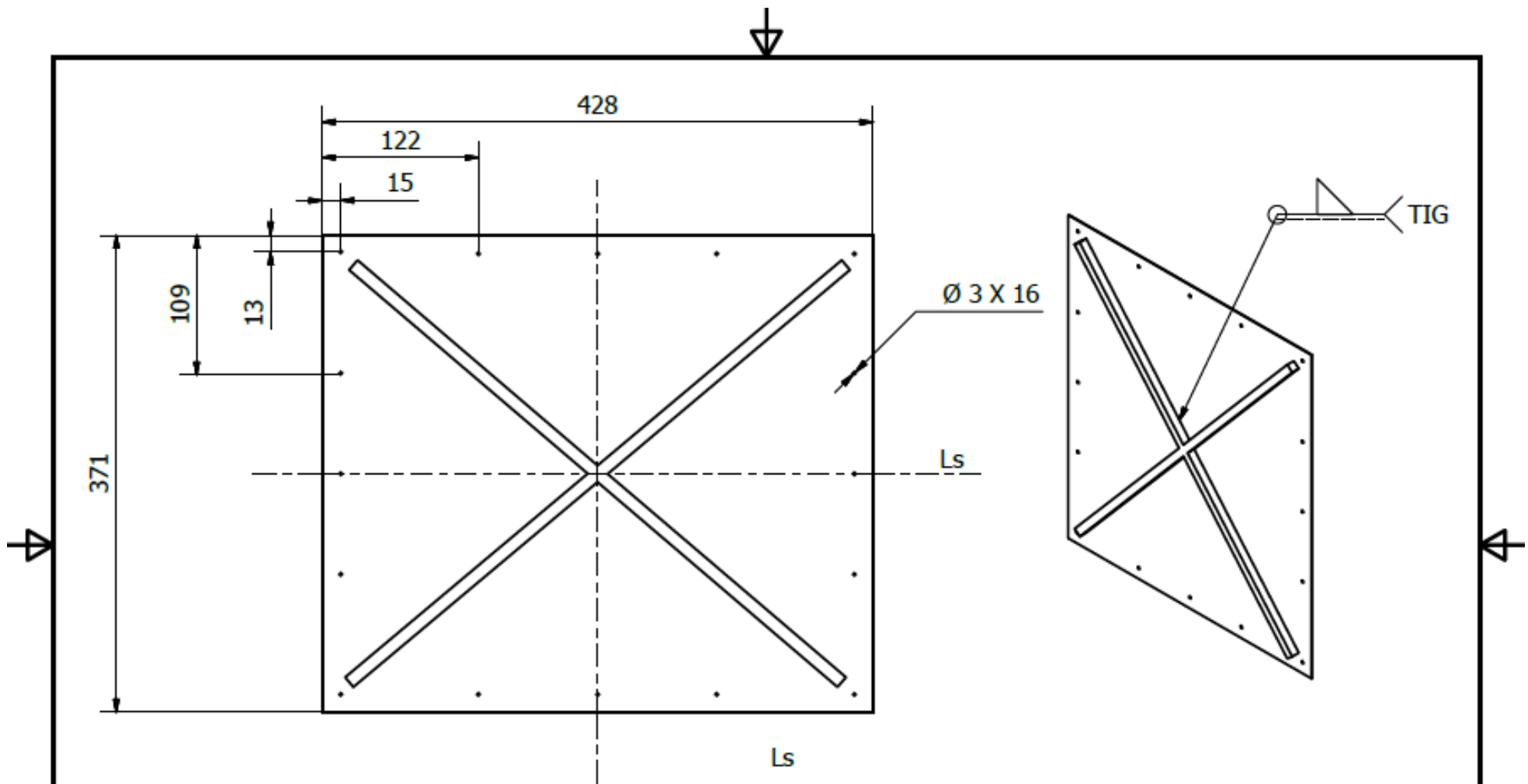
La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin el consentimiento de la Universidad.

EMPRESA:				Si no se indica lo contrario:		Proyecto:	
 UNIVERSIDAD SANTO TOMAS FACULTAD INGENIERIA MECANICA				- Las cotas se expresan en mm [m]		Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas	
				- Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$		Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>	
MATERIAL:				PESO:		Nombre:	
				N/A			
DIBUJO: Parra, H. Peña, S.				18/08/2015		Cod. de Dibujo:	
VERIF.: Malagon, Dionisio.				18/08/2015			
APROB.: Malagon, Dionisio.				18/08/2015			
FABRICO.: Malagon, Dionisio.				18/08/2015			
				A4		ESCALA: 4:1	
				Hoja No. 1 / 16		REPRER: 	
						Rev. 1	




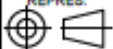
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1.1	1	Placa 2 puerta	Acero inoxidable 304 calibre 16
1.2	30	Remache	Remache
1.3	1	Placa 1 Puerta	Acero galvanizado A36 calibre 22

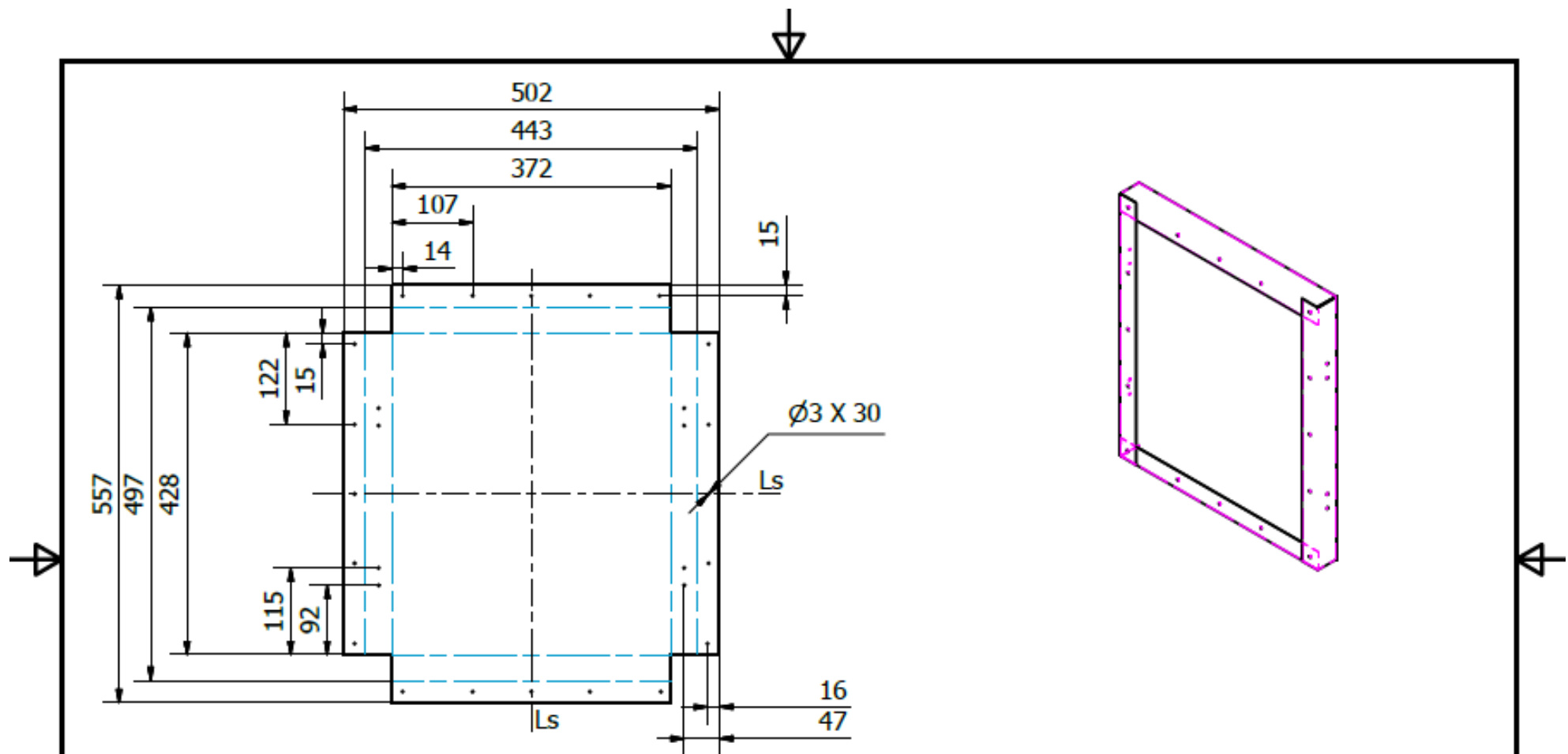
Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm (in) - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°	Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas
				MATERIAL:	Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR
				PESO: N/A	Nombre: PUERTA
	DIBUJO: Perra, H. Pefia, S. 18/08/2015 VERIF.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015 APROB.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015 FABRICO.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015	ESCALA: A4 4:1 REPRES. 	Cod. de Dibujo 1		
				Hoja No. 2 / 16 Rev. 1	





Nota 1: el proceso de construcción es con lamina de acero inoxidable 304 calibre N° 16.

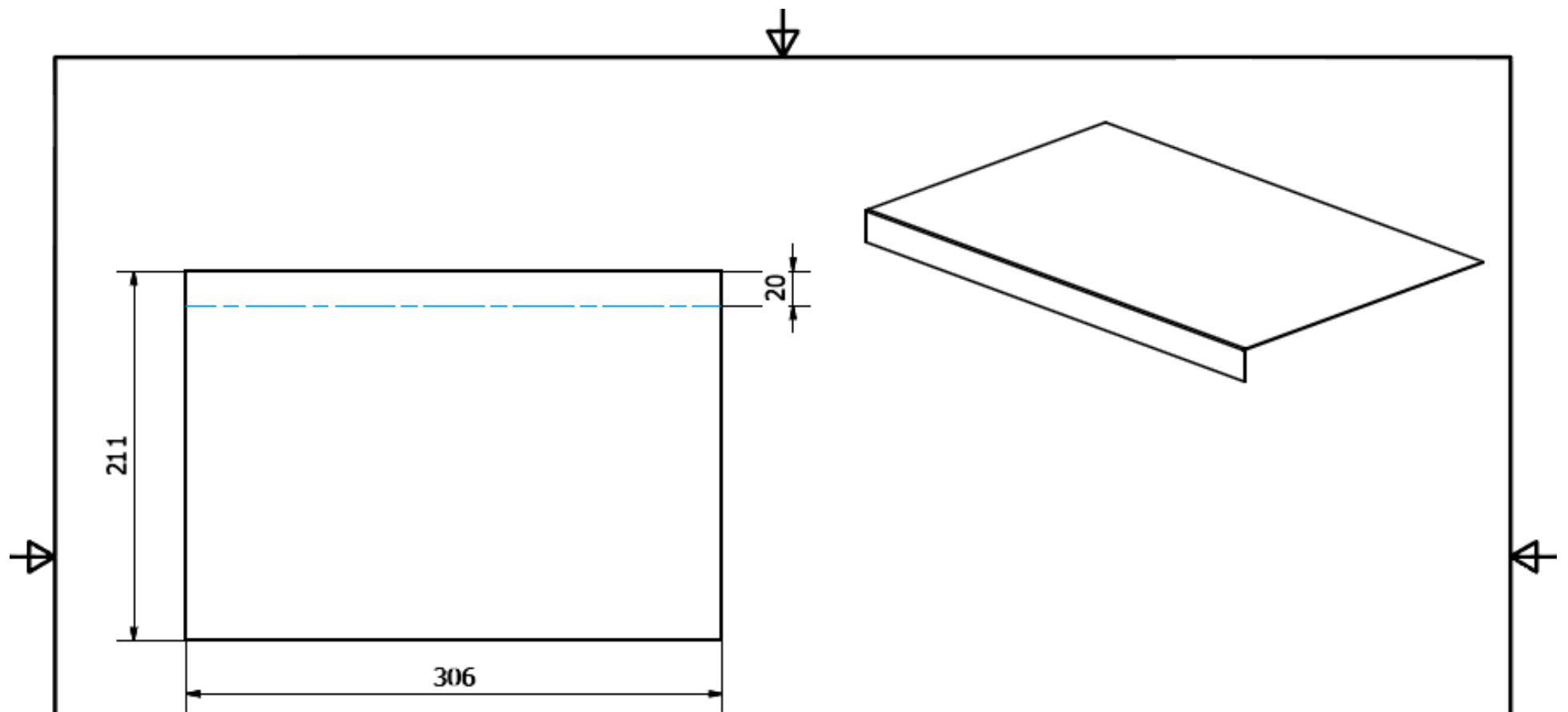
Nota 2: Refuerzos de varilla de perfil 10 mm X 10 mm de 504 mm de longitud, soldados en el centro a 100 grados

Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotes se expresan en mm (js) - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°	Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas
				MATERIAL: Stainless Steel AISI 304	Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR
				PESO: N/A	Nombre: <b>PLACA 2 PUERTA</b>
				ESCALA: <b>A4 4:1</b>	Cod. de Dibujo: <b>1.1</b>
				REPRESENTACIÓN: 	
DIBUJO: Parra, H. Pefa, S. 18/08/2015 VERIF.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015 APROB.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015 FABRICO.: Malagon, Dionisio. 18/08/2015	NOMBRE FIRMA FECHA		Hoja No. 3 / 18 Rev. 1		



Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22

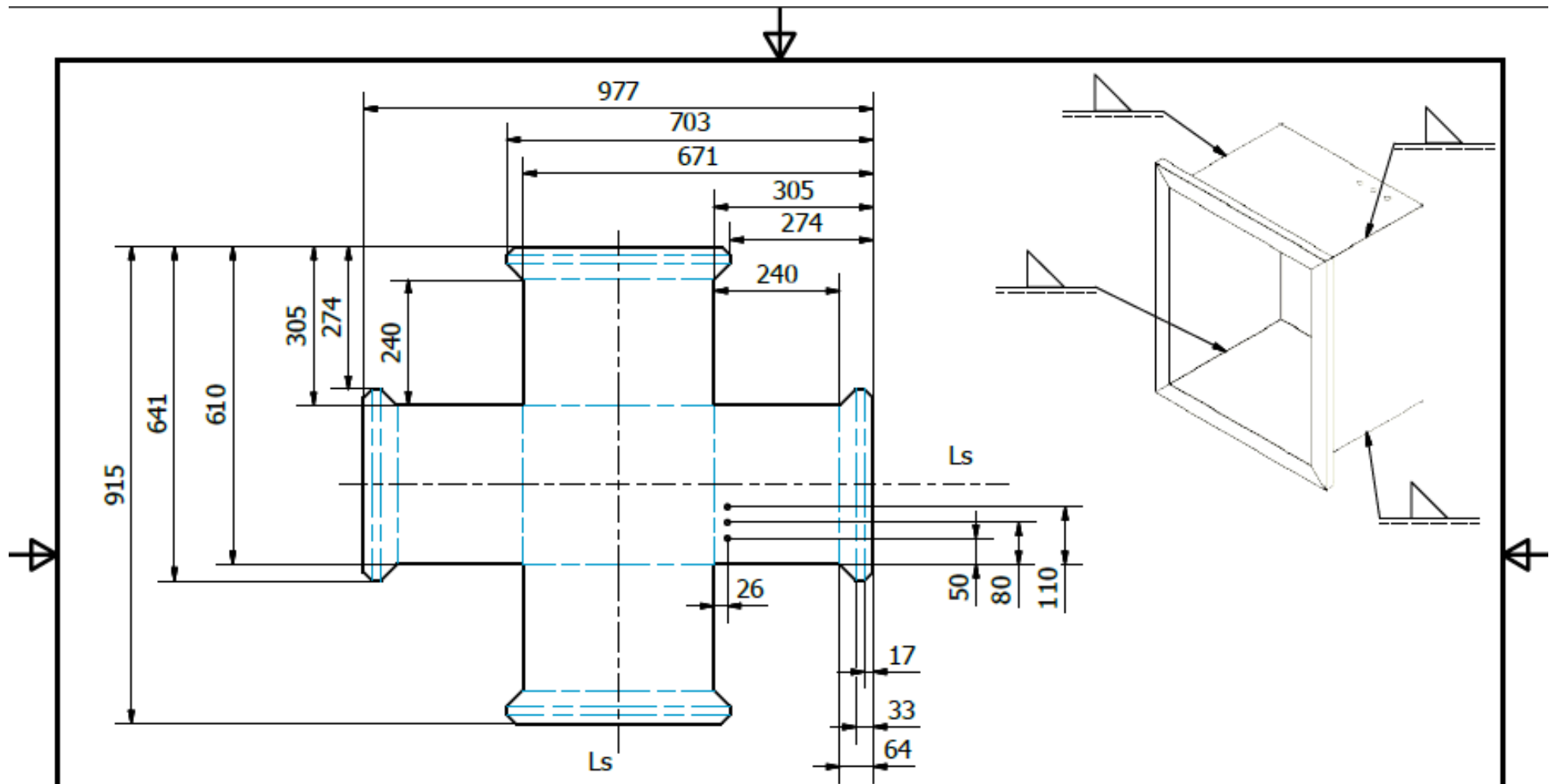
Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin su autorización.	EMPRESA:			Si no se indica lo contrario:		Proyecto:	
	 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA			- Las cotas se expresan en mm (in)		Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas	
				- Tolerancias: lineal: $\pm 0,1$ angular: $\pm 1^\circ$		Cod. Proyecto:	
				MATERIAL: Acero A36 Galvanizado Cal 22		LIOFILIZADOR	
				PESO: 1,032 kg		Nombre:	
			A4		PLACA 1 PUERTA		
			ESCALA: 4:1		Cod. de Dibujo:		
			REPRES: 		1.3		
			Hoja No. 4 / 16		Rev. 1		




Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero inoxidable 304 calibre 16

La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente sin su autorización.

EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm (m) - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>																				
MATERIAL: Acero Inoxidable AISI 304 Cal 22				Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>																					
PESO: <b>N/A</b>				Nombre: <b>PORTA BANDEJA</b>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Parras, H. Peña, S.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF.:</td> <td>Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB.:</td> <td>Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO.:</td> <td>Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Parras, H. Peña, S.		18/08/2015	VERIF.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015	APROB.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015	FABRICO.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015	ESCALA: <b>A4 4:1</b>	REPRER: 
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																						
DIBUJO:	Parras, H. Peña, S.		18/08/2015																						
VERIF.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015																						
APROB.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015																						
FABRICO.:	Malagon, Dionisio		18/08/2015																						
Hoja No. 5 / 16				Rev. 1 Cod. de Dibujo <b>3.1</b>																					



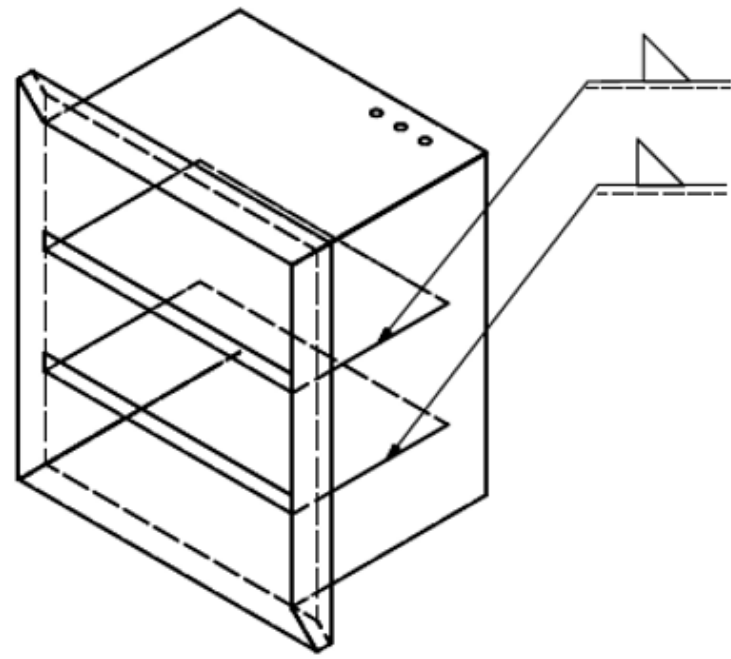
Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero inoxidable 304 calibre 16

Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [kg] - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>
				MATERIAL: Stainless Steel AISI 304	Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>
				PESO: N/A	Nombre: <b>CAMARA DE TRABAJO</b>
	DIBUJO: Parra, H. Peña, S.	FIRMA:	FECHA: 18/08/2015	ESCALA: 4:1	Cod. de Dibujo: <b>3.2</b>
	VERIF: Malagon, Dionisio.	FIRMA:	FECHA: 18/08/2015	REPRESENTACION:	
APROB: Malagon, Dionisio.	FIRMA:	FECHA: 18/08/2015	Hoja No. 6 / 16	Rev. 1	
FABRICO: Malagon, Dionisio.	FIRMA:	FECHA: 18/08/2015			

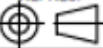


PARTS LIST

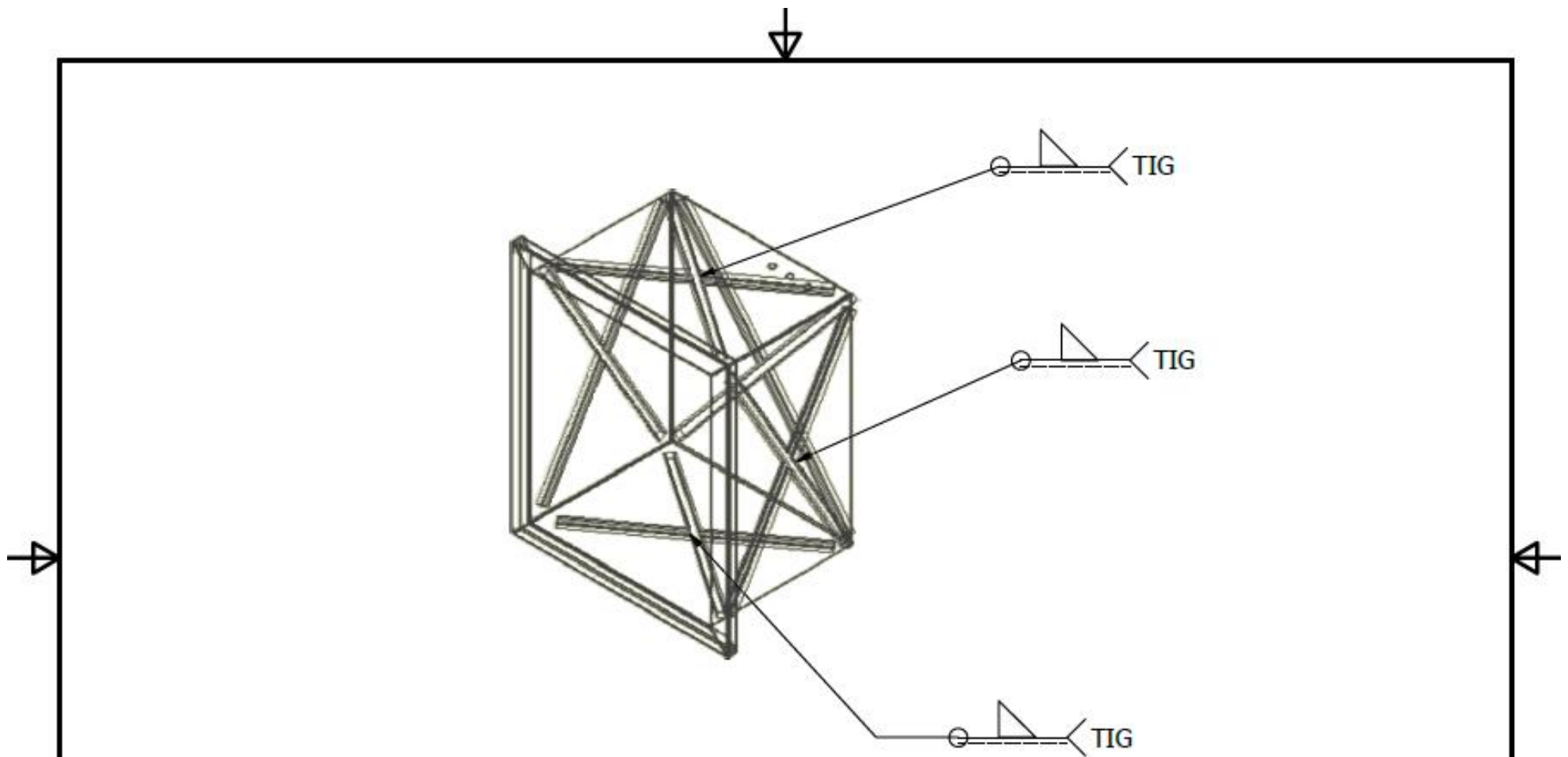
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Camara de trabajo	Acero inoxidable 304 calibre 16
2	2	Porta bandejas	Acero inoxidable 304 calibre 16



\* Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no debe ser reproducida parcial o totalmente sin su consentimiento.

EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°	Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO: Parra, H. Pefe, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO: Parra, H. Pefe, S.		18/06/2015	VERIF: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	APROB: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	MATERIAL:  PESO: N/A	Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR
NOMBRE	FIRMA	FECHA																	
DIBUJO: Parra, H. Pefe, S.		18/06/2015																	
VERIF: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																	
APROB: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																	
FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																	
			Nombre:  Cod. de Dibujo:	3															
			A4 ESCALA: 4:1 REPRES: 	Hoja No. 7 / 16 Rev. 1															





Nota1: Refuerzo de perfil 10mm X 10 mm

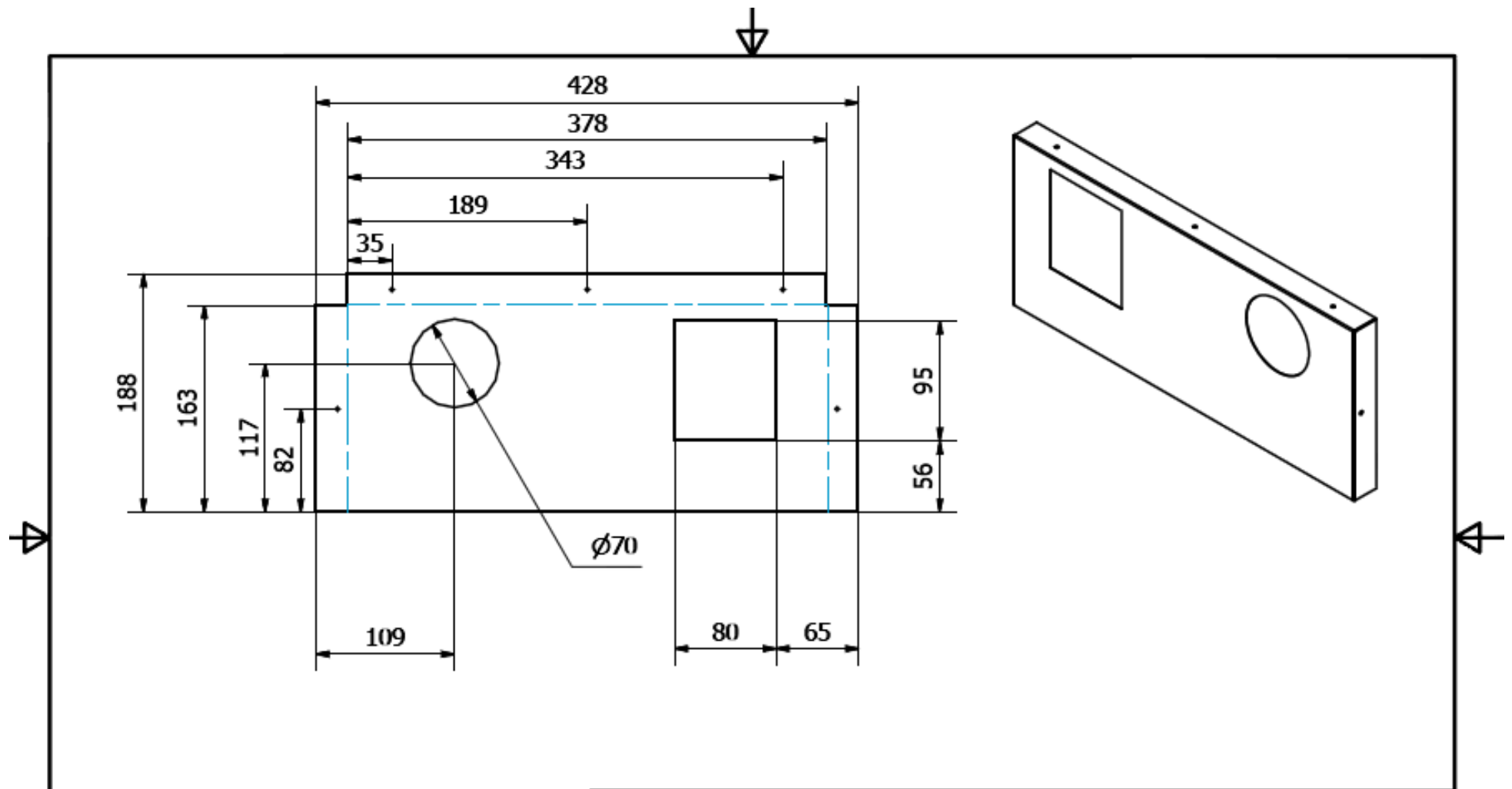
Nota2: 2 de longitud 480 soldados en el centro a 80 grados

Nota3: 2 de longitud 390 soldados en el centro a 62 grados

Nota4: 2 de longitud 340 soldados en el centro a 70 grados

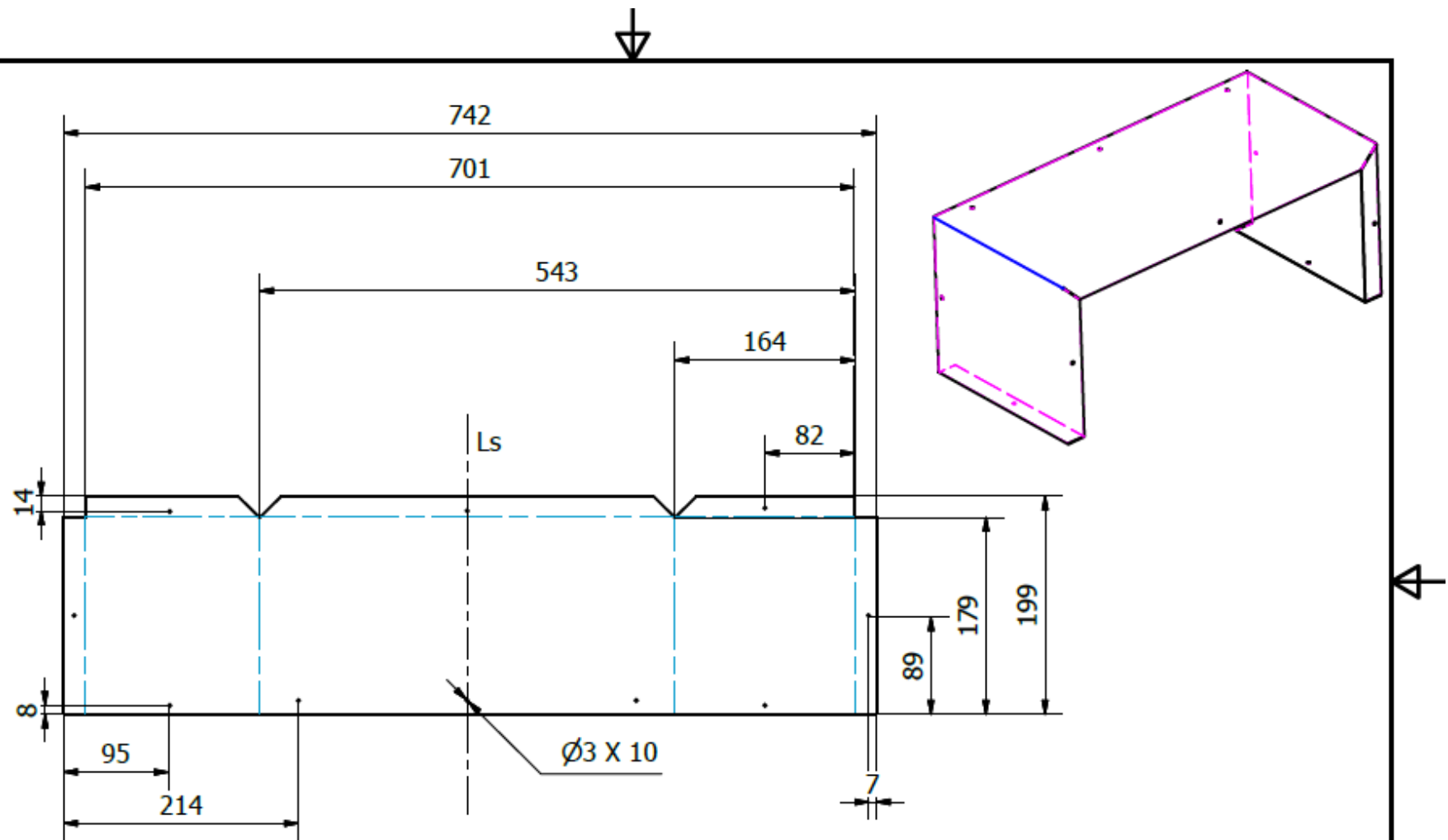
La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización.

EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm (lg) - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°	Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO: Parra, H. Peña, S.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO: Parra, H. Peña, S.		18/08/2015	VERIF: Malagon, Dionisio.		18/08/2015	APROB: Malagon, Dionisio.		18/08/2015	FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/08/2015	MATERIAL: Stainless Steel AISI 304	Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>
NOMBRE	FIRMA	FECHA																		
DIBUJO: Parra, H. Peña, S.		18/08/2015																		
VERIF: Malagon, Dionisio.		18/08/2015																		
APROB: Malagon, Dionisio.		18/08/2015																		
FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/08/2015																		
PESO: <b>9,444 kg</b>				Nombre:																
<b>A4</b> ESCALA: <b>4:1</b> REPRESENTACION: 				Cod. de Dibujo:																
Hoja No. 8 / 18				Rev. 1																



Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22

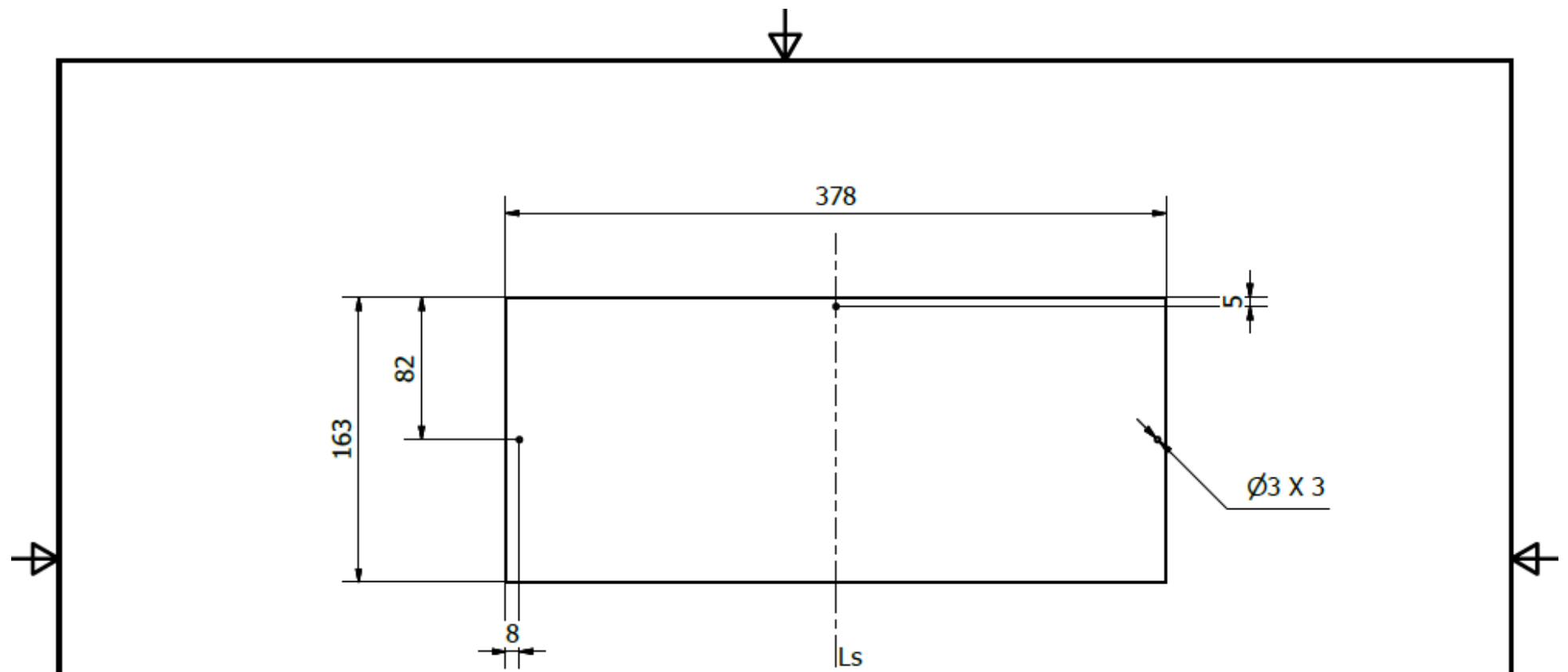
Información controlada en este documento en representación de la Universidad Santo Tomás por el Departamento de Ingeniería Mecánica.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°		Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>																
	MATERIAL: Acero A36 Galvanizado Cal 22			PESO: <b>0,267 kg</b>		Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO: Perra, H. Peña, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF: Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB: Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO: Malagon, Dionisio</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO: Perra, H. Peña, S.		18/06/2015	VERIF: Malagon, Dionisio		18/06/2015	APROB: Malagon, Dionisio		18/06/2015	FABRICO: Malagon, Dionisio		18/06/2015	Nombre: <b>TAPA CAJON DE SENSORES</b>		Cod. de Dibujo: <b>5</b>	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																			
	DIBUJO: Perra, H. Peña, S.		18/06/2015																			
VERIF: Malagon, Dionisio		18/06/2015																				
APROB: Malagon, Dionisio		18/06/2015																				
FABRICO: Malagon, Dionisio		18/06/2015																				
Hoja No. 9 / 16			ESCALA: <b>4:1</b>		REPRER: 																	
Rev. 1			Hoja No. 9 / 16		Rev. 1																	



Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22

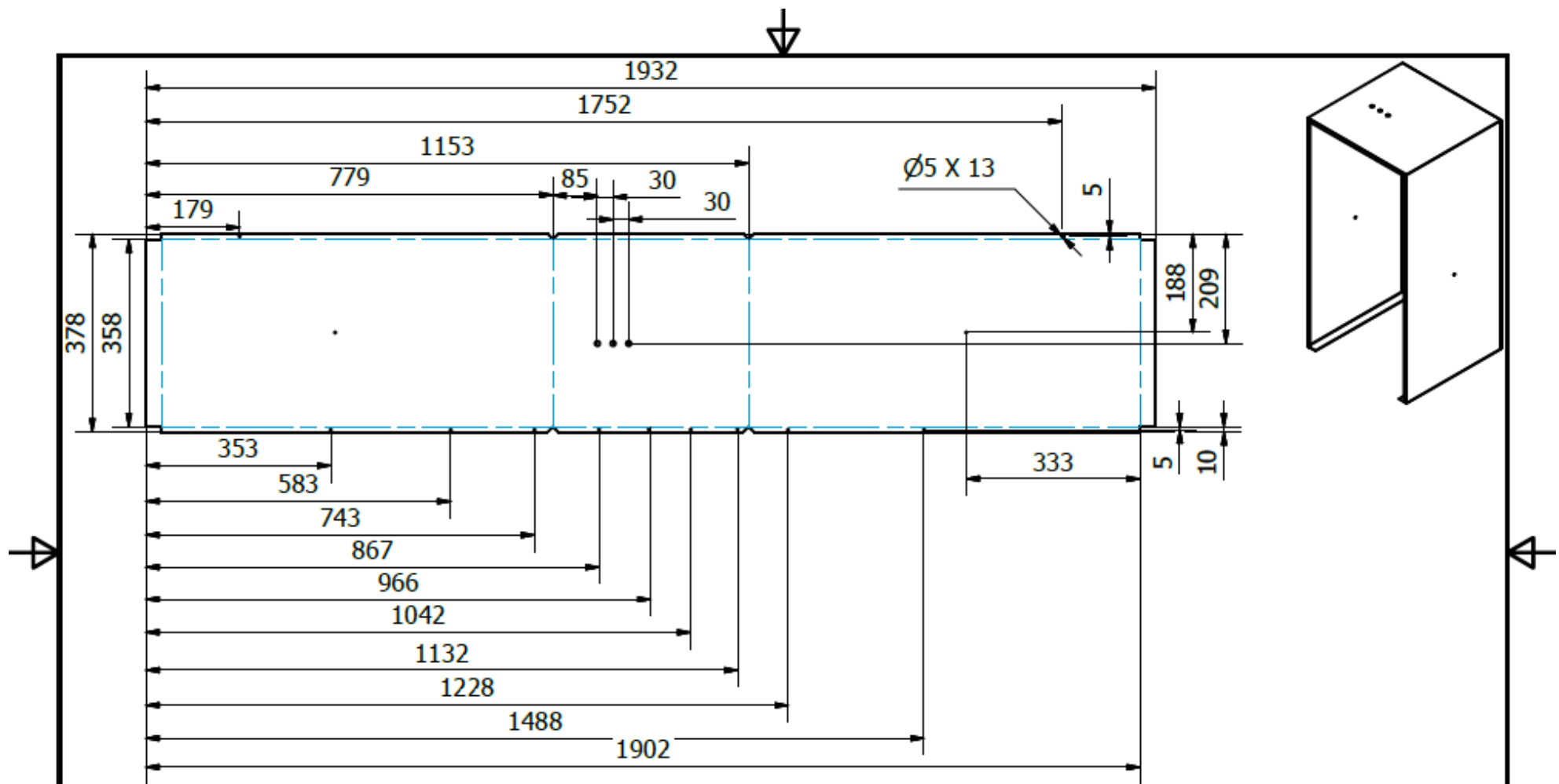
La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin su autorización.

EMPRESA:				Si no se indica lo contrario:		Proyecto:																					
				- Las cotas se expresan en mm [in]		Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas																					
				- Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°		Cod. Proyecto:																					
				MATERIAL:		LIOFILIZADOR																					
				Acero A36 Galvanizado Cal 22		Nombre:																					
				PESO: 0,574 kg		CARCASA CAJON DE SENSORES																					
				A4 ESCALA: 4:1		Cod. de Dibujo																					
				REPRES:		7																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Parró, H. Pefía, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Parró, H. Pefía, S.		18/06/2015	VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	APROB:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	Hoja No. 9 / 15		Rev. 1	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																								
DIBUJO:	Parró, H. Pefía, S.		18/06/2015																								
VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																								
APROB:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																								
FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																								



Nota: el proceso de construcción es con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22

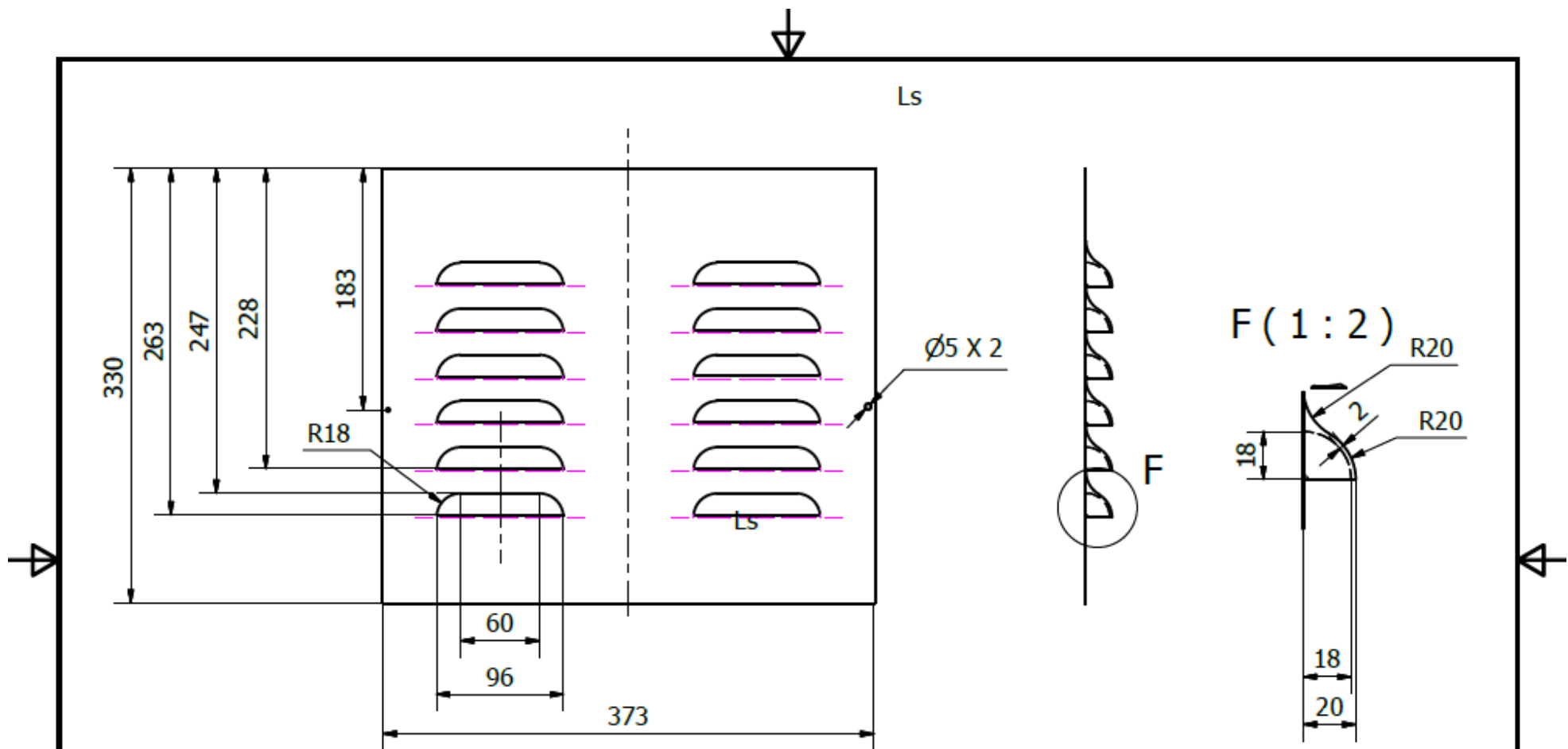
Toda información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, parcial o totalmente, sin su autorización.	EMPRESA:			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromaticas																				
	 UNIVERSIDAD SANTO TOMAS FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA				Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR																				
	MATERIAL: Acero A36 Galvanizado Cal 22			PESO: 0,242 kg	Nombre: TAPA TRASERA CAJON DE SENSORES																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Parra, H. Peño, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Parra, H. Peño, S.		18/06/2015	VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	ESCALA: <b>A4 4:1</b>	Cod. de Dibujo 6
		NOMBRE	FIRMA	FECHA																					
DIBUJO:	Parra, H. Peño, S.		18/06/2015																						
VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																						
APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																						
FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																						
			Hoja No. 10 / 15	REPRES: 	Rev. 1																				



Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22

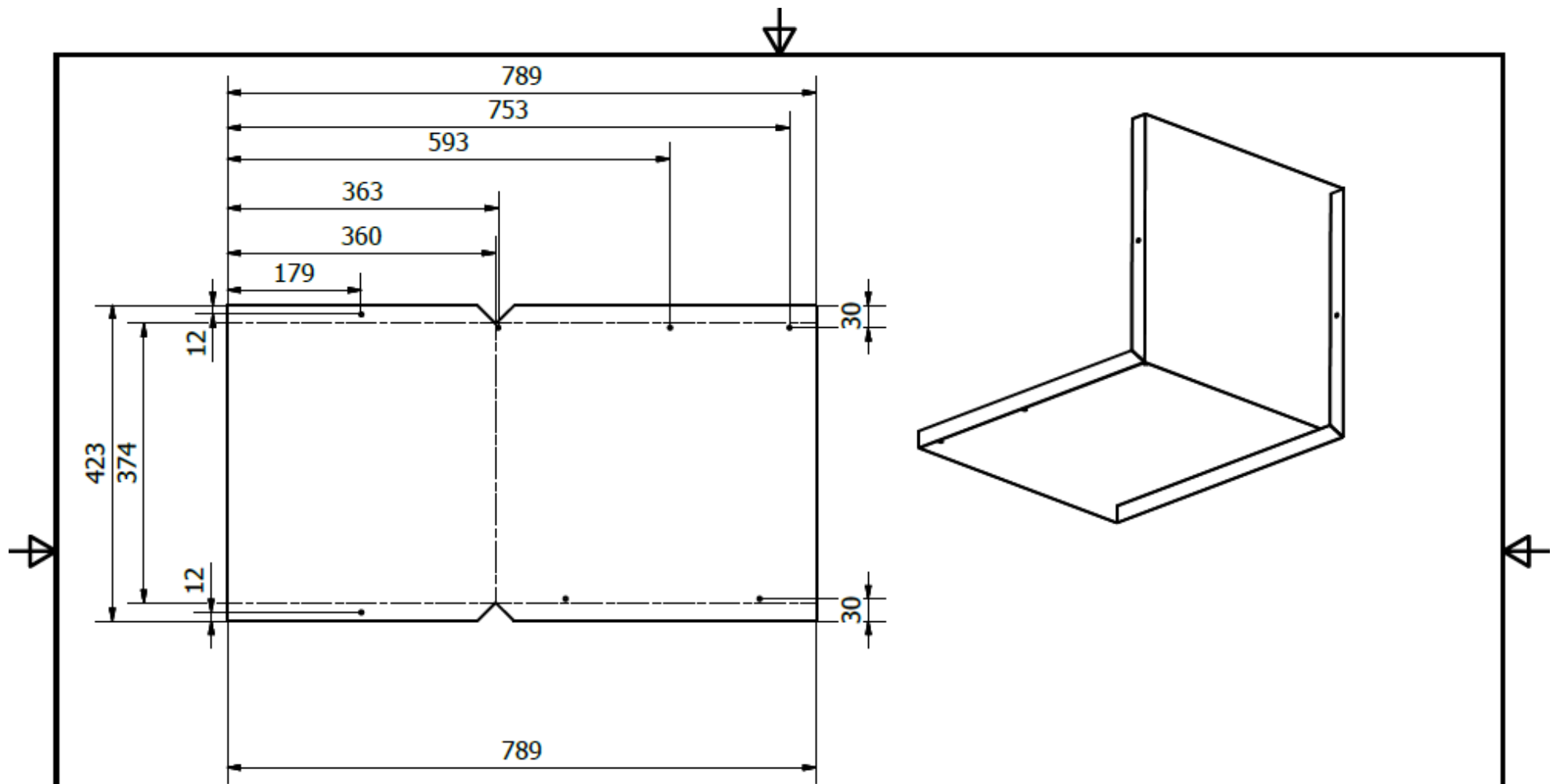
Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, parcial o totalmente, sin su autorización.	EMPRESA:			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm (in) - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$		Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas																					
	 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA			MATERIAL:		Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR																					
				Acero A36 Galvanizado Cal 22		Nombre: CARCASA																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Farra, H. Pefia, S.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Farra, H. Pefia, S.		18/08/2015	VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	PESO: 2.865 kg		Cod. de Dibujo: 12	
		NOMBRE	FIRMA	FECHA																							
DIBUJO:	Farra, H. Pefia, S.		18/08/2015																								
VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
			ESCALA: A4 4:1		REPRESENTACION: 																						
			Hoja No. 11 / 15		Rev. 1																						




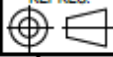


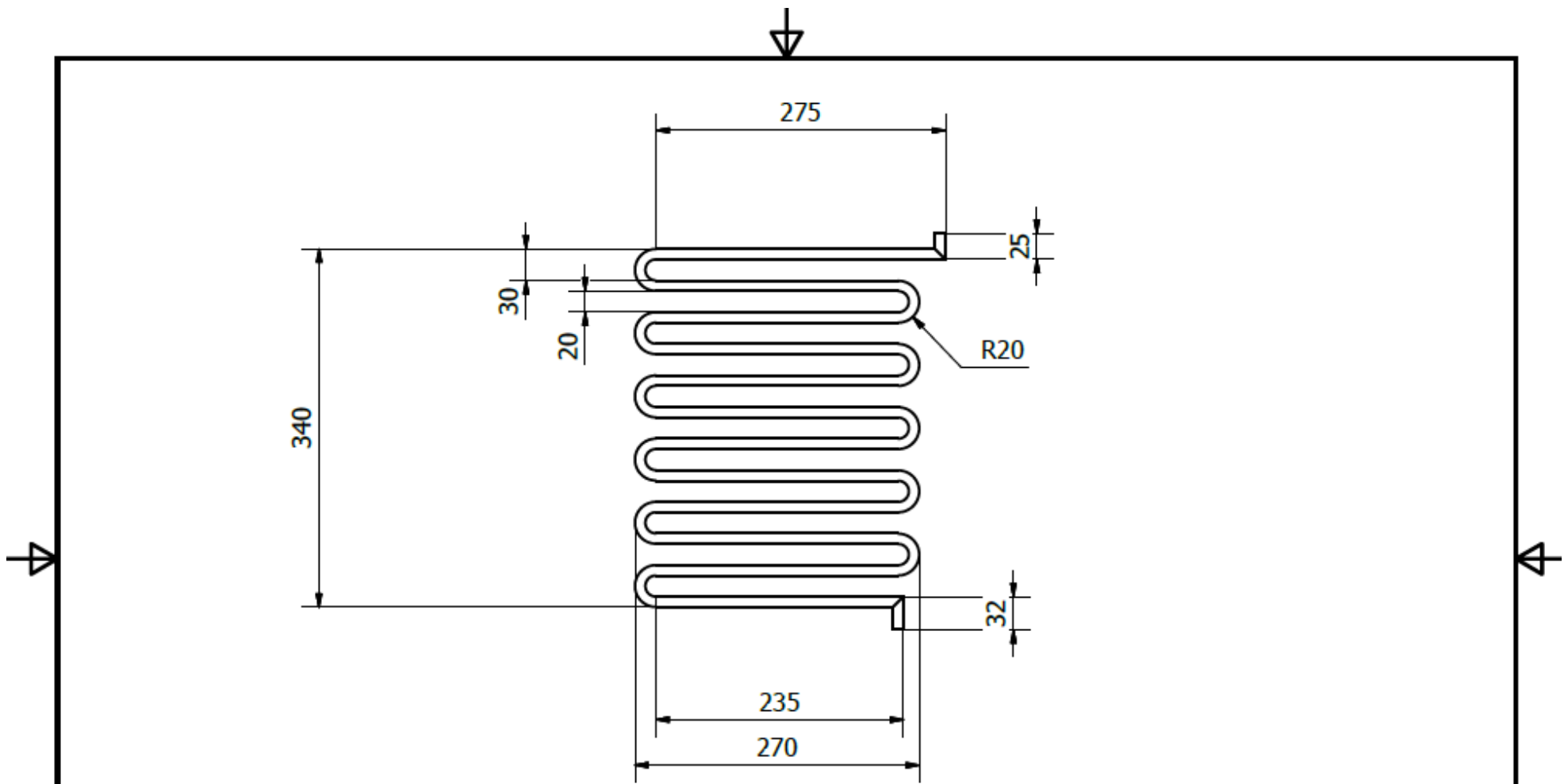
Nota: el proceso de construcción es por doblado,  
 con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22  
 Nota 2: Procedimiento de troquelado

EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm (in) - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°		Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas																					
				MATERIAL: Acero A36 Galvanizado Cal 22		Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Ferra, H. Pefa, S.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Ferra, H. Pefa, S.		18/08/2015	VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	APROB:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	PESO: 1,343 kg		Nombre: TAPA DE VENTILACION	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																								
DIBUJO:	Ferra, H. Pefa, S.		18/08/2015																								
VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
APROB:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																								
A4 4:1				ESCALA: 4:1		Cod. de Dibujo: 10																					
Hoja No. 13 / 15				REPRESENTACIÓN: 		Rev. 1																					


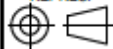


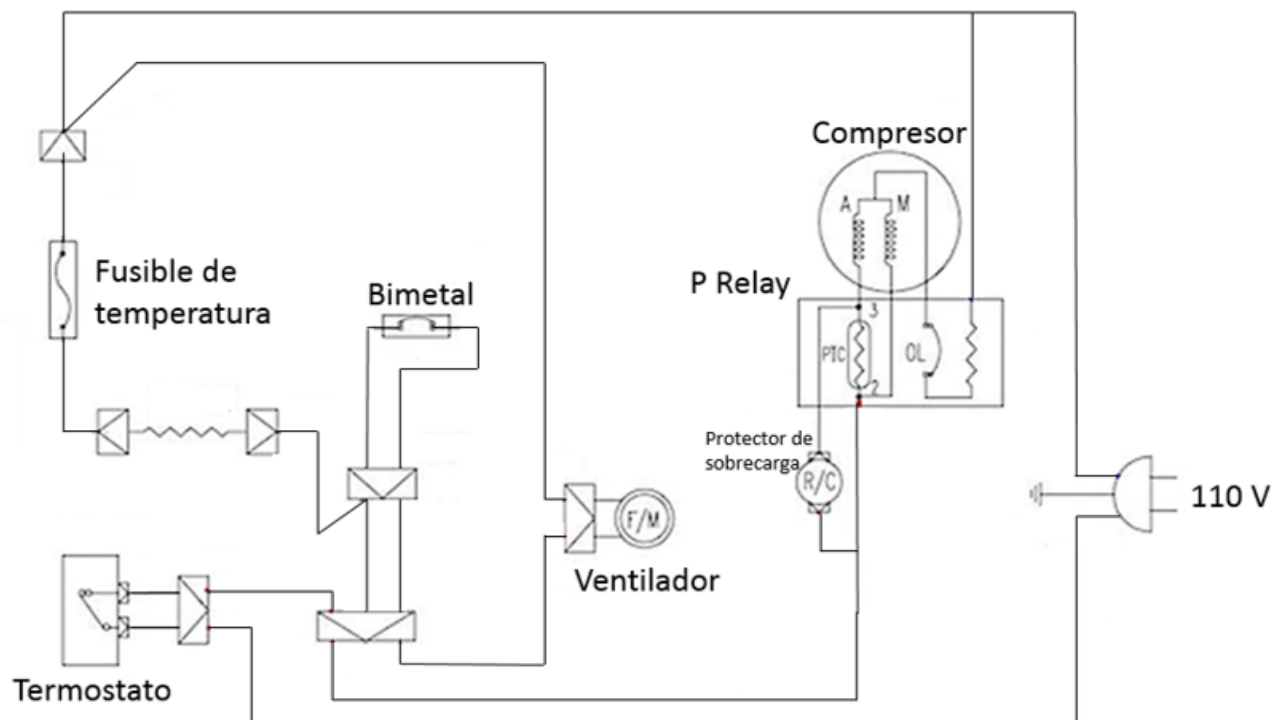
Nota: el proceso de construcción es por doblado, con lamina de acero A36 galvanizada calibre N° 22


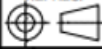
Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, parcial o totalmente, sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: ±0,1 angular: ±1°		Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Parras, H. Pefia, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO.:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Parras, H. Pefia, S.		18/06/2015	VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015	MATERIAL: Acero A36 Galvanizado Cal 22		Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR	
		NOMBRE	FIRMA	FECHA																							
	DIBUJO:	Parras, H. Pefia, S.		18/06/2015																							
	VERIF.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																							
APROB.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																								
FABRICO.:	Malagon, Dionisio.		18/06/2015																								
			PESO: N/A		Nombre: TAPA TRASERA CAMARA DE TRABAJO																						
			ESCALA: 4:1 REPRESENTACION: 		Cod. de Dibujo: 13																						
			Hoja No. 14 / 15 Rev. 1																								



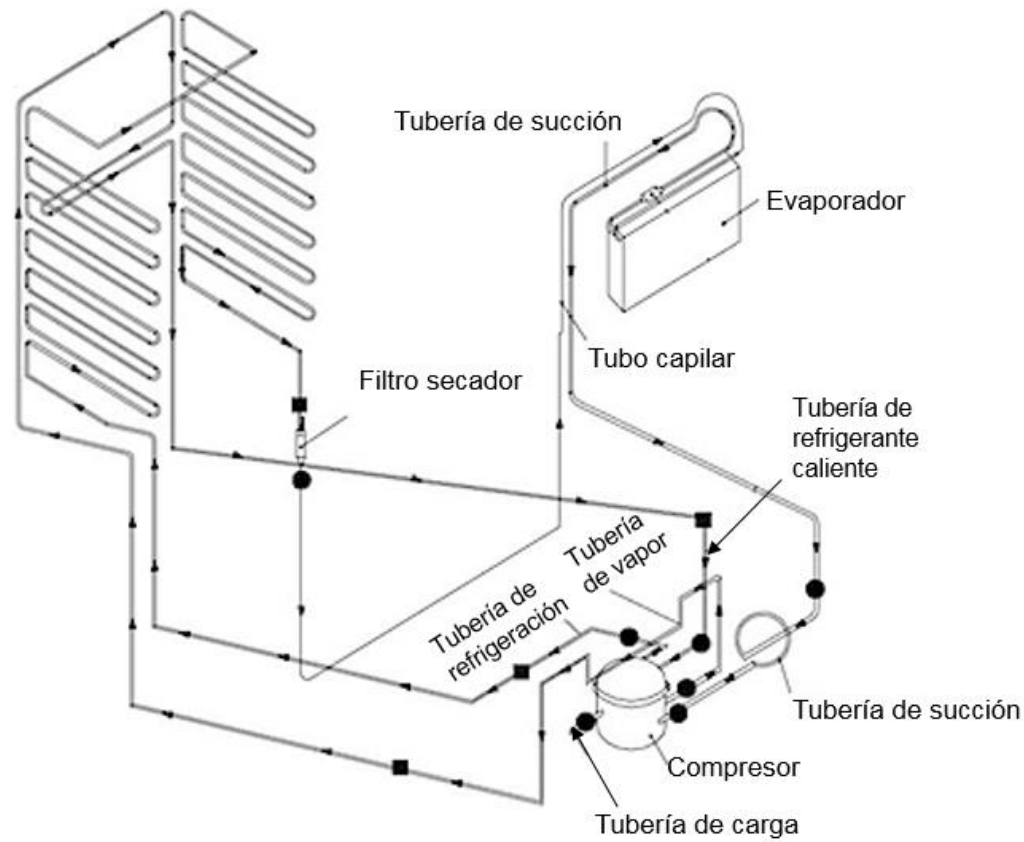
Nota: el proceso de construcción es con tubería de cobre Ø 10 mm schedule 40 doblada.

Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: ±0.1 angular: ±1°		Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas	
				MATERIAL: Copper, Alloy		Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR	
				PESO: N/A		Nombre:	
				A4 ESCALA: 4:1 REPRES: 		Cod. de Dibujo 7	
				Hoja No. 15 / 15 Rev. 1			
DIBUJO: Parra, H. Peña, S.	FIRMA:	FECHA: 18/06/2015					
VERIF.: Malagon, Dionisio.		18/06/2015					
APROB.: Malagon, Dionisio.		18/06/2015					
FABRICO.: Malagon, Dionisio.		18/06/2015					



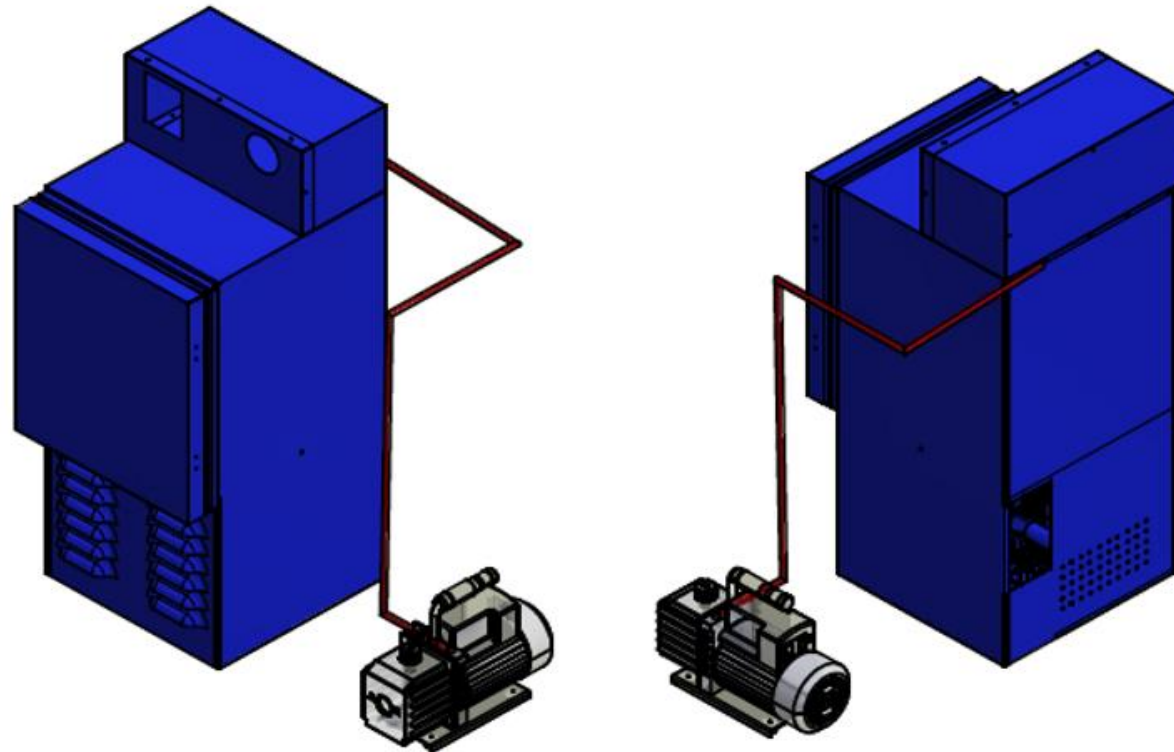
La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas															
	MATERIAL:			PESO:	Cod. Proyecto: LIOFILIZADOR															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO: Parra, H. Peña, S.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO: Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/06/2015</td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO: Parra, H. Peña, S.		18/06/2015	VERIF: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	APROB: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/06/2015	NOMBRE: <b>Circuito electrónico</b>	Nombre: <b>Circuito electrónico</b>
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																	
	DIBUJO: Parra, H. Peña, S.		18/06/2015																	
VERIF: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																		
APROB: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																		
FABRICO: Malagon, Dionisio.		18/06/2015																		
ESCALA: <b>A4</b> <b>4:1</b> REPRES: 			Hoja No. 5 / 16    Rev. 1	Cod. de Dibujo																

Anexo 3 Esquema de refrigeración.



La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida, total o parcialmente, sin su autorización.	EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA</b>			Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: $\pm 0,1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>
				MATERIAL: 	Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>
				PESO: 	Nombre: <b>ESQUEMA DE REFRIGERACION</b>
				ESCALA: <b>A4 4:1</b>	Cod. de Dibujo 
				REPRESENTACION: 	
FABRICO: Malagon, Dionisio. 18/06/2015			Hoja No. 5 / 16	Rev. 1	
DIBUJO: Parra, H. Peña, S. 18/06/2015					
VERIF: Malagon, Dionisio. 18/06/2015					
APROB: Malagon, Dionisio. 18/06/2015					

Anexo 4 Esquema de conexión de vacío.



Información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida total o parcialmente sin su autorización.

EMPRESA:  <b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS</b> <b>FACULTAD INGENIERIA MECÁNICA</b>				Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en mm [in] - Tolerancias: lineal: $\pm 0.1$ angular: $\pm 1^\circ$	Proyecto: <b>Diseño de un liofilizador para plantas aromáticas</b>																				
MATERIAL:				Cod. Proyecto: <b>LIOFILIZADOR</b>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJO:</td> <td>Parra, H. Pefe, S.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>VERIF:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>APROB:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> <tr> <td>FABRICO:</td> <td>Malagon, Dionisio.</td> <td></td> <td>18/08/2015</td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJO:	Parra, H. Pefe, S.		18/08/2015	VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	APROB:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015	Nombre: <b>Esquema conexión de vacío</b>	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																						
DIBUJO:	Parra, H. Pefe, S.		18/08/2015																						
VERIF:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																						
APROB:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																						
FABRICO:	Malagon, Dionisio.		18/08/2015																						
PESO: N/A				Escala: <b>A4 4:1</b>	Cod. de Dibujo:																				
Hoja No. 17 / 17				REPRESENTACION: 	Rev. 1																				

***Anexo 5 Capacidad del compresor para R404a***

<b>CAE2417Z</b>	<b>Tension A : 100V 1~ 50 Hz / 115V 1~ 60 Hz</b>	<b>R404A</b>	<b>N°123ES-A</b>	<b>Ind c</b>
-----------------	--	--------------	------------------	--------------

Les performances sont données dans les conditions **Standard TE** :      Gaz aspirés :      32°C  
Temp. liquide :      32°C

The performance data are in **Standard TE conditions** :      Return gas :      32°C  
Liquid Temp. :      32°C

**50 Hz R404A**

4   T condensation	5   T évaporation (°C)		<b>-40</b>	<b>-35</b>	<b>-30</b>	<b>-25</b>	<b>-20</b>	<b>-15</b>	<b>-10</b>
<b>40</b>	1   P frigorifique (W)			213	341	484	641	813	999
	2   P absorbée (W)			264	321	374	421	465	503
	3   I absorbée (A)			4.96	5.29	5.65	6.02	6.42	6.84
<b>50</b>	1   P frigorifique (W)				296	430	579	744	924
	2   P absorbée (W)				314	379	440	497	551
	3   I absorbée (A)				5.34	5.78	6.24	6.69	7.16
<b>55</b>	1   P frigorifique (W)				273	403	548	709	886
	2   P absorbée (W)				310	381	449	514	575
	3   I absorbée (A)				5.36	5.85	6.34	6.83	7.33
<b>60</b>	1   P frigorifique (W)					376	517	675	848
	2   P absorbée (W)					384	458	530	599
	3   I absorbée (A)					5.92	6.45	6.97	7.49

**60 Hz R404A**

4   T condensation	5   T évaporation (°C)		<b>-40</b>	<b>-35</b>	<b>-30</b>	<b>-25</b>	<b>-20</b>	<b>-15</b>	<b>-10</b>
<b>40</b>	1   P frigorifique (W)			253	407	575	758	955	1167
	2   P absorbée (W)			357	400	446	496	550	607
	3   I absorbée (A)			5.34	5.52	5.77	6.09	6.48	6.94
<b>50</b>	1   P frigorifique (W)				353	511	685	874	1080
	2   P absorbée (W)				390	453	519	588	659
	3   I absorbée (A)				5.57	5.91	6.31	6.76	7.26
<b>55</b>	1   P frigorifique (W)				326	478	648	834	1036
	2   P absorbée (W)				385	457	530	607	685
	3   I absorbée (A)				5.6	5.98	6.42	6.89	7.41
<b>60</b>	1   P frigorifique (W)					446	611	793	992
	2   P absorbée (W)					460	542	626	711
	3   I absorbée (A)					6.05	6.53	7.03	7.58

1 = refrigerating capacity      2 = watt input      3 = current      4 = condensing temperature      5 = evaporating temperature

Nota : Les caractéristiques données dans cette fiche technique peuvent évoluer sans avis préalable, avec les améliorations que "TECUMSEH EUROPE" entend toujours apporter à sa production.

Note : "TECUMSEH EUROPE", in a constant endeavour to improve its products reserves the right to change any information contained in this leaflet without prior warning.

***Anexo 6 Especificaciones del compresor***

Compresseur / Compressor  
Code tension / Voltage code : A

**CAE2417Z**

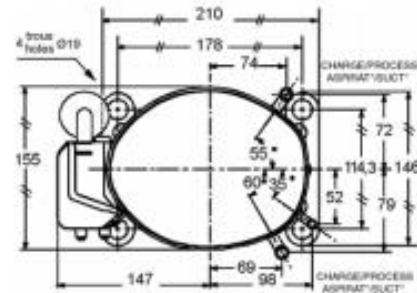
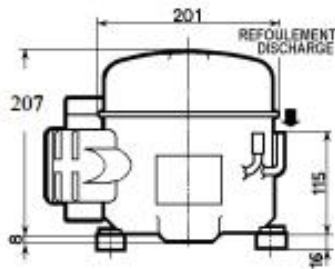
Froid commercial négatif (BP)  
Low back pressure commercial application

100-115V / 50-60Hz - 1~

R404A

N° 123ES-A - ind c

Conditions Conditions	fréquence frequency	Prod frigorifique nominale / nominal refrigerating capacity			Puis. sonore Sound level
		Watts	Kcal/h	BTU/h	
Standard	50 Hz	454	390	1548	ISO 3745 / ISO 3743-1
Standard	60 Hz	538	463	1835	
Cecomaf	50 Hz	301			55 dBA
Cecomaf	60 Hz	357			



Cylindrée / Displacement : 11.3 cm<sup>3</sup>  
 Poids net / Net weight : 12.3 Kg  
 Charge en huile / Oil charge : 350 cm<sup>3</sup>  
 Type d'huile / Oil type : P.O.E /  
 Détente / Expansion device : Capillaire/Détendeur  
 Capillary/Exp<sup>o</sup> valve  
 Refroidissement / Cooling : Ventilé / Forced

Résistance à 20° C / Windings resistances at 20° C  
 Phase princ. / Main Winding : 0.9 Ohms  
 aux. / Auxiliary Winding : 3.7 Ohms

Intensité / Current  
 nom. / Rated current RLA : 5.9 / 5.8 A  
 max. / Max current : 10.1 / 10.6 A  
 dém. / Start current LRA : 35 / 40 A

Ap. Electrique / Electrical equipment : CSIR

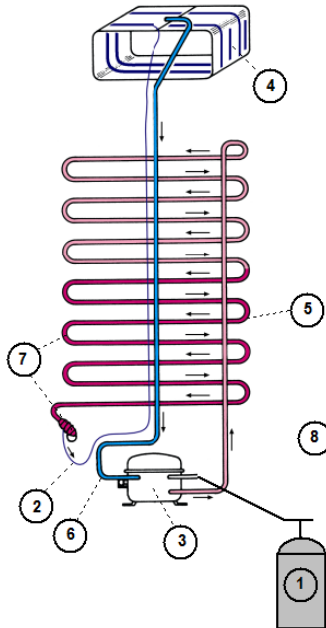
Protecteur / Overload : MST16AHN  
 Temporisation / Time Check : 2.8s - 5.2s / 30 A  
 T° ouverture / Opening temp. : 120° C  
 fermeture / Closing temp. : 69° C  
 Option / optional :

Relais Intensité / Current relay : 501-96186H  
 enclenchement / Pick up : 19.60A  
 déclenchement / Drop out : 16.40A  
 Option / optional : MTRPH66

Condensateur dém. / Start capacitor : 315 µF / 160 V

***Anexo 7 Cálculo del tubo capilar utilizando CAP TUBE***

## DATOS DE ENTRADA



1 - REFRIGERANTE R404A ▾

2 - DIÁMETRO INTERNO DEL TUBO CAPILAR 0,8 mm ▾

3 - CARGA TÉRMICA DEL SIST. DE REFRIGERACIÓN 1500 Btu/h ▾

4 - TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN -35

5 - TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN 34

6 - TEMPERATURA DE SUCCIÓN 20 °C ▾

7 - GRADO DE SUBENFRIAMIENTO 4

8 - TEMPERATURA AMBIENTE 25

UNIDAD DE PRESIÓN  
psig ▾

UNIDAD DE LARGO  
m ▾

Calcular

Resultados

Ayuda

Menú Principal

## RESULTADOS

REFRIGERANTE	R404A
--------------	-------

CARGA TÉRMICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	1500	Btu/h
--	------	-------

TEMPERATURAS		
EVAPORACIÓN	-35	°C
CONDENSACIÓN	34	°C
LÍNEA DE SUCCIÓN	20	°C
SUBENFRIAMIENTO	4	°C
AMBIENTE	25	°C

PRESIONES		
EVAPORACIÓN	9,693	psig
CONDENSACIÓN	213,9	psig

TUBO CAPILAR SUGERIDO		
LARGO	0,7994	m
DIÁMETRO INTERNO	0,8	mm

--	--	--

***Anexo 8 Encuesta panel sensorial***

# Panel sensorial aromáticas

Nombre del encuestado:

Califique de 0 a 5 la intensidad del sabor de las tres opciones A, B y C

donde 0 es lo mas bajo y 5 lo mas alto

	0	1	2	3	4	5
A	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Califique de 0 a 5 la intensidad del olor de las tres opciones A, B y C

donde 0 es lo mas bajo y 5 lo mas alto

	0	1	2	3	4	5
A	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Califique de 0 a 5 la intensidad del color de las tres opciones A, B y C

donde 0 es lo mas bajo y 5 lo mas alto

	0	1	2	3	4	5
A	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

***Anexo 9 Manual de funcionamiento***

## Manual de funcionamiento

Los pasos para lograr un proceso éxito de liofilización son:

1. Acomodar el producto en las bandejas, cualquiera que sea el producto debe ser colocado en las bandejas en una capa delgada y pareja para asegurar un proceso de deshidratado uniforme de alta calidad y evitar residuos de agua, especialmente en productos grandes que en muchos casos se recomienda procesarlos, es decir partirlos en pedazos más pequeños.
2. Introducir las bandejas con el producto en la cámara de trabajo, acomodándolas de tal modo que se aproveche al máximo la capacidad de la cámara y cerrar la puerta, asegurándola con los cuatro manijas de picaporte que se encuentran en los dos costados del equipo.
3. Encender el sistema de refrigeración, por medio del interruptor de encendido ubicado en la parte trasera del equipo, el cual se gira y se debe colocar en su nivel máximo para alcanzar la temperatura requerida de  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
4. Cuando la cámara llegue a una temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$ , se deja congelar el producto durante un tiempo estimado de dos horas.
5. En la parte superior del equipo se encuentra conectada una manguera roja, la cual hace parte del sistema de vacío y deberá conectarse directamente a la bomba de vacío (la cual es un accesorio externo del equipo de liofilización).
6. Pasado el tiempo de dos horas de congelación, se encenderá la bomba de vacío, verificando que la presión dentro de la cámara descienda hasta  $-0.7$  bares.
7. El equipo estará en funcionamiento con el sistema de refrigeración y vacío durante un tiempo aproximado de 26 horas, pasado este tiempo se apagará el sistema de refrigeración, dejando la bomba de vacío encendida hasta que la cámara vuelva a la temperatura ambiente este proceso toma un tiempo estimado de 4 horas.
8. Cuando la cámara de trabajo este a la temperatura ambiente, se procede a apagar la bomba de vacío y desconectar la manguera que está en la parte superior del equipo, a partir de ese momento la cámara se empieza a despresurizar esto demora un par de minuto y

finalmente podemos abrir la cámara para retirar el producto completamente liofilizado.

9. Para poder sacar el producto se recomienda tener listas las bolas con sello hermético que no permitan la rehidratación del producto con la humedad del ambiente y empacarlo lo más rápido posible.

***Anexo 10 Manual de funcionamiento***

## **Manual de Mantenimiento**

Con el fin de prolongar la vida útil del liofilizador piloto es importante desarrollar las actividades pertinentes al cuidado básico del equipo. Teniendo en cuenta la necesidad de un manual de mantenimiento se plantean a continuación una serie de actividades de cuidado básico de los elementos que forman parte de la unidad refrigeradora con el fin de evitar y detectar pequeños daños o averías que puedan convertirse en problemas más serios.

### **Actividades de cuidado básico.**

Para cumplir con las actividades de cuidado básico, recomendamos tener en cuenta lo siguiente:

- Contar con la base teórica y los principios básicos de refrigeración.
- Dominar el uso de instrumentos de medición tales como voltímetro, manómetros, termómetros y otros similares.
- Conocer el modo de operación de un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

### **Sistema de refrigeración.**

- Verifique el sistema y su carga de refrigerante.

Instale un manómetro en la tubería de entrada al compresor y verifique si registra algún valor de presión, de no ser así el sistema se encuentra sin refrigerante.

- Inspección de fugas de refrigerante a lo largo de la tubería de alta y baja.

Uno de los métodos más prácticos, consiste en hacer una mezcla clara de agua con jabón y aplicarla con una esponja sobre la tubería y terminales, en donde se sospecha la existencia de fugas, determinándose la existencia de ella al percibir burbujeo en la mezcla aplicada sobre la tubería.

### **Unidad de refrigeración.**

- Limpieza al exterior del compresor.

Para evitar la contaminación en el interior del compresor por humedad, los tubos deben ser mantenidos tapados, los tapones solo se deberán retirar

en el momento de aplicar la soldadura en la tubería del sistema y el tiempo máximo permitido es de un tiempo de 15 minutos.

- Inspección de ruidos y vibraciones.

Verifique los tornillos del anclaje del sistema, los cuales deben estar muy bien apretados, los amortiguadores de caucho deben tener un poco de juego para disminuir las vibraciones.

- Verifique la contaminación en el panel del condensador.

Realice una inspección visual del panel del condensador, si presenta alguna contaminación o suciedad, haga una limpieza con un cepillo suave asegurándose de no torcer las aletas.

### **Evaporador.**

- verifique el ciclo de descongelamiento.

Una vez terminado el proceso de liofilización se deja abierta la cámara y se espera hasta que el hielo se derrita completamente de los evaporadores, no utilice elementos externos para retirar el hielo de los evaporadores ya que puede perforar el evaporador.

Asegúrese que el ventilador se encuentra en funcionamiento y esté libre de ruidos durante los periodos de congelamientos.