

**REDISEÑO Y RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA DE UN  
LIOFILIZADOR PILOTO UTILIZADO EN LA DESHIDRATACION DE  
PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES, PARA EL LABORATORIO DE  
REFRIGERACION Y AIRE ACONDICIONADO.**

**OSCAR IVAN AROCA FRAGOZO  
RAY STEWENSON CARREÑO CAMARGO**



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

**2010**

**REDISEÑO Y RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA DE UN  
LIOFILIZADOR PILOTO UTILIZADO EN LA DESHIDRATACION DE  
PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES, PARA EL LABORATORIO DE  
REFRIGERACION Y AIRE ACONDICIONADO.**

**OSCAR IVAN AROCA FRAGOZO  
RAY STEWENSON CARREÑO CAMARGO**

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

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

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

**2010**

## **DEDICATORIA**

A Dios que es el guía y apoyo en todas las etapas de mi vida.

A mi madre Luz Stella y a mi padre William Eduardo por el gran esfuerzo que hacen para ver su hijo superarse y sobre todo por su amor incondicional.

A mis hermanitos y familiares menores para que me vean como el ejemplo a seguir.

A toda de mi familia en general por la paciencia y espera por ver el primer familiar graduado de una universidad.

A Sandy Carrillo mi novia y su familia quienes creyeron todo el tiempo en mi, también brindándome un gran apoyo para salir adelante.

A mis grandes amigos, quienes dejan huella en mis afectos; mi personalidad y mi recuerdo.

A Oscar Aroca amigo y compañero de proyecto con quien pasamos difíciles situaciones que si no hubiese sido por el sería difícil superarlas solo.

.....y a todos aquellos que se interesaron en mi bienestar y desarrollo profesional.

**RAY CARREÑO**

## **DEDICATORIA**

A Dios quien está siempre a mi lado ayudándome.

A mi mama que con su ejemplo y su fuerza fue el pilar de mi fortaleza en estos años de vida además de ser el motor que me impulsa a ser mejor, a mi padre que con su apoyo económico y sus múltiples ejemplos me impulsaron en momentos de duda.

A mi hermanito menor quien me inspiro de vez en cuando ideas del futuro y recuerdos del pasado.

A toda la familia en especial el Chiche y la vieja Zuni ejemplo vivo de aguante y esfuerzo, quienes me ensañaron el significado de un hogar.

A los amigos de siempre entre ellos Kaleth, Ray y Gerson “El Mono” con quienes pase un sinfín de experiencias que me ayudaron a crecer y a formarme como persona.

A los ingenieros Gerson Trujillo Navarro, Anderson Quiroga y Carlos Scrimaglia por enseñarme a diseñar.

Y de último pero no menos importante a mi Mary quien siempre estuvo a mi lado apoyándome, esperándome y creyendo en mi, haciendo siempre merito para amarla más.

**OSCAR AROCA F.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos las herramientas y recursos apropiados para nuestro crecimiento profesional.

A Omar Armando Gélvez Arocha, Ingeniero Mecánico, profesor y director del proyecto, quien nos brindo su confianza, orientación y respaldo desinteresado.

Al personal de planta física de la Universidad Industrial de Santander, por su colaboración y gestión en permisos necesarios en este proyecto.

A los técnicos en maquinado de herramientas Oscar Velásquez, a Orlando Olarte y José Olarte por su incondicional apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto.

A William Carreño por su gran colaboración y gestión en el desarrollo del proyecto

A nuestras madres por su constante apoyo, su dedicación y por todos los sacrificios que tuvieron que realizar para hacer posible este nuestro sueño.

GRACIAS

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>PAG.</b>
INTRODUCCION	20
1. FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACION	24
1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA LIOFILIZACION	28
1.2. ETAPAS TERMICAS DE LA LIOFILIZACION	32
1.2.1. CONGELACIÓN INICIAL	32
1.2.2. SUBLIMACION O DESECACION PRIMARIA	34
1.2.3. DESORPCION O DESECACION SECUNDARIA	35
1.3. TERMODINAMICA DEL PROCESO DE LIOFILIZACION	37
1.3.1. Transferencia de calor de congelación	37
1.3.2. Transferencia simultanea de calor y masa	38
1.3.3. Modelo de estado estable	39
1.4. INSTALACIONES	47
1.4.1. Instalaciones discontinuas	49
1.4.2. Instalaciones continuas	50
1.4.3. Instalaciones industriales	51
1.5. SUBSISTEMAS DE UN EQUIPO DE LIOFILIZACION	53
1.5.1. Cámara de trabajo	55
1.5.2. Sistemas de bandejas	62
1.5.3. Sistema de calentamiento del producto	65
1.5.4. Sistema de vacío	69
1.5.5. Sistema de refrigeración	71
1.5.6. Sistema de control	72
1.5.7. Sistema de descongelamiento	73
2. EVALUACION DEL PROCESO	85

2.1.	DESCRIPCION DEL PROCESO.	85
2.2.	ANALISIS DEL PROCESO	89
2.2.1.	Ventajas de la Liofilización	91
2.2.2.	Desventajas de la Liofilización	92
2.3.	IDENTIFICACION DE PARAMETROS	92
2.4.	DETERMINACION DE REQUERIMIENTOS	94
2.5.	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	97
2.5.1.	Ubicación Geográfica.	97
2.5.2.	Dimensiones de trabajo.	97
2.5.3.	Material.	98
2.5.4.	Especificaciones Técnicas.	99
3.	EVOLUCION DEL PROYECTO.	100
3.1.	PRESENTACION DE ALTERNATIVAS	100
3.1.1.	Alternativa de diseño 1.	102
3.1.2.	Alternativa de diseño 2.	105
3.1.3.	Alternativa de diseño 3.	108
3.1.4.	Alternativa de diseño 4 (Propuesta final)	111
4.	DISEÑO BASICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR PILOTO.	116
4.1.	Diseño estructural	116
4.1.1.	Bandejas.	120
4.1.2.	Modulo Portabandejas.	121
4.1.3.	Cámara de Trabajo.	121
4.1.4.	Puerta.	122
4.1.5.	Diseño de tapa trasera	130
4.2.	CALCULOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACION.	137
4.2.1.	Cálculos Térmicos	137
4.2.2.	Cálculo y selección del sistema de refrigeración	155
5.	ARGUMENTACION DE DISEÑO.	183
5.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO.	183

5.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES.	185
5.2.1.	Cámara de trabajo	185
5.2.2.	Sistema de refrigeración	186
5.2.3.	Sistema de vacío	194
5.2.4.	Sistema de calentamiento	196
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	199
6.1.	PESO Y PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS	199
6.2.	Duración de las etapas del proceso	201
6.3.	CONSUMO ENERGÉTICO	202
6.3.1.	Etapas de congelación	203
6.3.2.	Desecación primaria	201
6.3.3.	Desecación secundaria	203
6.3.4.	Consumos total energético del proceso	205
6.4.	FACTIBILIDAD ECONÓMICA	206
6.5.	PRUEBAS DE GRADO BRUX Y PH	207
	CONCLUSIONES	211
	RECOMENDACIONES	213
	BIBLIOGRAFIA	215
	ANEXOS	224

## LISTA DE FIGURAS

	<b>PAG.</b>
Figura 1. Liofilizador Piloto como tesis de grado en el año 2008 .....	22
Figura 2. Montañas Peruanas donde se desarrolla la liofilización .....	24
Figura 10. Proceso de la desecación primaria .....	35
Figura 11. Proceso de la desecación secundaria .....	36
Figura 12. Transferencia simultánea de calor y masa .....	40
Figura 13. Variación de la sublimación con respecto a la presión .....	45
Figura 14. Etapas del proceso de secado.....	47
Figura 20. Liofilizador piloto con cámara redonda .....	55
Figura 21. Secadero al vacío Industrial - e&e verfahrenstechnik GmbH de paredes cilíndricas. ....	56
Figura 22. Liofilizador piloto con cámara rectangular.....	57
Figura 23. Liofilizador industrial de cámara rectangular.....	57
Figura 24. Liofilizador de laboratorio.....	58
Figura 34. Cámara de trabajo con modulo portabandejas removible industrial .....	64
Figura 35. Cámara de trabajo con los sensores de temperatura .....	64
Figura 43. Detalle compresores de doble etapa. ....	73
Figura 44. Fotografía de un banco de control de un liofilizador piloto.....	75
Figura 50. Sistema de descongelamiento por gas caliente.....	82
Figura 51. Evaporador equipado con resistencias eléctricas.....	83
Figura 52. Sistema de descongelamiento por resistencias eléctricas.....	84
Figura 54. Diagrama representativo de la respuesta al adecuado suministro de calor .....	87
Figura 60. Alternativa de diseño # 2 modelada en CAD. ....	107
Figura 61. Esquema del sistema de refrigeración alternativa # 3. ....	109
Figura 62. Alternativa de diseño # 3 modelada en CAD. ....	110

Figura 63. Esquema de refrigeración alternativa #4 (final). .....	113
Figura 64. Alternativa de diseño # 4 (final) modelada en CAD. ....	114
Figura 80. Diagrama de las fases de la liofilización .....	142
Figura 81. Perfil de temperatura de las paredes cilíndricas .....	146
Figura 82. Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador. ....	156
Figura 90. Aplicaciones del controlador EKC 201 de Danfoss.....	174
Figura 98. Cámara de trabajo                      Figura 99. Modulo Portabandejas .....	186
Figura 100. Compresor Tecumseh                      Figura 101. Detalles de compresor .....	187
Figura 121. Detalles del Filtro deshidratador Danffos. ....	193
Figura 122. Filtro deshidratador Danffos.....	193
Figura 123. Bomba de vacío simulada en CAD .....	194
Figura 124. Bomba de vacío. ....	195
Figura 125. Llaves de paso a la bomba de vacío.....	196
Figura 126. Bandeja de producto simulado en CAD .....	197
Figura 127. Bandeja de Producto. ....	197
Figura 128. Muestras liofilizadas en la balanza .....	199
Figura 129. Muestras liofilizadas de diversas frutas .....	200
Figura 130. Imagen que muestra el refractómetro al inicio de la medición. ....	207
Figura 131. Imagen en el proceso de medida.....	208
Figura 132. Punto antes de medida .....	208
Figura 133. Lectura del refractómetro .....	208

## LISTA DE TABLAS

	<b>PAG</b>
Tabla 1. Especificaciones Técnicas de diseño.	99
Tabla 2. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 1.	104
Tabla 3. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 2.	108
Tabla 4. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 3.	111
Tabla 5. Comparación en las alternativas de diseño	116
Tabla 6. Tabla de propiedades de los materiales	128
Tabla 7. Tabla de propiedades de los materiales	132
Tabla 8. Resultados de simulacion de carga en ANSYS Workbench	134
Tabla 9. Resultados de simulacion de carga en ANSYS Workbench	135
Tabla 10. Resultados de simulacion de carga en ANSYS Workbench	136
Tabla 11. Tabla de datos geométricos de las paredes cilíndricas	143
Tabla 12. Datos de temperatura para cálculo de cargas	143
Tabla 13. Datos de los cálculos de carga en las paredes cilíndricas	145
Tabla 14. Datos de los cálculos de carga en el fondo	146
Tabla 15. Datos de los cálculos de carga en la tapa	147
Tabla 16. Datos de resultados totales de cálculos de cargas de las paredes	147
Tabla 17. Datos de los parámetros de cálculos de cargas	148
Tabla 18. Carga total debida a productos.	152
Tabla 19. Resumen de cargas a extraer en 22 horas de trabajo.	155
Tabla 20. Datos técnicos del evaporador	157
Tabla 21. Datos de cálculo de compresor	158
Tabla 22. Tabla de resultados de la fruta liofilizada	199
Tabla 23. Datos de consumo de energía en la etapa de refrigeración.	202
Tabla 24. Datos de consumo de energía en la etapa de desecación primaria	203

Tabla 25. Datos de consumo de energía en la etapa de desecación secundaria	204
Tabla 26. Datos de consumo de energía total por etapas	205
Tabla 27. Datos de factibilidad del proyecto	206
Tabla 28. Datos comparativos de la prueba de grados Brix	209

## LISTA DE ANEXOS

	<b>PAG.</b>
Anexo 1. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO	225
Anexo 2. MANUAL DE MANTENIMIENTO GENERAL	234
Anexo 3. PLANOS DE LAS VISTAS PRINCIPALES DEL LIOFILIZADOR	239

## RESUMEN

**TÍTULO:** REDISEÑO Y RECUPERACION DE LA CAPACIDAD OPERATIVA DE UN LIOFILIZADOR PILOTO UTILIZADO EN LA DESHIDRATACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES, PARA EL LABORATORIO DE REFRIGERACION Y AIRE ACONDICIONADO\*

**AUTORES:** OSCAR IVÁN AROCA FRAGOZO  
RAY STEWENSON CARREÑO CAMARGO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Liofilización, Refrigeración, Vacío, Control.

---

### DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto está orientado hacia el estudio de la aplicabilidad de un proceso de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío, por medio del rediseño del liofilizador piloto ubicado en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado en la escuela de Ingeniería Mecánica, con el cual se permita reproducir el proceso de liofilización en condiciones iguales a un equipo industrial. En este rediseño se trabajará con una configuración cilíndrica integral y un cierre hermético con sello y pernos garantizando así una presión de vacío suficiente para el proceso.

El liofilizador permite realizar la deshidratación de pequeñas muestras de productos agroindustriales mediante secado al vacío de manera óptima y eficiente. Consta de una estructura base y cuatro subsistemas principales los cuales son: cámara de trabajo, sistema de refrigeración, sistema de vacío y sistema de calentamiento.

La operación se inicia con la alimentación de 10Kg de producto a liofilizar en la cámara de trabajo, el sistema de refrigeración se encarga de llevar la temperatura del producto por debajo de  $-35^{\circ}\text{C}$  y luego el sistema de vacío baja la presión de la cámara hasta un valor de 610 Pa, dentro de la cámara se encuentra un módulo removible de portabandejas, en el cual se colocan las bandejas cargadas con el producto a liofilizar, una vez se ha llevado al producto a los valores de temperatura y presión requeridos dentro de la cámara de trabajo, el sistema de calentamiento que consiste en unas resistencias calefactoras instaladas debajo de las placas portabandejas, inicia el suministro de calor a los productos, se continúa manteniendo la cámara a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2%.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Gélvez Arocha

## ABSTRACT

**TITLE:** REDESIGN AND RECOVERY OF THE OPERATIONAL CAPACITY OF A USED PILOT LIOFILIZADOR IN THE AGRO-INDUSTRIAL PRODUCT DEHYDRATION, FOR THE LABORATORY OF REFRIGERATION AND CONDITIONED AIR\*

**AUTHORS:** OSCAR IVÁN AROCA FRAGOZO  
RAY STEWENSON CARREÑO CAMARGO\*\*

**KEY WORDS:** Freeze Drying, Refrigeration, Vacuum, Control.

---

### DESCRIPTION:

The present project is oriented towards the study of the applicability of a process of dehydration and agro-industrial product conservation by means of drying to the emptiness, by means of the redesign and the recovery of the operational capacity of a liofilizador pilot located in the laboratory of refrigeration and conditioned air in the school of Mechanical Engineering, with which it is allowed to reproduce the process of drying in equal conditions to an industrial equipment. In this redesign basically one will work with integral a cylindrical configuration and a hermetic seal with seal and Rep guaranteeing therefore a pressure to us of sufficient emptiness so that the process.

The liofilizador pilot is a semiautomatic system of drying, that allows to realize the dehydration of small agro-industrial product samples by means of drying to the emptiness of optimal and efficient way. He consists of a structure bases and four main subsystems that realize the basic functions to realize the drying process: camera of work, cooling system, vacuum system and system of heating.

The operation begins with the feeding of 10Kg of product to liofilizar in the work camera, where the cooling system is in charge to take the temperature of the product below  $-35^{\circ}\text{C}$  and soon the vacuum system lowers the pressure of the camera until a 610 value of Pa, within the camera is a removable unit of portabandejas, in which the trays loaded with the product are placed to liofilizar, once it has taken to the product to the values of required temperature and pressure within the work camera, the heating system that consists of resistance heating engineers installed underneath the plates portabandejas, initiates the heat provision to products, it is continued maintaining the camera to low pressure and the temperature rises until a value next to the one of the atmosphere, drying continues and the moisture content of the product is reduced until 2%.

---

\* Thesis of Degree

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineerings. School of Mechanical Engineering. Director Omar Gélvez Arocha

## INTRODUCCION

Colombia es considerado uno de los países más ricos en el sector agroindustrial, sin embargo, esta virtud no se está aprovechando al máximo ya sea porque muchas veces hay una mala administración o en otros casos por falta de recursos. Si hablamos a nivel nacional Santander es una región donde la mayor parte de la producción es agrícola, como por ejemplo la avicultura, el ganado y la producción de algunas frutas. Esta región del país se ve en la necesidad de mejorar sus procesos buscando así una herramienta que tome en cuenta la creciente competencia en el mercado actual, la cual exige a los fabricantes buscar alternativas para incrementar su competitividad.

Con el objetivo de contribuir con el desarrollo del sector agroindustrial del país y de contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de atender las necesidades de la comunidad, formar grupos de investigación; se desarrolla este trabajo de grado para dar solución a una necesidad que nace principalmente en la pequeña y mediana industria alimentaria; específicamente con el diseño de plantas de liofilización las cuales son la base para lograr la obtención de nuevos productos agroindustriales con alto nivel de calidad.

Debido a que los procesos de producción de alimentos actuales se realizan con métodos de deshidratación convencionales, estos afectan directamente la productividad ya que son realizados a temperaturas elevadas alterando las características organolépticas y provocando pérdidas del valor nutritivo de los productos, se orienta este proyecto hacia la investigación de la aplicabilidad de un proceso de liofilización en el medio local, trabajando en el desarrollo de nuevos productos agroindustriales que pueden derivarse de esta novedosa tecnología

generando así una importante alternativa agroeconómica tanto para la región como para la región.

Un liofilizador piloto es un equipo multifuncional que permite la liofilización de pequeñas producciones, para el estudio de mercado de nuevos productos, en condiciones idénticas que los equipos industriales. Puede ser utilizado como planta de investigación para el estudio o conservación de productos sensibles de producción especial, o como planta piloto, ya que permite reproducir los procesos en todas sus magnitudes para el estudio de curvas de liofilización en aplicación industrial.

En el año 2008 se desarrollo como tesis de grado un liofilizador piloto (ver figura 1) en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la escuela de Ingeniería Mecánica, este diseño presento una configuración rectangular con tres bandejas, material acero inoxidable brillante 430 calibre 22, un sistema de refrigeración, un sistema de calentamiento, bomba de vacío y un sistema de control que permitía el funcionamiento. Este liofilizador luego empezó a presentar problemas de filtraciones en la cámara y en el cierre hermético de la puerta, generando así un déficit en el proceso pues se debe llegar a una presión de vacío de 610 Pa que en estas condiciones no se alcanzaría.



**Figura 1.** Liofilizador Piloto como tesis de grado en el año 2008

Entonces nace la nueva necesidad de seguir estudiando y plantear otro diseño diferente con el fin de recuperar los sistemas de los que se compone el liofilizador piloto anteriormente nombrado, además de continuar la idea de realizar pruebas a pequeña escala donde la escuela de Ingeniería Mecánica se beneficie al prestar este servicio a la industria local; de esta manera se propone en este trabajo de grado desarrollar un diseño con una configuración cilíndrica, un cierre hermético con un sello de alta resistencia y pernos que garantice la presión de vacío para permitir reproducir los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial de una forma eficiente y práctica.

En este documento se muestra todo el proceso de diseño y construcción para la nueva configuración del liofilizador piloto. Inicialmente se exponen de forma

completa todos los fundamentos teóricos de la liofilización, lo cual es una de las bases de partida para el posterior proceso de diseño, en el siguiente capítulo se realiza el análisis del proceso de liofilización como tal, el análisis de los parámetros y sistemas (Sistema de Refrigeración, Bomba de vacío, Sistema de calentamiento y sistema de control.) del liofilizador piloto anterior, lo que permite fijar los nuevos parámetros y requerimientos base para crear las especificaciones del diseño del liofilizador piloto.

Posteriormente en el capítulo tres se presenta la evolución del proyecto y el análisis de cada una de las alternativas planteadas como solución, luego; en el capítulo cuatro se muestra todo el proceso de diseño básico y detallado en donde se realizan los cálculos, procesos de selección, diseño y adecuaciones de algunos elementos componentes del equipo. Más adelante se presenta la argumentación del diseño final haciendo la descripción del sistema operativo del liofilizador piloto y sus componentes, y para terminar en el capítulo seis se presentan todas las herramientas para la construcción del sistema de tendido.

Por último se presenta la formulación de conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del desarrollo del diseño del liofilizador.

## 1. FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACION

Los principios de secado por liofilización han sido conocidos por mucho tiempo, las personas que viven en climas árticos han conocido que los alimentos dejados en el frío se secarán y podrán ser conservados por periodos largos, esto sucede a causa de las propiedades del agua en sus varias formas.

Los primeros en liofilizar fueron los incas y los vikingos (ver figura 2) que requerían comida hipercalórica, muy liviana e imputrescible, para sus grandes recorridos y sus incursiones militares. Los incas aprovechaban el altiplano con sus noches heladas y su insolación diurna, para transformar la papa que llevaban en sus mochilas convirtiéndose en chuno y la carne de llama en charqui, quienes posiblemente fueron los primeros productos liofilizados de la historia. Los vikingos, con montañas más bajas y el sol más oblicuo, liofilizaban el arenque con menos perfección.



**Figura 2.** Montañas Peruanas donde se desarrolla la liofilización

**Fuente:** <http://bit.ly/b3d4Gp>

En la actualidad la liofilización es un método de secado en frío que sirve para conservar diversos materiales biológicos, medicamentos, vacunas y plasma sanguíneo, también es empleado para deshidratar alimentos líquidos sensibles y costosos, como el café y los jugos, o para secar alimentos sólidos costosos, como frutas, camarones, pollo, champiñones rebanados y en ocasiones piezas grandes como bistecs o chuletas (ver figura 3). Estos alimentos además de colores y sabores delicados, tienen atributos de textura y apariencia que no pueden conservarse mediante ningún otro método actual de secado.



**Figura 3.** Productos liofilizados

**Fuente:** <http://bit.ly/auUV8W>

La liofilización se desarrolló para deshidratar y conservar sin que se presenten pérdidas de los compuestos responsables de los aromas en los alimentos, los cuales se perdían en las operaciones convencionales de secado. Este tipo de secado se introdujo inicialmente a gran escala en la década de 1940 para la producción de plasma seco y productos de sangre, después, antibióticos y materiales biológicos se prepararon a escala industrial por liofilización.

Por ejemplo, una fruta fina es la fresa, esta fruta es blanda, frágil y está compuesta casi completamente por agua. Cualquiera de los métodos tradicionales de secado que emplean calor causaría en las frutas un alto grado de encogimiento, deformación y pérdida de la textura natural. Al reconstituirse esas fresas no tendrían ya su color, sabor y turgencia naturales y se parecerían más a una mermelada. Esto se puede prevenir en gran parte deshidratando la fruta en estado congelado de manera que no pueda encogerse o deformarse mientras está perdiendo su humedad.

El proceso de la liofilización consiste en desecar un producto previamente congelado, por medio de la sublimación del hielo bajo vacío; lográndose por lo tanto el paso directo del hielo (sólido) a gas (vapor), sin que en ningún momento aparezca el agua en su estado líquido. Se obtiene una masa seca, esponjosa de más o menos el mismo tamaño que la masa congelada original, mejorando su estabilidad y siendo fácilmente redisuelta en agua.

Un producto liofilizado que ha sido adecuadamente empaquetado puede ser almacenado durante tiempos ilimitados, reteniendo la mayoría de propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales de su estado fresco; además, el uso de bajas temperaturas también reduce la desnaturalización de proteínas en este tipo de secado.

Los productos liofilizados se conservan con muy bajo peso y a temperatura ambiente y pueden volver a su estructura original por adición de agua. La estructura esponjosa del producto liofilizado permite una rápida rehidratación del mismo. Las características del producto rehidratado son análogas a las que poseía el producto fresco. La porosidad de los productos liofilizados permite una rehidratación mucho más completa y rápida que la de los alimentos secados con aire.

Algunos de los productos comerciales obtenidos por liofilización son extractos (de café y té), verduras, frutas, carnes y pescado. Estos productos son ligeros, poseen de un 10% a 15% del peso original y no requieren refrigeración; incluso se puede llegar a obtener productos con humedad inferior al 2%.

Se pueden liofilizar para su conservación: materiales no vivientes, tales como plasma sanguíneo, suero, soluciones de hormonas, productos farmacéuticos biológicamente complejos como vacunas, sueros y antídotos (ver figura 4); trasplantes quirúrgicos con mucho tejido conectivo: arterias, piel y huesos; microorganismos simples destinados a durar largos periodos sin heladera, como bacterias, virus y levaduras. El proceso no es apto para células de tejidos blandos, que si bien se pueden liofilizar, pierden su viabilidad en el proceso.



**Figura 4.** Aplicación en el campo farmacéutico

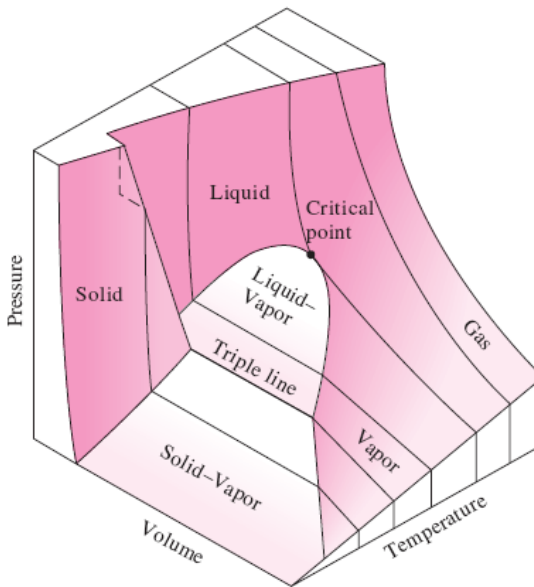
**Fuente:** <http://bit.ly/9VuWTK>

La liofilización es ampliamente usada para la conservación de productos alimenticios: detiene el crecimiento de microorganismos (hongos, mohos, etc.), inhibe el deterioro del sabor y color por reacciones químicas, enranciamiento y pérdida de propiedades fisiológicas; y facilita el almacenamiento y distribución.

### **1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA LIOFILIZACION**

Los principios de la liofilización se desarrollan en el estudio de las propiedades del agua cuando en esta sustancia se dan ciertas condiciones de temperatura y presión pasando de una fase (líquido, sólido y gas) a otra (ver figura 5), en la liofilización se busca que el cambio de fase del agua sea de la fase sólida a la fase gaseosa sin que la fase líquida se presente, este proceso se conoce como sublimación; entonces se facilita representar la liofilización con el diagrama termodinámico del agua.

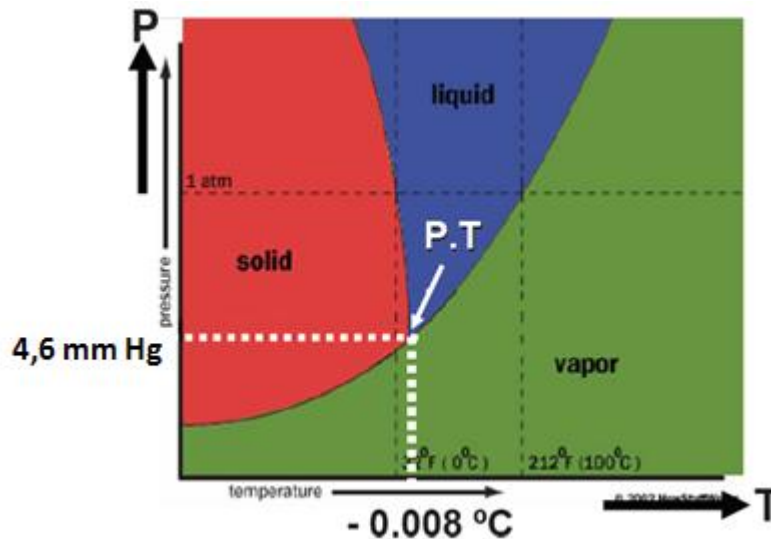
Las sustancias como el agua tienen la propiedad de expandirse cuando se congelan presentando así un volumen específico mayor a la misma temperatura y presión.



**Figura 5.** Superficie P-V-T de fases del agua

Fuente: Libro "Termodinámica" Ed.3<sup>ra</sup>, Autor: Yunus Cengel, Universidad tecnológica Nacional, Pág. 125.

Del diagrama del agua se identifica que el punto triple se sitúa a la presión de 610 Pascal y a una temperatura de 0.01°C, la sublimación solo puede tener lugar a una temperatura inferior a 0°C y a una presión inferior a la del punto triple (4.58 mmHg) (ver figura 6), además si se mantiene una presión de vacío de 610 Pa cuando está congelada el agua y si se añade un poco de calor sensible la primera reacción será la sublimación del hielo pasando a vapor sin la necesidad de derretirse algo de agua sólida.



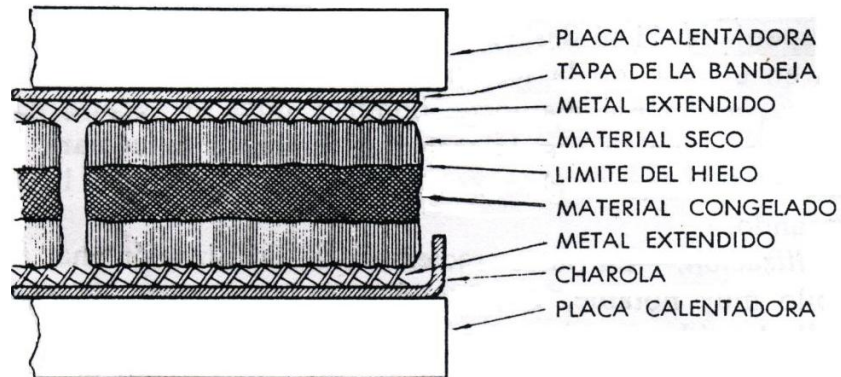
**Figura 6.** Diagrama P-T de fases de las sustancias

**Fuente:** <http://bit.ly/9VuWTK>

La sublimación es un cambio de fase endotérmico que involucra alrededor de 2800 KJ por Kg de hielo sublimado, además este proceso endotérmico debe ser provocado por una fuente de calor. Por lo tanto, como en todo proceso de eliminación de agua por vía térmica, se está produciendo simultáneamente transferencia de calor y transferencia de materia.

Cuando en la cámara de trabajo de una maquina de liofilización está al vacío se aplica el calor sensible anteriormente nombrado al alimento congelado con el fin de acelerar la sublimación, y se mantiene el vacío suficientemente alto, o sea, generalmente dentro de la escala de aproximadamente 0,1 a 2 mm Hg, y se controla el calor de manera que su intensidad sea un poco menor que la que se requeriría para derretir el hielo, se alcanzará casi la velocidad máxima de sublimación del vapor de agua. La sublimación tiene lugar desde la superficie del hielo, de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie

hacia adentro. Finalmente el último resto de hielo se sublima y la humedad del alimento queda reducida a menos del 5%.(ver figura 7).



**Figura7.** Ilustración de una pieza de alimento en proceso de liofilización.

**Fuente:** Ciencia de los Alimentos. Norman N. Potter, 1970

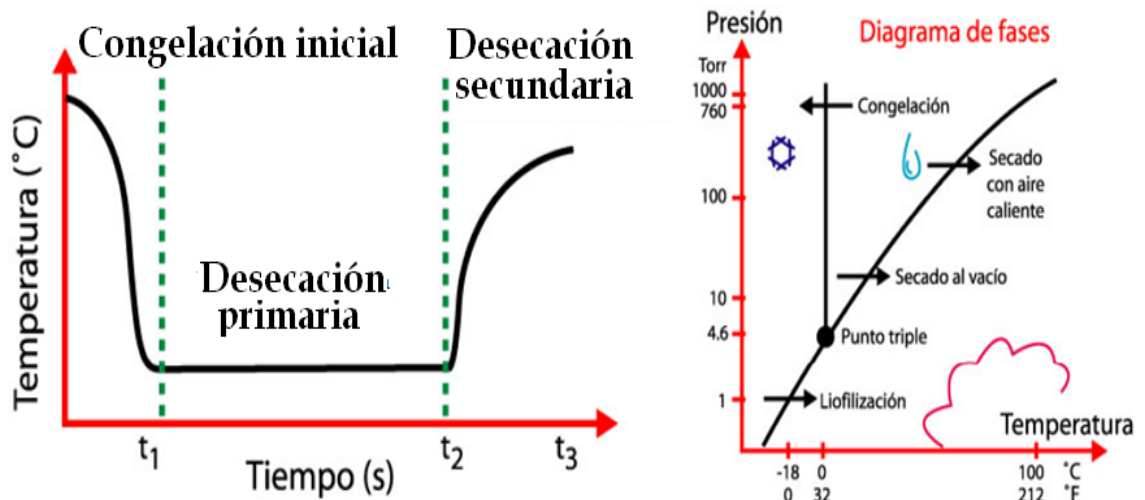
Ya que el alimento congelado permanece rígido durante la sublimación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual resulta en una estructura seca, porosa y esponjosa. Por eso, los alimentos liofilizados se reconstituyen rápidamente pero tienen que ser protegidos mediante un envase adecuado contra la absorción de humedad atmosférica y oxígeno.

Hoy en día las compañías alimentarias que desean instalar un equipo de liofilización en gran escala tienen que examinar el proceso desde un punto de vista global que abarca todos los sistemas relacionados. Estos incluyen el manejo de los materiales, la operación de congelación, la carga de las bandejas secadoras, la operación de deshidratación, las necesidades de alto vacío y la condensación, la descarga de las bandejas, las necesidades del envasado y, por supuesto, los costos del equipo, la mano de obra y los servicios auxiliares.

## 1.2. ETAPAS TERMICAS DE LA LIOFILIZACION

En todo proceso de liofilización se distinguen las siguientes tres etapas del proceso de liofilización que son (ver figura 8). :

- Congelación inicial
- Desección primaria
- Desección secundaria



**Figura 8.** Etapas de la liofilización y diagrama de fases del agua

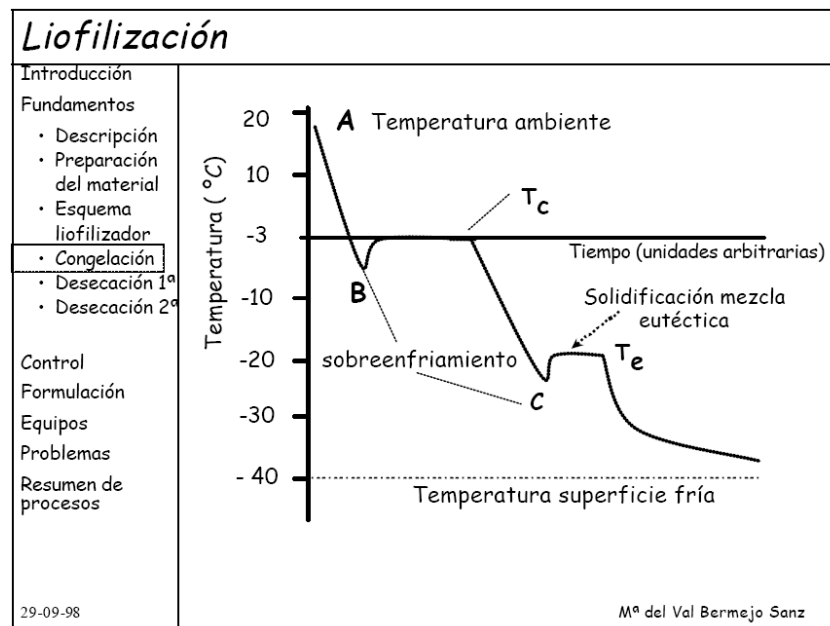
**Fuente:** <http://bit.ly/b3d4Gp>

### 1.2.1. CONGELACIÓN INICIAL

Es la primera etapa del proceso liofilizador, en esta etapa funciona solo el sistema de refrigeración y éste se encarga de disminuir la temperatura hasta los  $-30^{\circ}\text{C}$  con el fin de alcanzar la temperatura eutéctica de todos los productos, 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 punto B (ver figura 9) que para los alimentos está entre  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$  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.

Al final de la congelación la masa entera del producto se ha convertido en rígida, formando un eutéctico punto C cuya temperatura esta entre los  $-18^{\circ}\text{C}$  y  $-25^{\circ}\text{C}$ , que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento. Se requiere llegar al estado eutéctico para asegurar la eliminación de agua solo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación.



**Figura 9.** Comportamiento de la temperatura en el congelamiento

**Fuente:** <http://bit.ly/cpsrqm>

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

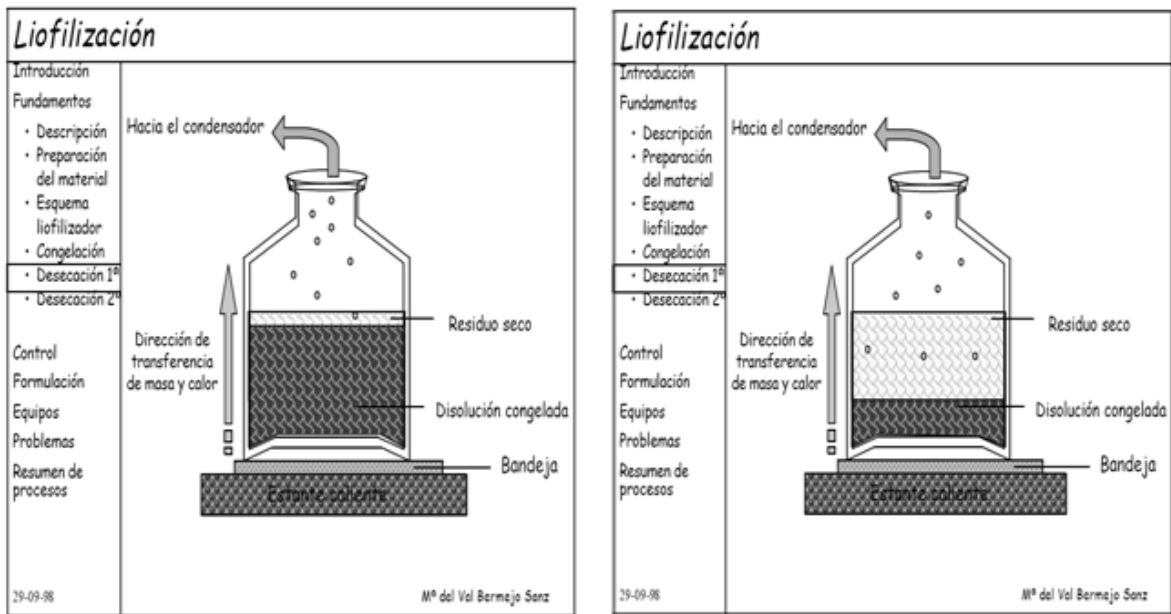
cristalina que da lugar a la formación de unos canales por los que el vapor de agua pueda escapar.

En general podemos decir que una congelación adecuada es la base de que el producto liofilizado presente óptimas condiciones de aspecto, conservación de sus propiedades y rápida rehidratación.

### **1.2.2. SUBLIMACION O DESECACION PRIMARIA**

Al llegar a la temperatura deseada de  $-30^{\circ}\text{C}$  comenzamos con la segunda etapa, en esta etapa encendemos la bomba de vacío y bajamos la presión dentro la cámara a 680 mm Hg, una vez alcanzada esta presión y a la temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  el producto comienza a sublimarse.

La desecación primaria es la etapa en que la mayor parte del agua libre pasa a vapor por transferencia de masa (ver figura 10). Si la presión de vapor de agua del alimento se mantiene por debajo de 4,58 torr (610,5 Pa) y el agua del alimento se halla congelada, 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 del sistema de refrigeración 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 interfase 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. En esta fase el producto se sublima hasta un contenido en agua del 15% (sobre su peso húmedo).



**Figura 30.** Proceso de la desecación primaria

**Fuente:** <http://bit.ly/cpsrqm>

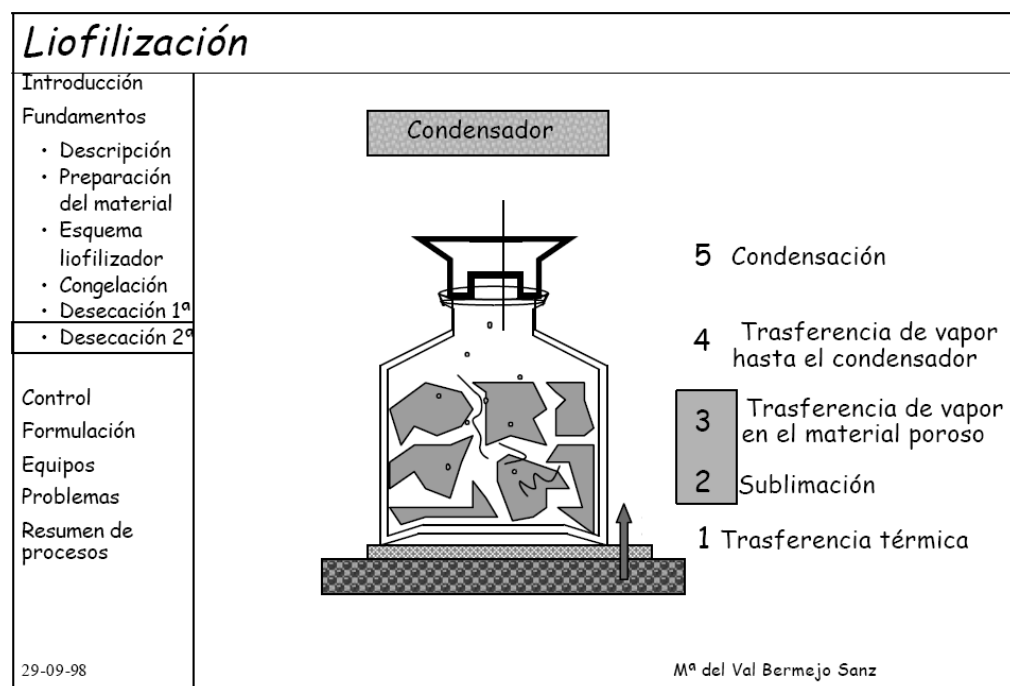
### 1.2.3. DESORPCION O DESECACION SECUNDARIA

La etapa secundaria del secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando, su misión es eliminar las últimas trazas de vapor de agua (ver figura 11), evaporando el agua no congelada ligada al producto. Se lleva a cabo manteniendo el liofilizador a baja presión y elevando la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente.

El paso de hielo a vapor requiere gran cantidad de energía suministrada en alto vacío, pues la interfase de secado se mueve hacia el interior de la muestra y el calor tiene que atravesar capas congeladas (sistemas liofilizados en bandeja, sin

granular) o secas (en granulados), generándose un considerable riesgo de fusión del material intersticial o quemar la superficie del producto que ya está seco. 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 conduce hasta allí por conducción. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo.

En la desecación que se produce por deshidratación evaporativa del agua no congelada, el contenido en agua se reduce hasta el 2% (sobre su peso húmedo).



**Figura 41.** Proceso de la desecación secundaria

**Fuente:** <http://bit.ly/cpsrqm>

### 1.3. TERMODINAMICA DEL PROCESO DE LIOFILIZACION

Los procesos que sufre el producto en la liofilización ya se han tratado muy básicamente ahora vamos a analizar más detalladamente cada proceso aplicando conceptos y formulas de la termodinámica.

En la primera etapa de congelación se deben considerar los siguientes parámetros:

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

Buscando que el producto ya congelado tenga una estructura sólida sin intersticios en los que haya líquido concentrado para propiciar que todo el secado ocurra por sublimación.

#### 1.3.1. Transferencia de calor de congelación

El proceso de llevar el producto desde una temperatura ambiente de 28°C hasta -35°C se divide en tres procesos de transferencia de calor:

- El primero es un proceso de transferencia de calor sensible desde el producto a liofilizar hacia el ambiente, este proceso se describe con la ecuación de termodinámica:

$$Q_s = m * C_p * (t_1 - t_2)$$

Este proceso finaliza cuando el producto alcanza una temperatura de 0°C antes que se congele.

- El segundo proceso es un proceso de transferencia de calor latente para un cambio de fase, este es el calor latente de fusión o congelación que para el agua a la presión atmosférica y una temperatura promedio de según las tablas del libro de “Termodinámica” de Yunus Cengel es; el calor transferido se halla:

$$Q_l = m * h_{fg}$$

- El último proceso es una transferencia de calor sensible dado por la disminución de la temperatura de 0°C a -35°C y se da por la ecuación:

$$Q_s = m * C_p * (t_1 - t_2)$$

Cuando en el proceso de liofilización se comienza el calentamiento empieza a formarse un frente de sublimación o interfase entre la capa seca y la capa congelada del producto el cual avanza progresivamente, y para un determinado instante, a una temperatura de interfase ( $T_s$ ) le corresponde una determinada Presión de saturación ( $P$ ).

### **1.3.2. Transferencia simultanea de calor y masa**

En la segunda etapa se hablo de transferencia de calor y masa simultáneamente, este proceso de transferencia de masa se llama difusión y su funcionamiento se basa en la fuerza impulsora que se da en la sublimación, esta fuerza es la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en la interfase del hielo y

la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande; la transferencia de calor es la que ocurre a través de la radiación y conducción de las bandejas.

Como en todo proceso de secado, coexisten los fenómenos de transferencia de calor y materia, la curva de transferencia de calor en función del tiempo se obtiene multiplicando la cantidad de agua sublimada por su correspondiente calor de sublimación o desorción. En la liofilización las transferencias limitantes siempre son las internas.

### **1.3.3. Modelo de estado estable**

Como nos hemos dado cuenta a lo largo de toda la carrera de ingenieros, sabemos que el estado estable de cualquier proceso (no solo termodinámico) es un estado que permite suponer ciertas condiciones que facilitan el desarrollo, trabajaremos el desarrollo y las ecuaciones que están soportadas bajo esta condición.

La primera condición que tomaremos será que la energía requerida para mantener la sublimación se supone que es igual al flujo radiante o conductivo debido al gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de secado, entonces todo el calor que llega al producto es conducido a través de él. El agua se sublima por debajo del punto triple bajo presiones de 611 Pa o menores. La interfase de sublimación está localizada por encima del frente de hielo y la eliminación de agua tiene lugar cerca o en la interfase de sublimación.

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{K * (T_s - T_f)}{(X_2 - X_1)}$$

Donde:

$Q$ : Calor por conducción a través del alimento ( $W$ )

$A$ : Área de transferencia de calor ( $m^2$ )

$q$ : Flujo de calor por conducción a través del alimento ( $\frac{W}{m^2}$ )

$K$ : Conductividad térmica del producto seco ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )

$T_s$ : Temperatura de la superficie del producto (K)

$T_f$ : Temperatura de sublimación del frente de hielo (K)

$(X_2 - X_1)$  ó  $\Delta X$ : Espesor de la capa seca ( $m$ )

Cuando el calor llega al frente de sublimación la temperatura y la presión de vapor en él aumentan (ver figura 12). Como consecuencia de ello el vapor se desplaza desde el alimento a la zona de baja presión de la cámara de liofilización. Un gramo de hielo da lugar a 2 m<sup>3</sup> cúbicos de vapor a una presión de 67 Pa. Por ello en la liofilización comercial se hace preciso eliminar varios centenares de metros cúbicos de vapor por segundo, que deberán escapar a través de los poros del alimento liofilizado.

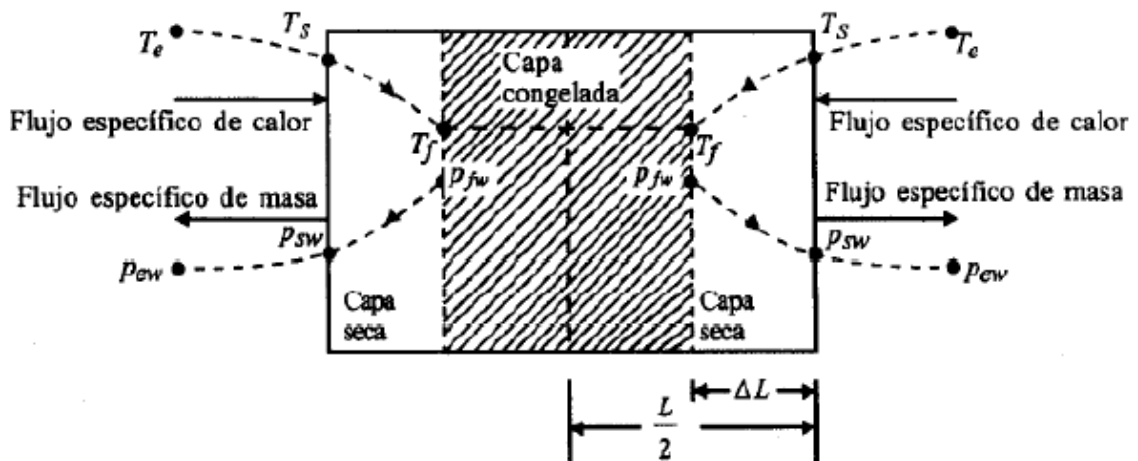


Figura 52. Transferencia simultánea de calor y masa

Fuente: <http://bit.ly/b3d4Gp>

En la liofilización se deben considerar tres variables de diseño importantes (1) La presión de vacío en el interior de la cámara de secado, (2) El flujo de energía radiante y conductivo aplicado al producto (que debe ser lo más elevada posible pero sin que provoque la descongelación), y (3) La temperatura del condensador de vapor (tanto la presión como la temperatura deberán ser lo más bajas posible).

En teoría, la temperatura del hielo debería elevarse hasta un valor, justo por debajo de su punto de descongelación. Sin embargo, por encima de una determinada temperatura crítica los solutos concentrados del alimento poseen suficiente movilidad como para permitir su migración por acción de las fuerzas que se desarrollan durante el proceso. Cuando ello sucede, la estructura del alimento se colapsa inmediata e irreversiblemente, lo que reduce la velocidad de transferencia de vapor, y detiene, en consecuencia, la deshidratación. En la práctica, por tanto, existe una temperatura máxima que el hielo no debe superar, una temperatura mínima para el condensador y una presión mínima en el liofilizador. Todas ellas controlan la velocidad de transferencia de masa.

A velocidad de sublimación constante el caudal de evaporación  $\dot{m}$  es tal que:

$$\dot{m} = \frac{Q}{L_s}$$

Donde  $L_s$  es el calor latente de sublimación. Por la tanto:

$$\dot{m} = \frac{K * A * (T_s - T_f)}{L_s * \Delta X}$$

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

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

Donde:

$D$ : Difusividad del agua

$R$ : Constante de los gases ideales

$P_s$ : Presión parcial del agua en la superficie del producto

$P_f$ : Presión parcial del agua en el frente de sublimación

$T$ : Temperatura media de la capa seca

Siendo  $P$  la permeabilidad del producto

$$P = \frac{D}{RT}$$

Entonces

$$\dot{m} = \frac{P * A * (P_f - P_s)}{\Delta X}$$

Durante la liofilización el contenido de agua cae desde su valor inicial en la zona congelada, a un valor inferior en la capa liofilizada, que depende de la presión de vapor en el liofilizador. Cuando el calor se transmite a través de la capa de alimento liofilizado, la relación existente entre la presión de liofilizador y la de la superficie del hielo viene determinada si igualamos las dos formulas de flujo de sublimación:

$$\frac{P * A * (P_f - P_s)}{\Delta X} = \frac{K * A * (T_s - T_f)}{L_s * \Delta X}$$

$$P_f = P_s + \frac{K * (T_s - T_f)}{P * L_s}$$

En general la conductividad térmica y la permeabilidad varían en sentido inverso: en un producto compacto del tipo de una pasta, la conductividad térmica es elevada, pero la estructura del producto hará que la difusión del vapor sea difícil. Por lo contrario, en el caso de un producto poroso o granular, la permeabilidad a la difusión de vapor será excelente, pero la conductividad térmica será muy baja.

Si por el contrario se trata de un producto permeable pero térmicamente aislante, la capa seca ejerce el papel de pantalla térmica de modo que el gradiente de temperatura será elevado, con el consiguiente riesgo de quebradura del producto en la superficie.

Entonces según el producto sabemos cuál es la limitante del proceso, si la transferencia de calor o la transferencia de masa. Si el factor limitante es la transferencia de calor tendríamos:

$$Q = \dot{m} * L_s = \frac{K * A * (T_s - T_f)}{\Delta X} = \frac{K * A * \Delta T}{\Delta X}$$

Como en régimen estacionario

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad \frac{dm}{dt} * L_s = \frac{K * A * \Delta T}{\Delta X}$$

Y la cantidad de agua sublimada del producto es:

$$m = m_i - m_f$$

$$m = \rho(w_i - w_f) * A * \Delta X$$

Siendo  $\rho$  la densidad del producto,  $w_i$  la humedad inicial,  $w_f$  la densidad final. Si se considera que la densidad del producto seco es la misma que la densidad del producto húmedo, para una capa de producto de grosor infinitesimal  $dx_i$  resulta:

$$dm = \rho(w_i - w_f) * A * dx$$

Y de la formula de régimen estacionario

$$\frac{dm}{dt} * L_s = \frac{K * A * \Delta T}{\Delta X} = \frac{\rho(w_i - w_f) * A * dx}{dt} * L_s$$

$$dt = \frac{\rho(w_i - w_f) * A * x * dx}{K * \Delta T}$$

Integramos para hallar el tiempo:

$$\int_0^t dt = \frac{\rho(w_i - w_f) * A}{K * \Delta T} * \int_0^x x * dx$$

$$t = \frac{\rho(w_i - w_f) * A}{K * \Delta T} * \left[ \frac{x^2}{2} \right]$$

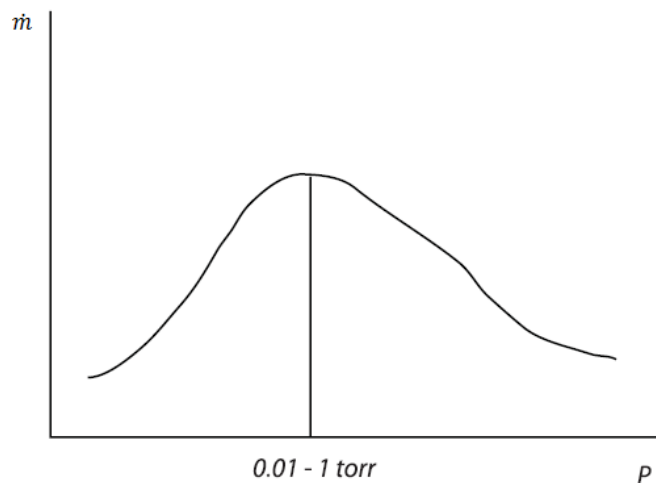
$$t = \frac{\rho(w_i - w_f) * A * x^2}{2 * K * \Delta T}$$

Si la transferencia de masa es limitante, una demostración analógica permite escribir:

$$t = \frac{\rho(w_i - w_f) * A * x^2}{2 * P * \Delta P}$$

Por lo tanto, en los dos casos se constata que la duración de la sublimación es aproximadamente proporcional al cuadrado del espesor del producto, de donde se comprende el interés por trabajar con capas delgadas o trozos de pequeños tamaños.

Como se muestra en la figura 13 la velocidad de secado en función de la presión pasa por un máximo comprendida generalmente entre 0.01 y 1 mm Hg. Al aumentar la presión disminuye el gradiente de presión entre el frente de sublimación y la superficie del producto; por otra parte se aumenta la temperatura de sublimación lo que provoca la disminución del gradiente de temperatura. Por lo tanto el aumento de presión disminuye simultáneamente la cantidad de transferencia de masa y la cantidad de transferencia de calor.



**Figura 63.** Variación de la sublimación con respecto a la presión

**Fuente:** <http://bit.ly/dhsL5L>

La interpretación de la otra parte de la curva podría ser que el vacío muy intenso provoca el desaireado del producto de tal manera que cesan los movimientos de convección lo que se traduce en la conductividad térmica del producto.

Se debe también tener presente que la permeabilidad a la difusión de vapor aumenta con la porosidad, lo que traduce en un aumento en la velocidad de sublimación (por porosidad se entiende tamaño de poros). Esta es la razón por la cual la lenta velocidad de congelación del producto provoca rápida velocidad de secado ya que los cristales formados son voluminosos y se transforman en poros después de la sublimación. Si el producto de partida es líquido, los cristales formados durante la congelación son tanto más pequeños cuando mayor es el extracto seco inicial. Por lo tanto la velocidad de liofilización disminuye cuando aumenta el extracto seco inicial del producto.

Las tres fases se visualizan en la figura 14 y éstas fases son:

**Fase 1:** Llamada etapa conductiva. Inicialmente, por el calentamiento de la muestra, la velocidad de sublimación crece rápidamente hasta llegar a un máximo. El tiempo para agotar esta fase es relativamente corto; en ella se lleva a cabo la mayor parte de remoción de agua del producto (entre un 75-90%), siendo el mecanismo preponderante la transferencia de calor por conducción.

**Fase 2:** Primera etapa difusiva. Muestra un descenso importante de la velocidad de sublimación debido a la formación de una capa porosa de material seco que opone resistencia creciente al flujo de calor y al vapor a medida que procede el secado.

**Fase 3:** Segunda etapa difusiva. La velocidad de sublimación continúa decreciendo de forma que se aproxima a cero. Esto debido a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación.

Puesto que la difusividad de los aromas disminuye sensiblemente cuando la humedad es pequeña es posible en esta etapa incrementar la temperatura de calefacción y del producto hasta valores del orden de 50°C, dependiendo del material que se trate.



**Figura 74.** Etapas del proceso de secado

Fuente: <http://bit.ly/b3d4Gp>

#### 1.4. INSTALACIONES

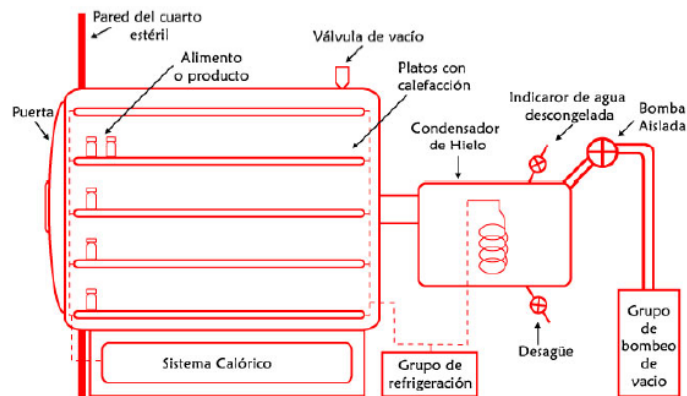
Una instalación básica de liofilización consta de los siguientes elementos esenciales (ver figura 15): cámara de vacío donde se introduce el producto a liofilizar, un sistema de calentamiento para suministrar el calor latente de sublimación; un sistema de enfriamiento el cual tiene dos funciones en el proceso:

- Una es la congelación del producto, aunque algunos equipos liofilizadores no realizan la etapa de congelación entonces en este caso se realiza a parte en un sistema convencional de cuarto frío, aunque el empleo de congeladores independientes, posee el inconveniente de implicar una

manipulación del producto suplementaria, con los riesgos de fusión parcial de este durante su traslado, peligro de contaminación, dificultad en manipular las bandejas enfriadas a temperaturas muy bajas.

- La otra es para la condensación del vapor donde se emplean serpentines refrigerantes dotados de un sistema automático de descongelación con objeto de mantenerlos libres de hielo, para que su capacidad de condensación se mantenga.

Este aspecto es muy importante ya que la mayor parte del gasto energético se emplea para la refrigeración de los condensadores y, por tanto, el rendimiento de un liofilizador viene determinado por la eficacia del condensador. Los vapores no condensables son eliminados mediante bombas de vacío.



**Figura 15.** Instalación básica de un liofilizador

**Fuente:** <http://bit.ly/b3d4Gp>

La clasificación de un equipo liofilizador depende de varios factores como la forma, depende del funcionamiento de los subsistemas y depende del producto a liofilizar.

En la actualidad se tienen diferentes tipos de instalaciones, entre ellas las más representativas son las instalaciones industriales, las instalaciones de laboratorio y las instalaciones piloto como lo que se busca en este proyecto.

Los sistemas más corrientemente empleados para suministrar el calor de sublimación son: la conducción y la radiación. En la actualidad se están poniendo a punto liofilizadores de calentamiento por microondas.

De cada tipo de liofilizador existen versiones de funcionamiento discontinuo y continuo.

#### **1.4.1. Instalaciones discontinuas**

En las instalaciones discontinuas (ver figura 16) las bandejas se cargan con el producto congelado, se cierra la cámara de liofilización hermética y se hace el vacío, se lleva a la temperatura de secado durante el tiempo especificado para el ciclo. Al final del ciclo de secado se llena la cámara con un gas inerte y a continuación se abre. Entonces el producto se saca de la cámara y es envasado. Las condiciones adecuadas para la liofilización dependen del alimento, pero su temperatura superficial no debe superar en ningún caso, los 60°C.



**Figura 16.** Instalación industrial de un liofilizador discontinuo

**Fuente:** <http://bit.ly/clKBVr>

#### **1.4.2. Instalaciones continuas**

En los sistemas de liofilización continuos la entrada y salida de las bandejas o del producto en cintas se efectúa a través de compuertas de seguridad cuando termina cada ciclo para la cantidad de producto (ver figura 17); existen dos tipos de secaderos:

- Secadero de bandeja, donde el producto se coloca en bandejas que se mueven a lo largo del secadero de forma continúa; las bandejas circulan, colocadas entre placas calefactoras, en vagonetas que circulan sobre unos rieles a través de distintas zonas de calentamiento de una cámara que se mantiene al vacío.

- Dinámicos o secaderos sin bandejas, donde el producto se mueve a través del secadero mediante cintas, placas circulantes, placas vibratorias, lecho fluidizado y pulverizado.



**Figura 17.** Instalación industrial de un liofilizador continuo con el producto sobre cintas

**Fuente:** <http://bit.ly/cHJoad>

### **1.4.3. Instalaciones industriales**

Cuando se habla de instalaciones industriales estamos hablando de un promedio de 1 a 6 toneladas diarias de producto liofilizado; recientes avances en la práctica industrial se enfocan a métodos continuos de secado ya que son menos laboriosos y menos costosos que los procesos discontinuos. Las instalaciones a nivel industrial cuentan con un sistema de control que se maneja por recetas, permitiendo así un desarrollo del proceso en mejores condiciones puesto que en estas recetas se manejan todas las principales variables del proceso.

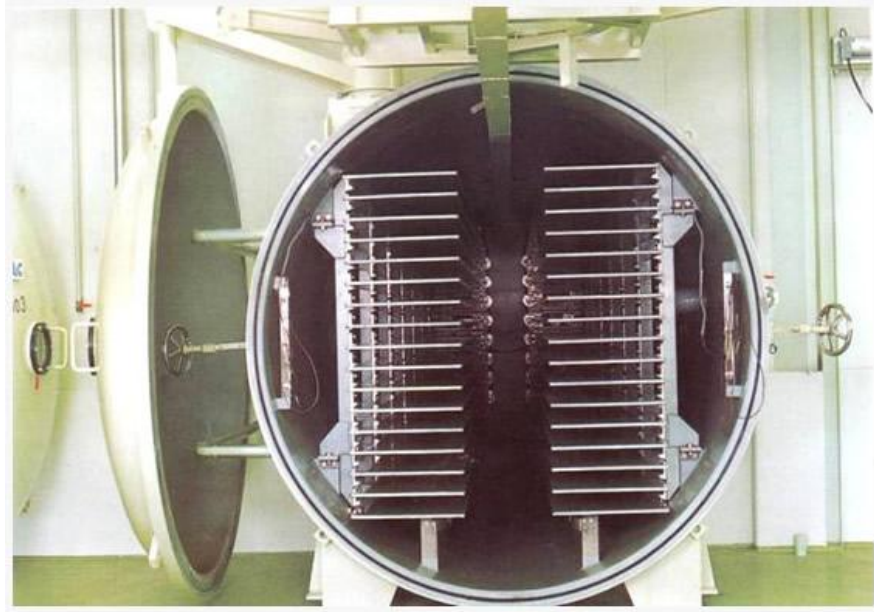
Las Figuras 18 y 19, presentan algunas de las unidades industriales más corrientes utilizadas para el procesado de productos liofilizados. La mayoría de las

instalaciones industriales tienen una cámara de congelación separada de la de secado, para acelerar la etapa inicial del proceso de liofilización. La congelación se realiza mediante tambores y cintas (enfriamiento de contacto) o con bandejas (enfriamiento conectivo por circulación de aire frío). Entonces el material precongelado se carga al secadero y se procesa. El producto se mueve en las bandejas o cintas dependiendo del tipo de secadero.



**Figura18.** Liofilizador de producción Telstar, serie Lyogamma.

**Fuente:** Catálogo TELSTAR INDUSTRIAL / Lyogamma



**Figura 19.** Liofilizador de producción Telstar, serie Lyogamma.

**Fuente:** catálogo TELSTAR INDUSTRIAL / Lyogamma

Otra aplicación muy utilizada en la actualidad en los procesos industriales es la liofilización atmosférica, el proceso consiste en mezclar en una columna, finas partículas de adsorbente fluidizadas y producto congelado. Gas seco y frío (aire o nitrógeno) se utilizan como medio de fluidización mientras que la columna es enfriada. El calor de adsorción aporta el calor de sublimación requerido. El secado se realiza de forma automática cuando la presión parcial de agua y la temperatura descienden lo suficiente.

### **1.5. SUBSISTEMAS DE UN EQUIPO DE LIOFILIZACION**

Un equipo convencional de liofilización se caracteriza por una construcción compacta formada por varios sistemas que cumplen diversas funciones para dar lugar al proceso de liofilización, estos sistemas son:

- Cámara de trabajo.
- Sistemas de bandejas.
- Sistema de calentamiento del producto.
- Sistema de vacío.
- Sistemas de refrigeración.
- Sistemas de control.
- Sistemas de descongelamiento.

### **1.5.1. Cámara de trabajo**

La cámara de trabajo es el lugar en el cual se realiza el enfriamiento del producto (en las instalaciones que también realizan el congelamiento además de la deshidratación) y posterior vacío para la liofilización, dentro de ella se encuentran el sistemas de bandejas, el sistema de calentamiento del producto y el sistema de condensado del vapor.

Esta cámara se clasifica según su configuración geométrica y según la ubicación de su sistema de condensación:

Según su configuración geométrica:

- Sistema de Cámara Redonda o de paredes cilíndricas.
- Sistema de Cámara Rectangular o de paredes planas.
- Sistema Especial para Laboratorio.

Según la ubicación de su sistema de condensación:

- Sistema de Simple Cámara.
- Sistema de Doble Cámara.

Todas estas configuraciones son fabricadas en acero inoxidable y/o acrílico, estas últimas para cámaras de laboratorio.

#### 1.5.1.1. Configuraciones geométricas

- **Sistema de Cámara Redonda o de paredes cilíndricas**

Es el diseño más utilizado a nivel industrial por su perfecto sello hermético, pero tiene un costo más elevado en cuanto a construcción comparado con el diseño rectangular (ver figura 20 y 21); también se utiliza en liofilizadores piloto por su pequeño tamaño.



**Figura 80.** Liofilizador piloto con cámara redonda

**Fuente:** <http://bit.ly/ceYt4v>

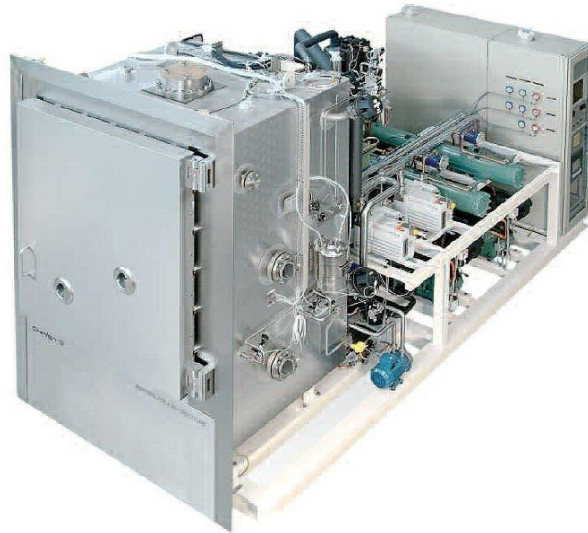


**Figura 91.** Secadero al vacío Industrial - e&e verfahrenstechnik GmbH de paredes cilíndricas.

**Fuente:** <http://bit.ly/cHJoad>

- **Sistema de cámara rectangular**

Es un diseño muy utilizado en liofilizadores piloto (ver figura 22 y 23), por su facilidad de diseño y construcción, además por su bajo costo.



**Figura 102.** Liofilizador piloto con cámara rectangular

**Fuente:** <http://bit.ly/ae1vAk>



**Figura 113.** Liofilizador industrial de cámara rectangular

**Fuente:** <http://bit.ly/bqEJMU>

- **Sistema de cámara Especial para Laboratorio**

En su mayoría estas cámaras son fabricadas en acrílico y con diseños especialmente para la conservación de muestras en biotecnología y ciencias de la salud (ver figura 24 y 25), como el cuidado de células madres entre otros, contienen unos frascos ampollas para el secado de productos en estado líquido, pero también se tiene la opción de introducirlos congelados a las bandejas.



**Figura 124.** Liofilizador de laboratorio  
Con opción de ampollas o bandejas  
Fuente: [www.freezedriers.com](http://www.freezedriers.com)



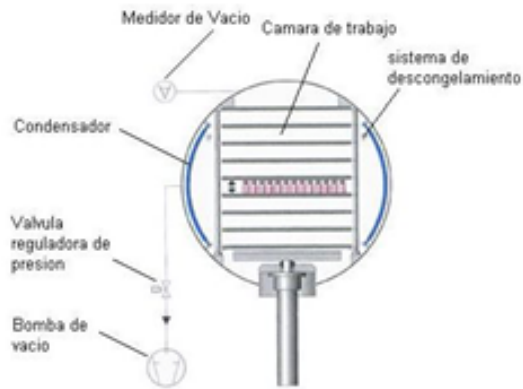
**Figura 25.** Liofilizador con solo opción de  
ampollas  
Fuente: <http://bit.ly/bqEJMU>

### **1.5.1.2. Ubicación del sistema de condensación**

- **Sistema de Simple Cámara**

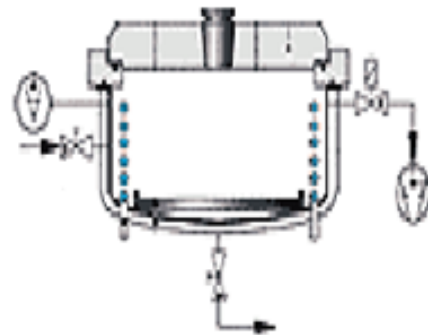
En el sistema de Cámara Simple (ver figura 26 y 27) el condensador se encuentra en las paredes de la cámara de trabajo, haciendo el liofilizador más compacto; el vapor extraído por el vacío es llevado hacia las paredes de la cámara ya que el ducto de vacío está conectado al lado del condensador con el fin de proteger la bomba de vacío de vapor de agua.

El sistema de simple cámara tiene una alta capacidad de secado y bajo costo energético, puede ser utilizado tanto en liofilizadores grandes como en pequeños. El tiempo de liofilización es más corto debido a que el condensador rodea la cámara de trabajo.



**Figura 26.** Sistema de simple cámara cilíndrica

Fuente: [www.freezedriers.com](http://www.freezedriers.com)

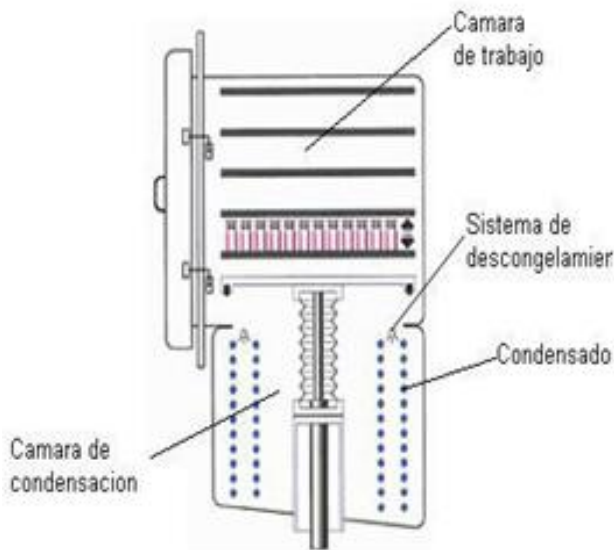


**Figura 27.** Sistema de simple cámara de Laboratorio

Fuente: [www.freezedriers.com](http://www.freezedriers.com)

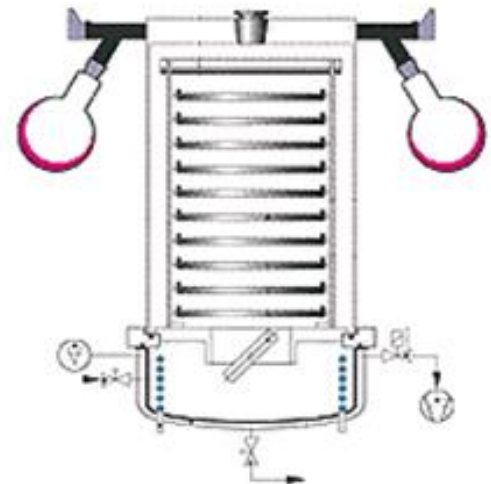
- **Sistema de Doble Cámara**

En este sistema la cámara de condensación está separada de la cámara de trabajo (ver figura 28 y 29), por lo general la cámara de condensación se encuentra debajo de la cámara de trabajo haciendo más grande el equipo liofilizador, aunque debe existir una sección grande de comunicación entre estas para evitar grandes diferencias de presión, este sistema es mucho más eficiente; en la parte de abajo de la cámara de condensación tiene un ducto de descarga de condensado o drenaje y en la parte superior tiene un sistema de descongelamiento (ver figura 30, 31 y 32), además esta cámara puede ser supervisada con una puerta adicional.



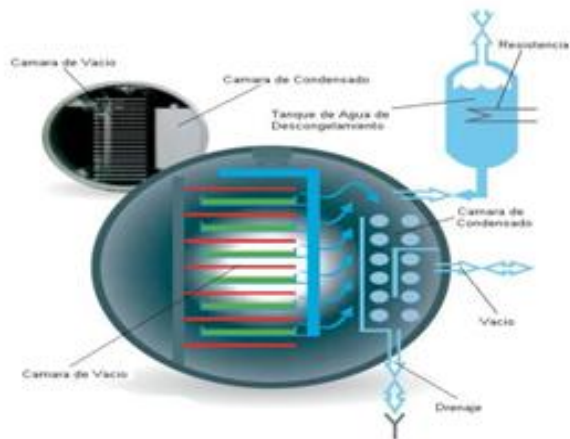
**Figura 28.** Sistema de doble cámara rectangular

Fuente: [www.freezedriers.com](http://www.freezedriers.com)



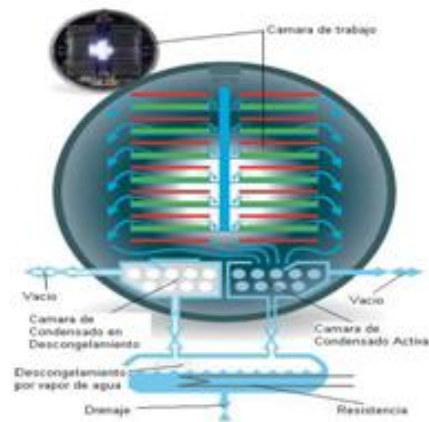
**Figura 29.** Sistema de doble cámara Cilíndrica para laboratorio

Fuente: [www.freezedriers.com](http://www.freezedriers.com)



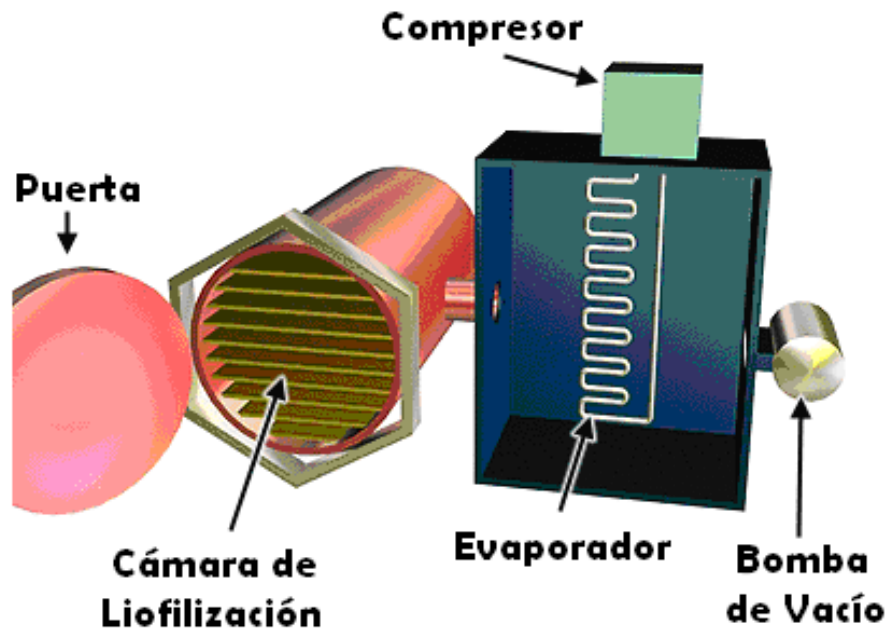
**Figura 30.** Sistema de doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento por agua caliente.

Fuente: Catálogo ATLAS RAY. [FreezeDrying.com](http://FreezeDrying.com)



**Figura 31.** Sistema de doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento continuo.

Fuente: Catálogo ATLAS RAY. [FreezeDrying.com](http://FreezeDrying.com)



**Figura 32.** Sistema de doble cámara modelado con herramientas CAD

Fuente: [www.howstuffworks.com](http://www.howstuffworks.com)

### 1.5.2. Sistemas de bandejas

El sistema de bandejas es el compartimiento en el cual se colocan los productos que van a ser sometidos al proceso de liofilización, en los equipos liofilizadores continuos la entrada y salida de las bandejas se efectúa a través de compuertas de seguridad. Las bandejas circulan, colocadas entre las placas calefactoras sobre unas guías en la cámara de trabajo.

Este sistema se puede clasificar según la disposición del portabandejas:

- Sistema de portabandejas fijo.
- Sistema de portabandejas removible.

### 1.5.2.1. Sistemas de portabandejas fijo.

Como su nombre lo indica el portabandejas se fija a la cámara de trabajo por medio de remaches o cualquier otro elemento de unión (ver figura 33).

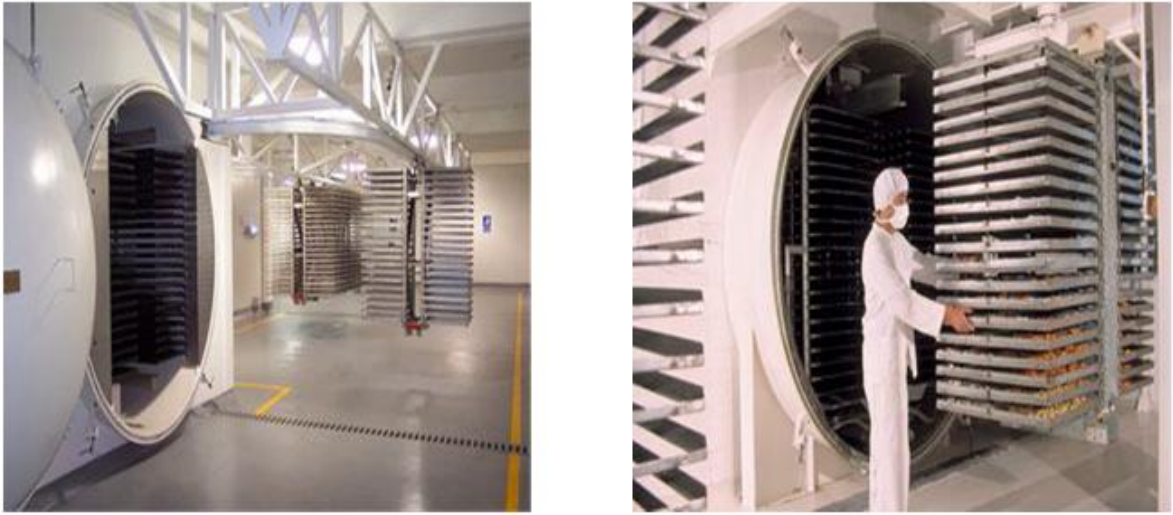


**Figura 33.** Cámara de trabajo con sistema de bandejas fijo

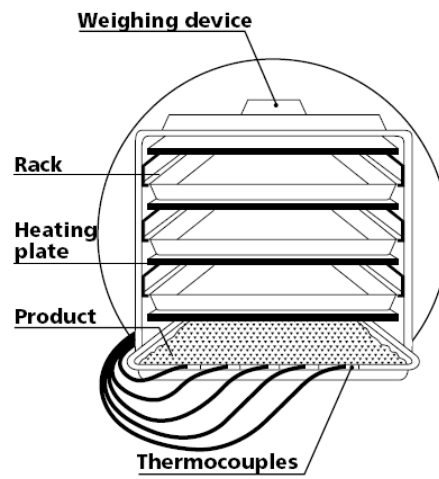
**Fuente:** [http://www.maclab.net/images/dryer\\_2.jpg](http://www.maclab.net/images/dryer_2.jpg)

### 1.5.2.2. Sistema de portabandejas removible

Este sistema es un modulo de portabandejas removible que facilita el mantenimiento de las bandejas, portabandejas y cámara de trabajo (ver figura 34 y 35).



**Figura 13.** Cámara de trabajo con módulo portabandejas removible industrial  
**Fuente:** Catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.



**Figura 14.** Cámara de trabajo con los sensores de temperatura  
**Fuente:** Catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

La temperatura de las bandejas y por lo tanto del producto son controlados por termocuplas, ubicadas estratégicamente a una distancia específica de manera que se minimice los errores o diferencias grandes de temperatura, se busca también que la temperatura de la bandeja sea homogénea. Las bandejas por lo general tienen un solo diseño, pero de acuerdo a su sistema de transmisión de calor hacia el alimento presentan ciertas variaciones en su forma.

### **1.5.3. Sistema de calentamiento del producto**

El sistema de calentamiento de las bandejas se utiliza para la tercera parte del proceso de liofilización (Deserción o desecación secundaria), este sistema comienza su funcionamiento en el momento que el sistema de control detecta la temperatura y presión deseada en el producto.

Este sistema se clasifica según su fuente de calor de la siguiente manera:

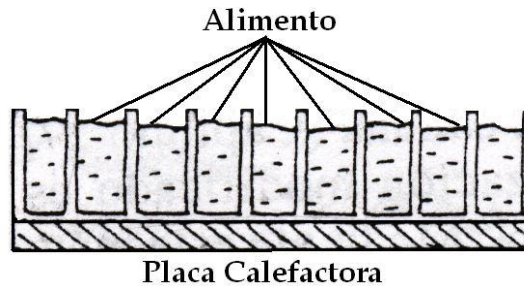
- Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas.
- Sistema de calentamiento por líquido calefactor.

#### **1.5.3.1. Calentamiento por resistencias eléctricas**

Dentro de este modelo hay cuatro formas diferentes de transferencia de calor hacia el producto, y de acuerdo a eso el diseño de la bandeja varía, estos modelos son:

- **Calentamiento por contacto directo**

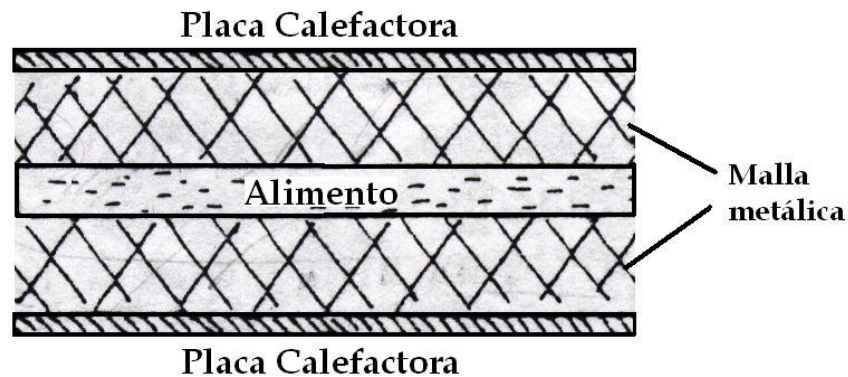
En este sistema, el alimento va colocado en bandejas compartimentadas que descansan sobre placas calefactoras (ver figura 36). En estas instalaciones la liofilización es más lenta, ya que el calor se transmite por conducción tan solo por una cara del alimento. Además, el contacto entre el alimento a congelar y la superficie calefactora es desigual, lo que reduce la velocidad de transferencia calórica. Por otra parte, se produce también una caída de presión en la masa de la capa superior e inferior.



**Figura 36.** Esquema de calentamiento por resistencias eléctricas de contacto directo.  
**Fuente:** Tecnología del procesado de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

- **Calentamiento por sistema acelerado**

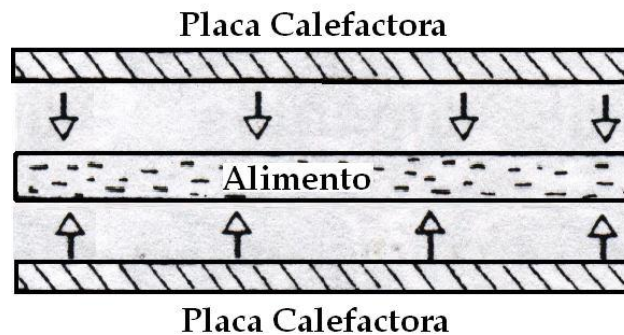
En estas instalaciones entre el alimento y las placas calefactoras existe una malla metálica (ver figura 37), esto hace que la transferencia de calor sea más rápida que a través de placas continuas y que el vapor se elimine de la superficie del alimento con mayor facilidad, lo que reduce el tiempo de liofilización.



**Figura 37.** Esquema de calentamiento por resistencias por sistema acelerado  
**Fuente:** Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

- **Calentamiento por radiación.**

En estas instalaciones el alimento está distribuido en bandejas en capas de poco grosor aquí se calienta por radiación (ver figura 38). Este sistema de calentamiento es más uniforme que por conducción ya que las irregularidades de la superficie y del alimento tiene menos influencia sobre la velocidad de transferencia calórica. Además, no se produce una caída de presión en la masa del alimento, por lo que las condiciones de liofilización se mantienen constantes. Por otra parte, no es preciso que exista un contacto íntimo entre el alimento y la superficie calefactora, por lo que pueden utilizarse bandejas planas, que son más baratas y de más fácil limpieza.



**Figura 38.** Esquema de calentamiento por resistencias eléctricas por radiación.

**Fuente:** Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

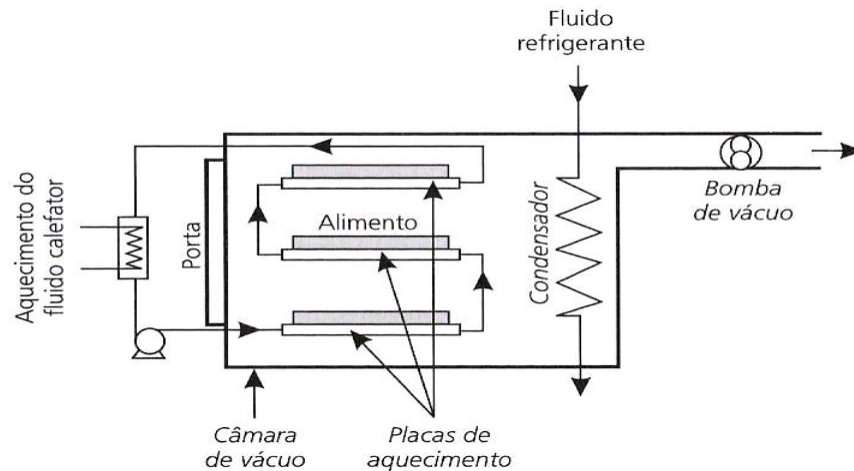
- **Calentamiento Dieléctrico y por microondas:**

Los calentadores dieléctricos y por microondas tienen una aplicación potencial en la liofilización pero hasta el momento no han sido utilizados para este propósito en instalaciones industriales. La liofilización por microondas es un proceso difícil de controlar ya que el factor de pérdida del agua es más elevado que el del hielo y si en algún punto del alimento llegara a fundirse se provocaría una reacción de sobrecalentamiento en cadena.

### 1.5.3.2. Sistema de calentamiento por fluido calefactor

En este sistema de calentamiento, las bandejas son calentadas por contacto directo pero esta vez la fuente de calor es un serpentín distribuido a lo largo del portabandejas (ver figura 39); el serpentín contiene un fluido que realiza un ciclo completo a través de todas las bandejas y regresa a su punto inicial, el cual es una resistencia que calienta previamente el fluido antes de comenzar su recorrido de

trabajo, luego de ser calentado, este pasa a través de una bomba de pequeñas dimensiones que impulsa el fluido a través de las bandejas.



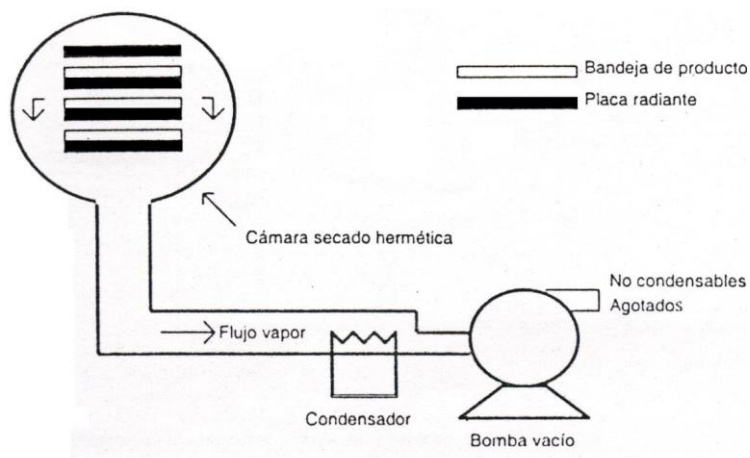
**Figura 39.** Circuito de calentamiento por fluido calefactor

**Fuente:** Tecnología del procesado de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

Este sistema es mucho menos eficiente porque las bandejas no van a estar a la misma temperatura ya que el calor perdido entre el paso por una bandeja y otra, hace que la transferencia de calor no sea la misma y los productos no van a salir con las mismas condiciones.

#### 1.5.4. Sistema de vacío

El sistema de vacío busca extraer el aire para disminuir la presión dentro de la cámara; además extrae el vapor contenido en el producto a liofilizar; el sistema está compuesto de una bomba de vacío que en algunos liofilizadores industriales es de dos etapas (ver figura 40), pero en la mayoría de liofilizadores convencionales y en liofilizadores pilotos se utilizan sistemas de vacío de una sola etapa.



**Figura 40.** Representación gráfica del sistema de vacío de un liofilizador.

**Fuente:** Deshidratación de alimentos. Gustavo Barbosa, 2000

La bomba de vacío (ver figura 41) normalmente utilizada es una bomba de paletas la cual es conectada directamente a la cámara de condensación para absorber el vapor de agua del producto a secar y llevarlo hacia el condensador para extraerlo en forma líquida.



**Figura 41.** Bomba de vacío característica de sistemas de liofilización.

**Fuente:** [www.etelstar.com](http://www.etelstar.com)

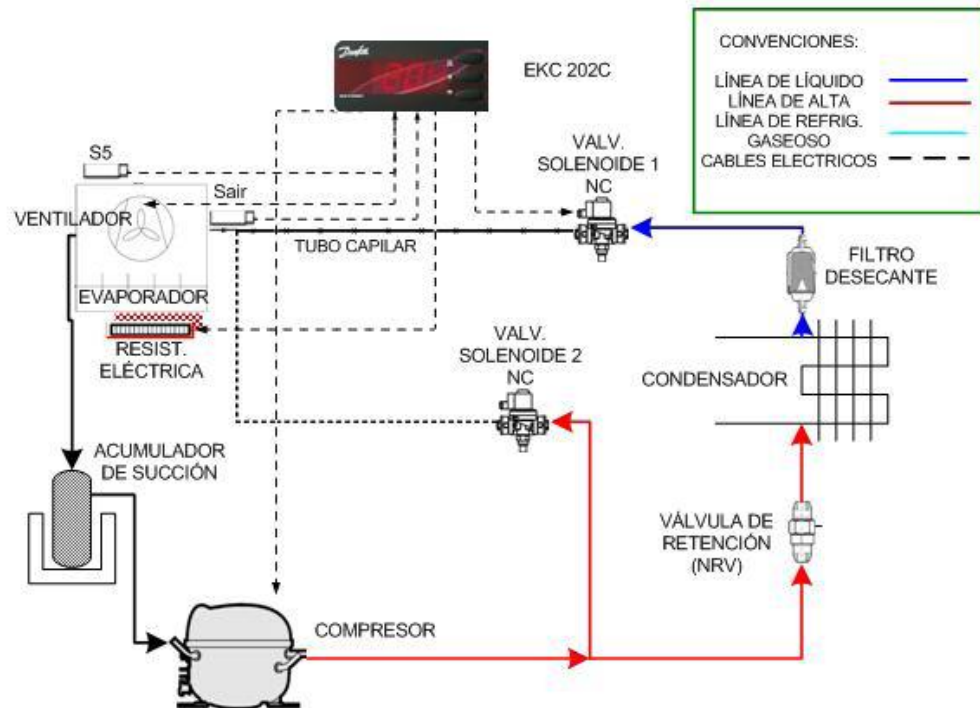
La bomba de vacío se activa al llegar a una temperatura en la cámara de trabajo inferior a los  $-40^{\circ}\text{C}$  y la presión debe bajarse a menos de 1 Torr.

En liofilizadores piloto se utilizan bombas de vacío resistentes a la corrosión de caudales entre 65 a 500 Lts/min.

Se utilizan válvulas entre la bomba y la cámara de condensado para protección.

#### **1.5.5. Sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración de un liofilizador es un sistema de compresión de vapor convencional compuesto por compresor, condensador, evaporador y válvula de estrangulamiento. Estos sistemas por las condiciones de temperatura del producto y por ende de presión del refrigerante se denominan sistemas de baja. A nivel industrial el sistema de refrigeración puede variar presentando configuraciones como por ejemplo de dos etapas de compresión; el sistema de control de refrigeración para una instalación industrial lo mínimo que puede ser es un control continuo (ver figura 42) además de manejar otros parámetros de alta sensibilidad.



**Figura 42.** Sistema de refrigeración convencional para baja temperatura.

**Fuente:** Proyecto de grado “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el control de diferentes tipos de descongelamiento en un sistema de refrigeración”, Universidad Industrial de Santander.

En liofilizadores industriales (ver figura 43) se diseñan sistemas de refrigeración de dos etapas de compresión para lograr bajar hasta las temperaturas requeridas dependiendo también del producto a liofilizar y se incorporan componentes que aseguren un proceso de mayor precisión, calidad e higiene.



**Figura 15.** Detalle compresores de doble etapa.

**Fuente:** [www.etelstar.com](http://www.etelstar.com)

El sistema de refrigeración de un liofilizador debe tener la capacidad de llevar el producto a liofilizar hasta una temperatura de aproximadamente  $-40^{\circ}$  centígrados y mantenerlo en esa temperatura mientras se logra la extracción total de vapor de agua por medio de la bomba de vacío.

En el caso de un liofilizador piloto, la gran mayoría poseen condensadores con capacidades entre 6 y 12 kg de hielo. El sistema de refrigeración es libre de CFC.

#### **1.5.6. Sistema de control**

El sistema de control usado normalmente en los diferentes tipos de liofilizadores utiliza diferentes elementos de control tales como PIC con PC de tipo industrial, autómatas programables industriales, microprocesadores, etc.; estos controladores tienen una interface con el operario mediante un panel de control que es instalado en el exterior de la maquina y el cual indica presiones, temperaturas y todo lo necesario para el correcto funcionamiento del proceso.

Para mayor precisión en los datos obtenidos por el procesador se utilizan sensores o medidores de alta calidad tanto de presión como de temperatura y humedad los cuales se encuentran distribuidos por todo el sistema y por medio de ellos podemos obtener datos exactos de temperaturas del producto, de bandejas, de cámara, etc.; además presión de vacío, tiempo del proceso, entre otros.

#### **1.5.6.1. Sistema de control basado en PLC y sistema SCADA.**

Es un sistema de control utilizado en los liofilizadores piloto (ver figura 44) y cuenta con las siguientes características:

- Pantalla de color.
- Posibilidad de programar el ciclo de liofilización (Temperatura, presión de vacío y tiempo de proceso), con posibilidad de visualizar el diagrama del ciclo
- Monitoreo de alarmas.



**Figura 16.** Fotografía de un banco de control de un liofilizador piloto.

**Fuente:** [www.etelstar.com](http://www.etelstar.com)

A nivel industrial el sistema de control ofrece la posibilidad de realizar la operación multitarea por un medio sistematizado, en una estación de trabajo con un operador se llevan a cabo operaciones de una unidad o unidades múltiples, incluyendo las funciones de control supervisor y de adquisición de datos (ver figura 45). El uso del teclado y las acciones con el puntero y los botones del ratón, hacen que la interacción del operador sea simple y amigable.



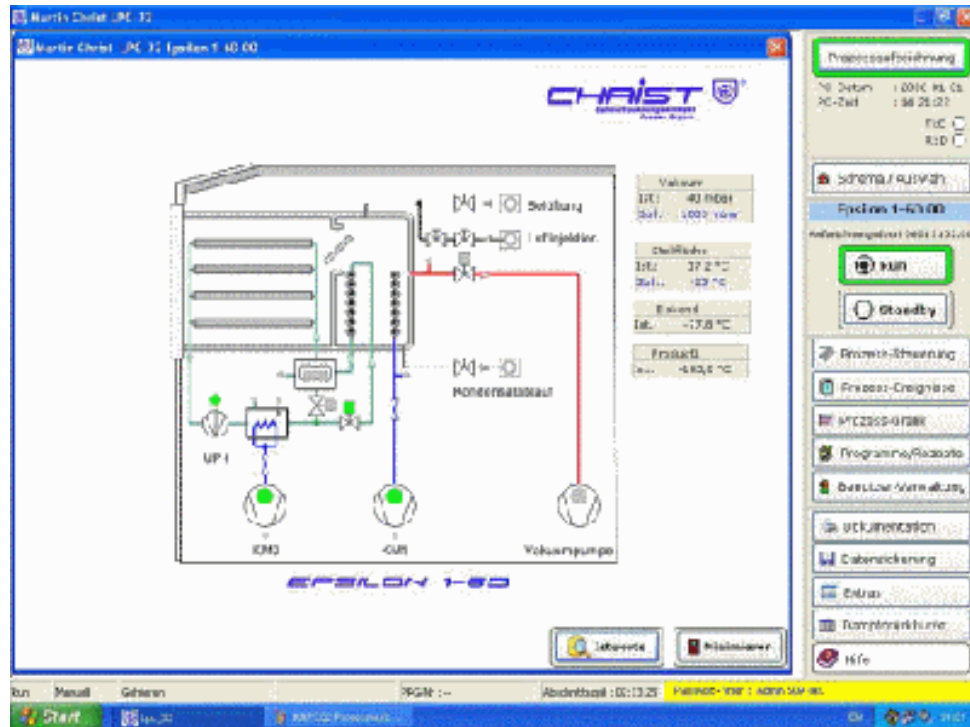
**Figura 45.** Fotografía de panel de control digital de membrana para un liofilizador piloto

**Fuente:** Video “CUDDON Freeze Dry”, Autor: Empresa CUDDON

Las categorías típicas de información visualizada (ver figura 46) en el control de un proceso de liofilización a nivel industrial son las siguientes:

- **Clave de acceso:** Hay tres niveles de acceso, identificados del siguiente modo: Operador, Gestión técnica y Mantenimiento. Se pueden definir otros niveles de acceso.
- **Recetas:** Las fórmulas o recetas incluyen un conjunto de parámetros de ciclo, por ejemplo, variables tales como temperatura, vacío, presión y tiempo, para cada etapa del proceso.
- **Inicio del ciclo:** Antes de comenzar con un lote, el operador puede seleccionar un perfil del ciclo para su revisión y aprobación.
- **Historial:** El operador puede ver los datos del historial de un lote.
- **Diagramas:** El operador puede seleccionar y monitorizar la operación por medio de varios diagramas esquemáticos del liofilizador.





**Figura 47.** Fotografía de la interfaz de un sistema de control PLC para un liofilizador piloto

**Fuente:** <http://bit.ly/dkf5v2>

### 1.5.7. Sistema de descongelamiento

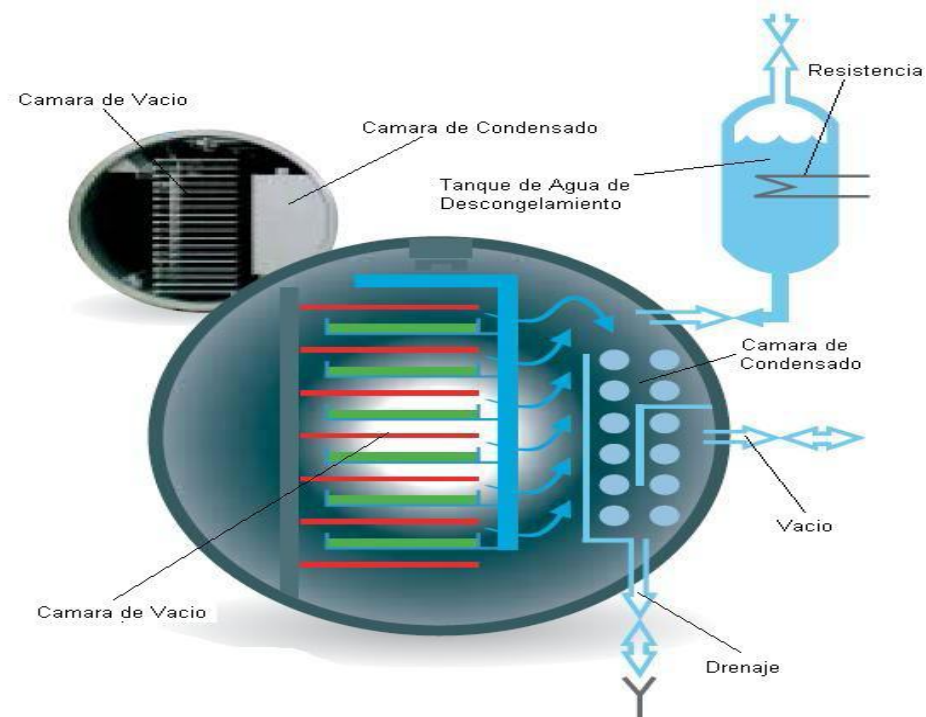
El sistema de descongelamiento de un liofilizador se puede realizar por cuatro métodos:

- Descongelamiento por líquido caliente.
- Descongelamiento por vapor de agua.
- Descongelamiento por gas caliente.
- Descongelamiento por resistencias eléctricas.

### 1.5.7.1. Descongelamiento por líquido caliente

Este sistema de calentamiento utiliza un tanque con agua o salmuera la cual antes de ser enviada al condensador previamente congelado hasta su máxima capacidad, es calentada por medio de una resistencia hasta casi los 100°C (ver figura 48), esta agua caliente llega a la parte superior de la cámara de condensación y cae por gravedad rociando el serpentín cubierto del hielo previamente extraído del producto liofilizado. El agua que cae es re circulada y de nuevo llevada al tanque para su posterior uso.

Este sistema es económico pero de poco uso a nivel industrial.

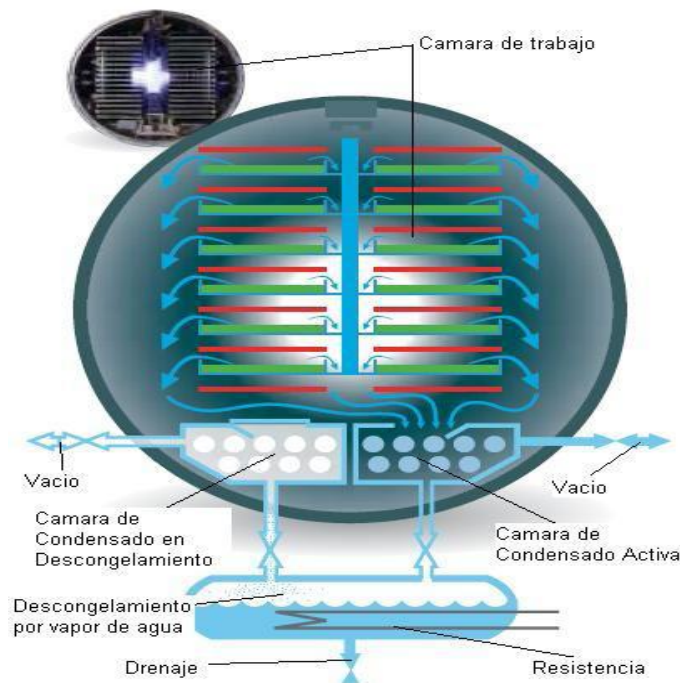


**Figura 48.** Sistema de doble cámara cilíndrico con descongelamiento por agua caliente.

**Fuente:** catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

### 1.5.7.2. Descongelamiento por vapor de agua

Este sistema de calentamiento utiliza vapor de agua almacenada en un tanque y calentada previamente por una resistencia que lleva el agua a una temperatura superior a los 100°C, se utiliza para cualquier configuración tanto geométrica como de ubicación del sistema de condensación (ver figura 49), la diferencia con el anterior es que el tanque de almacenamiento de agua está en la parte inferior de la cámara de condensación y el vapor sube a presión para descongelar la cámara inactiva mientras que por el otro lado está cerrada la válvula y la otra cámara se está congelando.



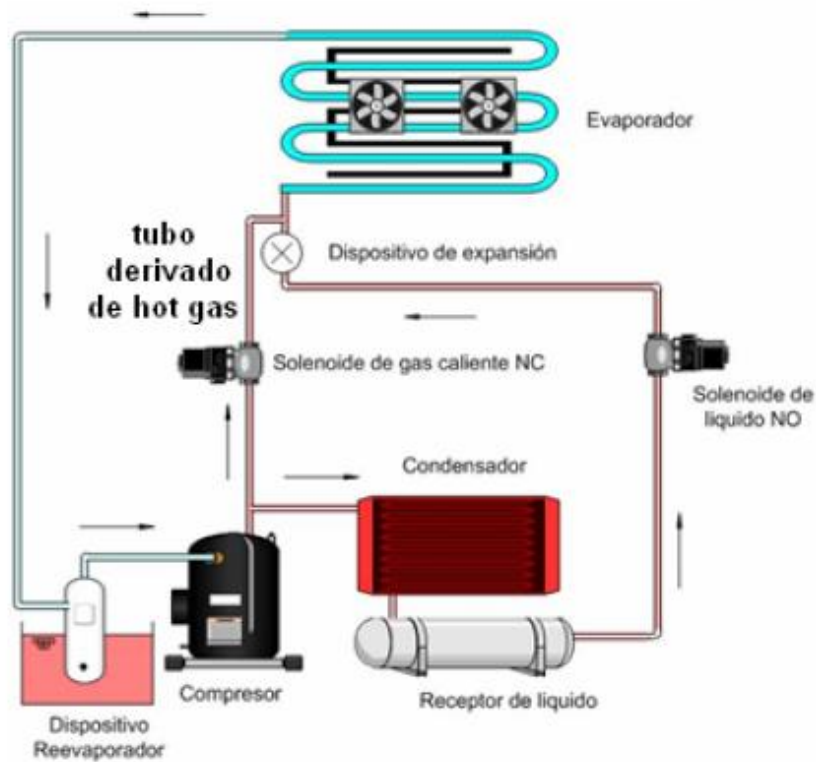
**Figura 49.** Sistema de doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento por vapor

**Fuente:** Catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying

### **1.5.7.3. Descongelamiento por gas caliente**

El deshielo con gas caliente tiene muchas variaciones, todas las cuales en alguna forma usan como fuente de calor el gas caliente descargado por el compresor para deshelar al evaporador.

Este sistema consiste en la instalación de una válvula solenoide en un tubo de desviación instalado entre la descarga del compresor y el evaporador. Cuando la válvula solenoide se abre, el gas caliente de la descarga del compresor viaja por el tubo de la desviación del condensador y entra al evaporador justamente adelante de la válvula de control del refrigerante (ver figura 50). El deshielo se obtiene a medida que el gas caliente cede su calor al evaporador frío y lo condensa hacia el estado líquido. Algo de refrigerante condensado permanece en el evaporador mientras que el resto regresa al compresor donde es evaporado por el calor de la compresión y re circulado al evaporador.



**Figura 17.** Sistema de descongelamiento por gas caliente

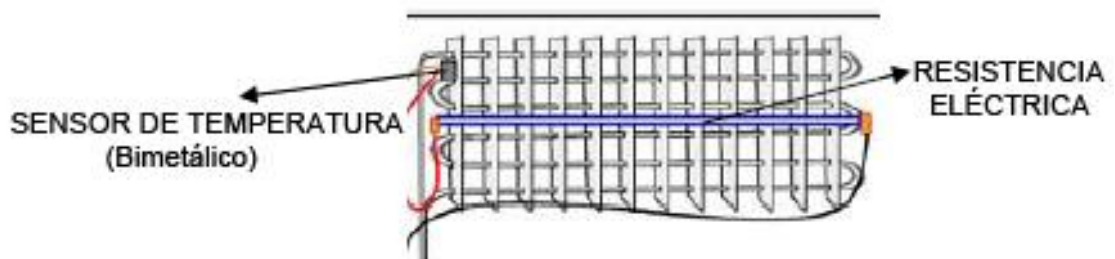
**Fuente:** Proyecto de grado “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el control de diferentes tipos de descongelamiento en un sistema de refrigeración”, Universidad Industrial de Santander.

Este método de deshielo tiene varias desventajas ya que el líquido no se vaporiza en el evaporador durante el ciclo de deshielo, estará muy limitada la cantidad de gas disponible en el compresor. A medida que progresa el descongelamiento, más líquido permanece en el evaporador y menos refrigerante regresa al compresor para su recirculación, con el resultado de que el sistema tiende a agotar el calor antes que evaporador este completamente deshelado.

Otra desventaja más seria de este método es la posibilidad de que una capa pesada de refrigerante líquido regrese al compresor y cause daño en el mismo. Esto es fácil que ocurra a principio del ciclo de deshielo o inmediatamente después que el ciclo se ha terminado.

#### 1.5.7.4. Descongelamiento por resistencias eléctricas

Con frecuencia se utilizan calentadores de resistencia eléctrica ubicados en las aletas del evaporador, calentándolas directamente (ver figura 51). En el ciclo de descarche las aletas se calientan por acción de las resistencias transfiriendo por conducción a los tubos del evaporador la energía calórica cedida por aquellas, a través de los cuellos de contacto de las aletas.

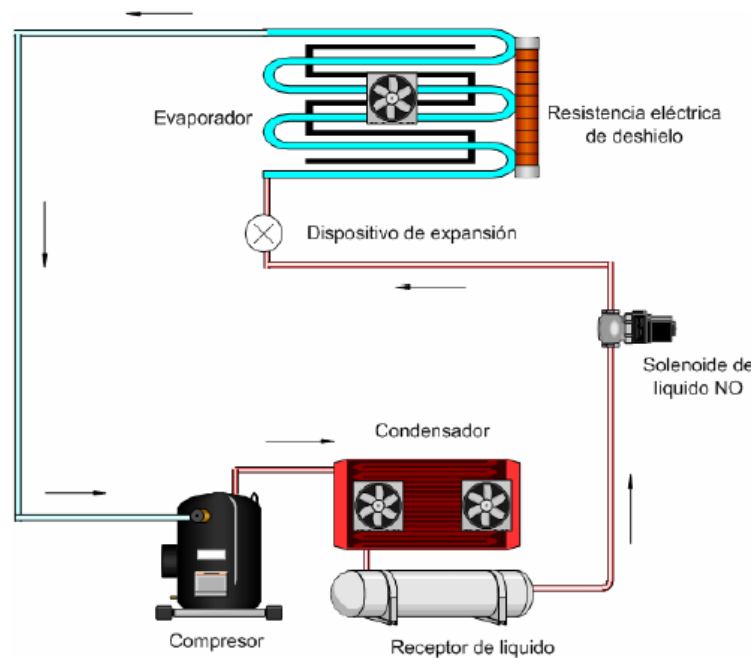


**Figura 18.** Evaporador equipado con resistencias eléctricas

**Fuente:** [www.repairclinic.com](http://www.repairclinic.com)

Este ciclo puede ser arrancado y detenido manualmente o puede usarse un contactor de tiempo para tener descongelación automática. En cualquier caso el descongelamiento es el mismo. El ciclo de deshielo se inicia cerrando una válvula solenoide en el tubo de líquido lo que causa que el evaporador sea evacuado, después de lo cual el ciclo de compresión se detiene en el control de baja presión.

Al mismo tiempo se energizan los elementos de calentamiento del evaporador (resistencias eléctricas) y se apagan los ventiladores de manera que el calor no es expulsado del espacio refrigerado (ver figura 52). Después que se ha deshielado el evaporador, los calentadores son desenergizados y el sistema se pone en operación abriendo el solenoide del tubo de liquido para arrancar los ventiladores del evaporador. Este método tiene un menor costo inicial pero un mayor coste de operación y se aplica en sistemas pequeños.



**Figura 19.** Sistema de descongelamiento por resistencias eléctricas.

**Fuente:** Proyecto de grado “Diseño y construcción de un banco de pruebas para el control de diferentes tipos de descongelamiento en un sistema de refrigeración”, Universidad Industrial de Santander.

## **2. EVALUACION DEL PROCESO**

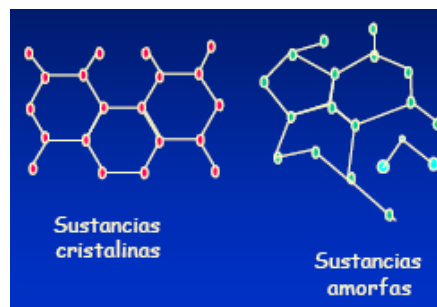
### **2.1. DESCRIPCION DEL PROCESO.**

Si realizamos un breve estudio de los métodos convencionales de deshidratación, encontramos que el calor que se suministra para la eliminación de agua del producto se puede transmitir sea por corrientes calientes de aire seco o por contacto directo con superficies solidas de alta temperatura; este calor empleado para la concentración de los productos altera las características organolépticas y provoca pérdidas del valor nutritivo puesto que la eliminación de agua es por un proceso evaporativo. En la liofilización el producto se conserva también por reducción de su actividad de agua, pero en este caso no se calienta en el estado original sino cuando el producto está congelado, llevándose a cabo el aumento de temperatura en un ambiente de baja presión, con lo que sus características organolépticas y su valor nutritivo resultan menos afectados debido a que la eliminación de agua es por sublimación y no por evaporación.

El enfoque que se le dio a este proyecto está orientado hacia la investigación de la aplicabilidad de un proceso de liofilización hacia algunas frutas, buscando promover el desarrollo agroindustrial de la región y dar a conocer el método de deshidratación al vacío, para lo cual se definió el diseño y construcción de un liofilizador piloto en el que se reproduzcan los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial.

El proceso comienza con la preparación de la fruta sea o no que se tenga que cortar para disminuir su tamaño y así distribuirlo de forma correcta en las bandejas; después sigue la congelación del producto que se realiza en una

instalación convencional siendo en algunos casos exterior al liofilizador, 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 (ver figura 52) que da lugar a la formación de unos canales por los que el vapor de agua pueda escapar.



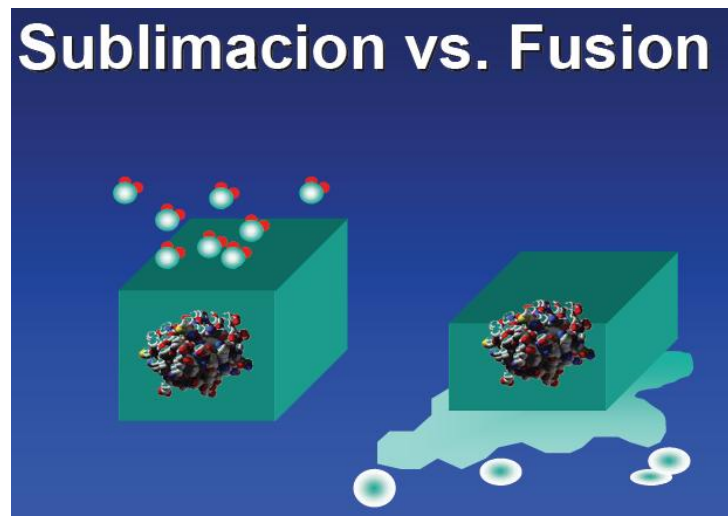
**Figura 53.** Esquema del resultado de la congelación de las sustancias

**Fuente:** <http://bit.ly/bqEJMU>

En general podemos decir que una congelación adecuada es la base de que el producto liofilizado presente óptimas condiciones de aspecto, conservación de sus propiedades y rápida rehidratación. En instalaciones externas de congelación el producto congelado se lleva a la cámara de liofilización en donde se debe llevar su temperatura por debajo de  $-40^{\circ}\text{C}$ , en ese punto se baja la presión en la cámara mediante una bomba de vacío por debajo de 610 Pa (0,0061 bar), una vez se ha logrado el vacío se comienza a suministrar calor al producto a través de las resistencias de calentamiento del portabanderas con el fin de acelerar la sublimación.

En el caso de que la congelación se realice dentro del liofilizador tanto el evaporador como el serpentín condensador previenen el retorno del vapor de agua

hacia el producto, en el periodo siguiente se mantiene el vacío suficientemente alto, con la presión en el liofilizador por debajo de la presión de vapor en la superficie del hielo y se controla el calor de manera que su intensidad sea un poco menor que la que se requeriría para derretir el hielo (ver figura 53), de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie hacia adentro. En esta fase llamada desecación primaria el producto se sublima hasta un contenido en agua del 15% (sobre su peso húmedo).



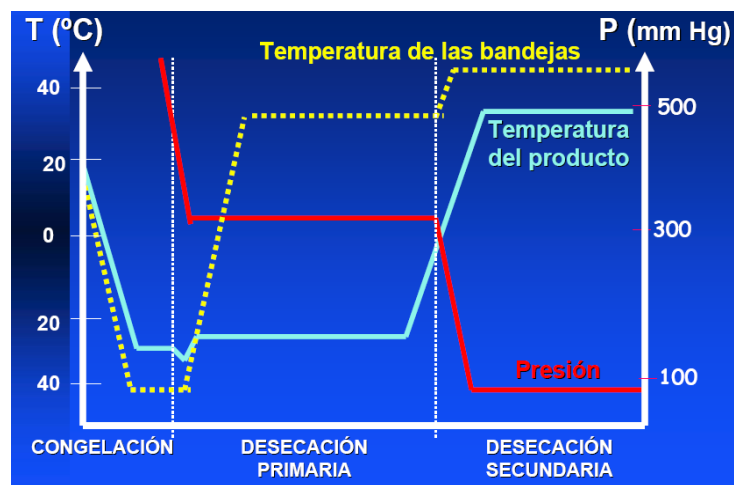
**Figura 20.** Diagrama representativo de la respuesta al adecuado suministro de calor

**Fuente:** <http://bit.ly/9VuWTK>

La última etapa del secado llamada desecación secundaria comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando, el equipo se mantiene a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la

sublimación del hielo (ver figura 55). En este punto el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2% (sobre su peso húmedo).

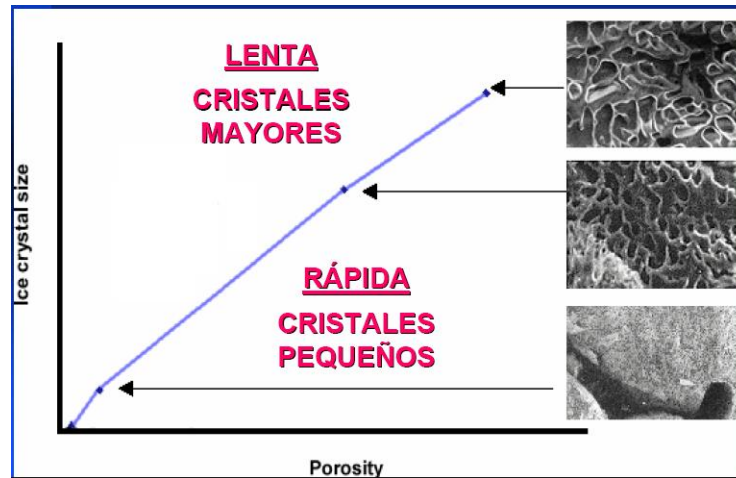
En el siguiente diagrama se observa el comportamiento de temperatura del producto, las bandejas y la presión de la cámara durante las tres etapas de la liofilización.



**Figura 55.** Diagrama de las fases de la liofilización

**Fuente:** <http://bit.ly/9VuWTK>

Ya que el alimento congelado permanece rígido durante la sublimación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual produce una estructura seca, porosa y esponjosa; por eso los alimentos liofilizados se reconstituyen rápidamente pero tienen que ser protegidos mediante un envase adecuado contra la absorción de humedad atmosférica y oxígeno (ver figura 56).



**Figura 56.** Diagrama de porosidad según el tipo de velocidad de congelación

**Fuente:** <http://bit.ly/9VuWTK>

## 2.2. ANALISIS DEL PROCESO

Colombia es un país rico en flora y fauna de la cual en la primera encontramos grandes variedades de frutas, verduras, flores y demás vegetales que pese a ser cultivados todo el año presentan problemas, en algunos casos por la falta de manejo de postcosecha en cuanto a su deterioro y su almacenamiento debe darse en condiciones que involucren una cadena de frío, o deben ser transformados inmediatamente.

Está muy claro el tema de que sin ciencia y tecnología Colombia no va para ningún sitio, es así como la liofilización en un escenario como el nuestro presenta una extraordinaria alternativa en cuanto al aumento del valor agregado de los productos agroindustriales, con una consecuente prolongación en el tiempo de vida útil de los mismos. En el país actualmente nos quedamos en el tema de la deshidratación convencional, que si bien es cierto es un extraordinario método, en otras latitudes conocen los otros métodos que son aquellos a los que apuntan el mercado local y el del exterior.

El país cuenta con dos empresas medianamente grandes que le apuntaron al tema de la liofilización, quienes permanecen totalmente colmadas de trabajo en términos que no tienen ya capacidad ociosa y requieren expandirse, y la federación de cafeteros que posee los equipos más grandes del mundo dedicados exclusivamente a la producción de café liofilizado. Se requiere personal capacitado y equipos que sean capaces de transformar el producto fresco inicial en otro de similares características, pero libre de uno de los factores que más permiten la contaminación que es el agua. Los productos de escasa actividad acuosa tienen unas ventajas comparativas extraordinarias gracias a que se preservan más en el tiempo, no pierden sus propiedades y su peso se reduce de tal forma que al ser transportado un producto terminado el precio del flete se reduce en un 90% que es aproximadamente la misma reducción que se da en promedio en la mayoría de productos.

Los productos obtenidos por liofilización son limpios porque el método impuesto por efectos de bajas temperaturas y bajas presiones permite la asepsia casi completa de estos; esto sumado a la liofilización de productos ecológicos donde el valor agregado obtenido será el doble.

En el campo de la farmacología el estudiante de liofilización estará en capacidad de realizar concentraciones de microorganismos útiles para el ser humano, especialmente en la producción de vacunas, sueros en polvo etc.

El ideal, sería poder conservar un producto y encontrarlo absolutamente idéntico en el momento, sea cual sea el tiempo transcurrido, para ello no solo es necesario conservar su integridad física y la composición química, de los más mínimos componentes, sino también mantener el inicial reparto de estas sustancias en la masa que los contiene y en el caso de los tejidos animales o vegetales, respetar escrupulosamente su armoniosa arquitectura celular.

### **2.2.1. Ventajas de la Liofilización**

- La temperatura a que es sometido el producto, está por debajo de aquella a la que muchas sustancias inestables sufren cambios químicos.
- Gracias a que todo el proceso se realiza bajo congelamiento total del producto, no se produce formación de espuma ni burbujas, lo que desnaturaría las proteínas de este.
- La Desecación es de manera progresiva y continuada
- Retiene las características originales del producto, incluyendo: Color, forma, tamaño, sabor, textura, nutrientes.
- El producto final liofilizado se presenta idéntico al producto que ingreso ,salvo ser una estructura presentada como un armazón sólido sumamente poroso ,ocupando prácticamente el mismo espacio y volumen, por lo cual este producto queda completamente desmenuzable debido a su estructura porosa libre de agua, debido a esto la solubilidad es rápida y completa.
- Estabilidad a temperatura ambiente.
- No es necesario el almacenamiento en frío.
- Al ser despreciable la humedad remanente, el producto puede ser almacenado por tiempo limitado, constituyendo productos de larga estabilidad.
- No se producen residuos.
- El producto final es liviano y fácil de manejar.
- El costo del transporte disminuye por bajo peso y ausencia de refrigeración.
- Ofrece óptima calidad en el producto seco comparado con otros métodos de secado.
- Aplicabilidad para la producción y distribución de los lotes

Esto se resume en una estabilidad óptima, buena y rápida solubilidad, conservación ilimitada, rápida disponibilidad de uso entre otras, fácil almacenamiento, fletes reducidos entre otras muchas ventajas.

### **2.2.2. Desventajas de la Liofilización**

- Elevado costo de inversión de las instalaciones y equipos.
- Necesidad de instalaciones anexas con gran costo de manutención.
- Necesidad de personal calificado en la operación y mantenimiento de los equipos.
- Proceso largo, normalmente de varios días.
- Requiere de numerosas etapas concertadas.
- La preparación de forma incorrecta de los distintos lotes puede desembocar en un estancamiento de la viabilidad y/o en pérdidas en la estabilidad de los caracteres de los microorganismos
- Es un procedimiento costoso debido al elevado consumo energético.

### **2.3. IDENTIFICACION DE PARAMETROS**

Con el objetivo de lograr el proceso de liofilización completo se determinaron los parámetros más importantes que definen el nuevo diseño del liofilizador piloto que se planteó como alternativa para poder reproducir el proceso en condiciones idénticas que un equipo industrial y de esta manera seguir con el estudio de la aplicabilidad de esta tecnología en el medio local.

Se tuvo en cuenta, que el equipo tendrá una aplicación netamente académica para el estudio de la aplicabilidad del proceso de liofilización y que se instalará en el Laboratorio de Refrigeración y Aire Acondicionado de la Escuela de Ingeniería

Mecánica de la Universidad Industrial de Santander para su proceso de pruebas y puesta a punto.

A continuación se describen brevemente los parámetros fundamentales tomados del análisis del proceso de liofilización y que son la base con la que se definieron las especificaciones para el diseño del equipo.

- Antes de definir los parámetros de las etapas de la liofilización se realizó un estudio detallado del proyecto anterior para identificar las bases utilizadas en este diseño, algunos de los componentes que se reemplazarían como la cámara de trabajo, y el cierre hermetico.
- Teniendo en cuenta las dimensiones de los componentes del proyecto anterior, el producto, la carga y la distribución de este en las bandejas se define un tamaño de bandejas y las dimensiones del espacio de trabajo para pasar a las dimensiones de la estructura o mueble que soporta la cámara.
- Como en el proceso de liofilización se trabaja principalmente con alimentos y productos orgánicos se requiere por norma la utilización de un material apropiado para la manipulación y el trabajo con este tipo de productos.
- Definidas las dimensiones de la cámara de trabajo y la carga de producto a liofilizar, se determinan por medio del estudio detallado de las etapas de la las características de todos los subsistemas componentes del liofilizador piloto, tales como refrigeración, vacío, calentamiento y descongelación.

- Ya por último con la revisión de todos los requerimientos definidos, se fijan todos los elementos y detalles finales del equipo.

## **2.4. DETERMINACION DE REQUERIMIENTOS**

### **2.4.1. Requerimientos de uso.**

- **Practicidad.** Se debe tener en cuenta como factor primordial la relación producto-usuario, es decir que el sistema sea de fácil manejo buscando que el operario que manipule el equipo pueda realizar la tarea con la mayor facilidad y eficiencia.
- **Seguridad.** El equipo debe ser seguro tanto para el operario como para su entorno, debe contar con elementos de protección en sus componentes mecánicos y eléctricos, previniendo así cualquier riesgo de accidentes.
- **Mantenimiento.** Se debe buscar que el sistema sea de fácil mantenimiento con elementos que sean de fácil montaje y desmontaje para su mantenibilidad ya que el sistema será sometido a trabajo constante.
- **Manipulación.** El equipo debe ser de fácil manipulación con elementos visibles y de fácil lectura, con señalización y fuerzas de accionamiento al alcance del operario.
- **Ergonomía.** la ergonomía es de mucha importancia ya que se busca la mayor reducción de esfuerzos en el operario y aumentar la eficiencia del proceso. El sistema debe ser cómodo para el operario, con medidas de trabajo apropiadas y en lo posible sencilla y compacta.

#### 2.4.2. Requerimientos de función.

- **Mecanismos.** El equipo debe contar con mecanismos sencillos y de fácil construcción por si en caso de necesitar cambio no tome mucho tiempo.
- **Accesibilidad.** La cámara de trabajo debe ser de fácil acceso para permitir al operario la fácil ubicación y retiro de los productos dentro de ella.
- **Versatilidad.** El sistema debe ser flexible a variaciones que se puedan presentar en el desarrollo del proceso, de manera que se pueda desarrollar con eficiencia para diferentes tiempos de producción o clases de productos.
- **Confiabilidad.** El liofilizador piloto garantizar que la tarea se desarrolle sin tener ningún efecto sobre la materia prima, se busca que los productos se deshidraten sufriendo los mínimos cambios posibles.

#### 2.4.3. Requerimientos estructurales.

- **Número de componentes.** El sistema debe contar con los elementos estrictamente necesarios que le permitan realizar perfectamente su función.
- **Estructurabilidad.** El sistema debe tener una estructura compacta con suficiente resistencia mecánica sobre la cual se apoyen todos sus componentes, con elementos de fácil montaje resistentes y ergonómicos.
- **Aislamiento.** Las paredes de la cámara deben contar con buen aislamiento para evitar pérdidas de energía a través de sus alrededores.

#### 2.4.4. Requerimientos técnico - productivos.

- **Bienes de capital.** Para la fabricación se debe requerir de componentes y elementos de fácil consecución a nivel regional y materiales disponibles en el mercado.
- **Mano de obra.** Para la fabricación y montaje del equipo se requiere personal con experiencia en el sector de refrigeración industrial, metalmecánica y procesos de fabricación de componentes o elementos mecánicos y estructurales.
- **Modo de producción.** Se debe buscar una producción seriada corta, limitada por el número de componentes con el fin de integrar los procesos, reducir costos y aumentar utilidades, comenzando desde el diseño de los elementos y la estandarización de ellos teniendo en cuenta medidas, desperdicio de material, planos, modelos, acabados. Etc.
- **Estandarización.** se debe buscar la estandarización de la mayoría de los componentes del equipo liofilizador piloto con el fin de tener la mayor parte de los elementos seleccionables en el mercado para de esta manera reducir costos de fabricación, importación, etc.

#### 2.4.5. Requerimientos económicos.

- **Costo.** Se busca un sistema de bajo costo con el objetivo de poder dirigirlo al sector de la pequeña y mediana agroindustria en Bucaramanga; en donde no se cuenta con los recursos para adquirir un sistema de alta tecnología.

- **Consumo.** Teniendo en cuenta el enfoque que se le da al diseño del sistema, se debe tener en cuenta que su consumo energético sea bajo para que el producto sea atractivo a las industrias.

## **2.5. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO**

Analizando cada uno de los parámetros más importantes implicados en el proceso de liofilización y teniendo en cuenta los requerimientos generales se determinaron las siguientes especificaciones para el diseño del Liofilizador Piloto:

### **2.5.1. Ubicación Geográfica.**

Para llevar a cabo el objetivo general de este proyecto de contribuir con la generación de una nueva alternativa económica, con el estudio de la implementación de un proceso de liofilización para la obtención de productos agroindustriales con un alto nivel de calidad, se requiere crear un escenario en el que se fortalezcan las competencias en este novedoso campo y se pueda dar continuidad al proceso de estudio mediante el desarrollo académico de los estudiantes del área de refrigeración. El lugar de ubicación del liofilizador Piloto será el área correspondiente al Laboratorio de Refrigeración y aire acondicionado de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

### **2.5.2. Dimensiones de trabajo.**

Para definir las dimensiones del equipo se tiene como principal parámetro de diseño la carga de producto que es de 10 Kg, con ésta carga se determinaron las dimensiones y el número de bandejas, además de las proporciones de la cámara de trabajo; las dimensiones de la estructura se definieron de acuerdo a la

distribución de los equipos de refrigeración y vacío; otro aspecto a tener en cuenta es que el equipo liofilizador en un equipo piloto, razón por la cual debe de ser de fácil manejo por parte del operador y de fácil traslado para efecto de pruebas, de acuerdo con esto se determinaron las siguientes dimensiones:

#### **2.5.2.1. Cámara de Trabajo.**

Diámetro: 60 cm

Profundidad: 90 cm

- **Dimensiones de las Bandejas.**

Alto: 3.3 cm

Ancho: 32.6 cm

Fondo: 50.6 cm

Número de bandejas: 5

#### **2.5.3. Material.**

Teniendo en cuenta las normas para administración de alimentos y medicinas FDA (Food and drug administration) y la norma de buenas Prácticas de fabricación GMP (Good Manufacturing Procedures), además de las normas de higiene para fabricación de bienes de consumo acorde a la norma internacional de calidad ISO 9001:2000, se definió la utilización de **Acero Inoxidable AISI 304** para la construcción tanto interna, de la cámara de trabajo y las bandejas, así como de toda la construcción externa del mueble, soportado en una estructura de ángulo coll roll.

#### 2.5.4. Especificaciones Técnicas.

Para el diseño básico y detallado de cada uno de los subsistemas constituyentes del liofilizador piloto se definieron algunas especificaciones técnicas basadas en las características del proceso; la carga de producto la temperatura y presión de la cámara de trabajo y las dimensiones de la misma, lo cuál fue la base para el posterior cálculo y selección de los componentes del equipo.

<b>Especificaciones Técnicas de Diseño</b>	
Carga de producto:	10 Kg
Superficie útil de carga por placa:	1600 cm <sup>2</sup>
Número de Placas:	5
Interdistancia entre las placas:	5.7 cm
Rango de Temperatura de las placas:	-40°C a 60°C
Capacidad del evaporador:	9000 BTU
Temperatura Final de la Cámara:	-30°C
Bomba de vacío:	8 CFM

**Tabla 1.** Especificaciones Técnicas de diseño.

### **3. EVOLUCION DEL PROYECTO.**

La región de Santander presenta una gran actividad agroeconómica que permite implementar investigaciones en el campo de la deshidratación de productos, principalmente para la competitividad y desarrollo de la industria agrícola.

Para la realización del estudio de la aplicabilidad del proceso se definió el diseño y construcción de un liofilizador piloto que cumpla con las especificaciones de diseño definidas en el estudio del proceso, que además de permitir reproducir los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial de una forma eficiente y práctica, presente como características principales su fácil manejo y ergonomía para crear un entorno agradable de trabajo para los estudiantes que realicen los posteriores estudios del proceso de liofilización.

#### **3.1. PRESENTACION DE ALTERNATIVAS**

En el campo de la liofilización existen varias alternativas posibles a desarrollar, sin embargo vemos que en la mayor parte de la industria los liofilizadores presentan una cámara de paredes cilíndricas debido a las ventajas que presta esta configuración respecto de la cámara de paredes planas.

Cabe resaltar que para el desarrollo del diseño se tomó como punto de partida la tesis de grado del año 2008 manteniendo algunos parámetros y subsistemas como:

- La cantidad de producto a liofilizar.

- Sistema de enfriamiento.
- Sistema de calentamiento.
- Los elementos de control y bomba de vacío.

Se analizaron los inconvenientes que se tuvieron en ese proyecto en cuanto a la configuración de la cámara, presentando deficiencias como la resistencia de las paredes sometidas a la presión de vacío; con esto tomo más fuerza la idea de desarrollar una cámara de paredes cilíndricas.

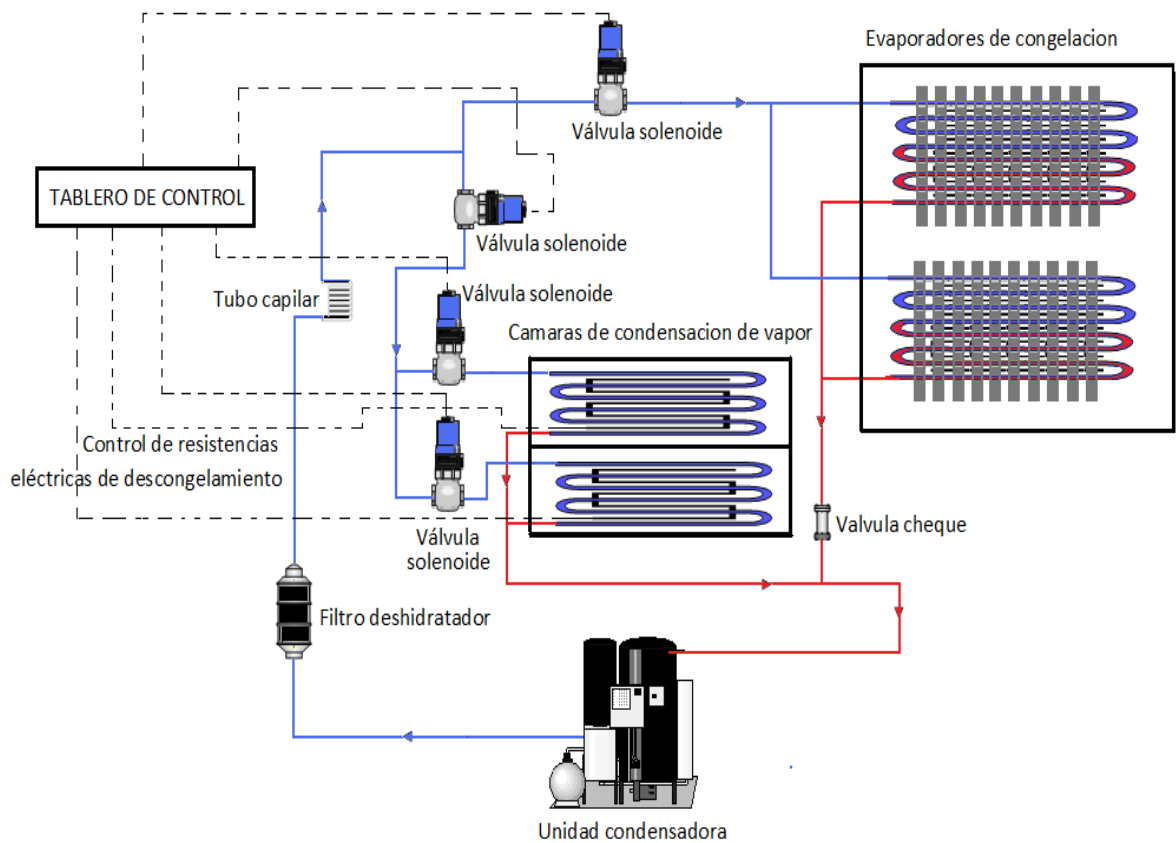
En la etapa preliminar del diseño se plantearon varias alternativas y configuraciones de diseño con las que se busca llevar a cabo el proceso de la manera más óptima y eficiente, en base a esto se desarrollo la parte funcional, luego se escogió la alternativa que funcionara y cumpliera con los requerimientos y a partir de esta se fue evolucionando, solucionando los problemas que a lo largo del proyecto se fueron presentando.

Otro aspecto fundamental es la visión académica hacia la que está orientado el diseño, ya que es un procedimiento experimental que no ha tomado fuerza en Colombia, por tal razón nos centramos en un diseño en el que se pueda realizar todo el proceso de pruebas.

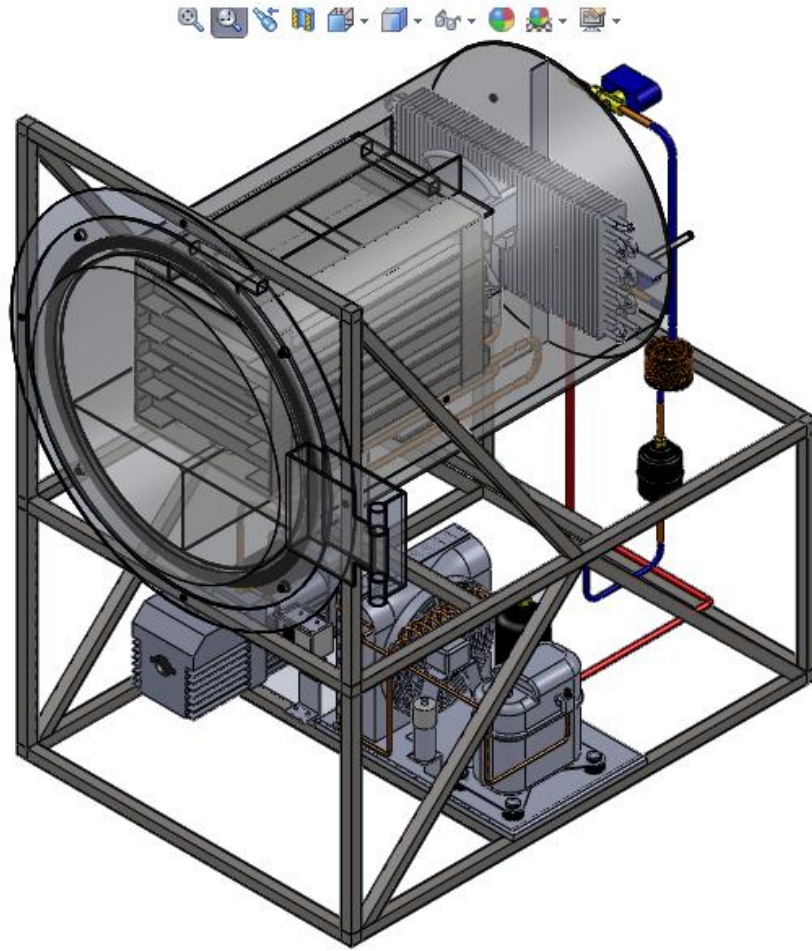
### **3.1.1. Alternativa de diseño 1.**

Consiste en un equipo de simple cámara de diseño cilíndrico y compacto en altura pero mayor en profundidad (ver figura 57), la cámara lleva un aislamiento de poliuretano de 5 cm de espesor que ayuda a mantener baja la temperatura del producto, el serpentín del evaporador está ubicado en la parte posterior de la cámara logrando una temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  en el producto; dentro de la cámara de trabajo se ubica el modulo portabandejas que contiene las bandejas con el

producto y el portabandejas con sus respectivas resistencias eléctricas, encargadas de acelerar el proceso de sublimación retirando la humedad presente en forma de vapor, el vapor es atrapado por un sistema de dos cámaras individuales que abren y cierran alternadamente controladas por medio de válvulas solenoides activadas cuando el condensador de cada cámara a congelado su capacidad máxima de vapor de agua, el descongelamiento de las cámaras se da por resistencias eléctricas cuando la cámara llega a la capacidad máxima de congelamiento, el agua procedente del descongelamiento drena a un tanque de almacenamiento ubicado en la parte inferior del equipo liofilizador (ver figura 58).



**Figura 57.** Esquema del sistema de refrigeración alternativa # 1.



**Figura 58.** Alternativa de diseño # 1 modelada en CAD.

El control de presión se hará por medio de manómetros que indiquen el nivel de presión a lo largo del proceso, la presión de vacío de 610 Pa dentro de la cámara se logra gracias a la bomba de vacío QUALITY modelo QVP-800 de 8 CFM ubicada en la parte inferior del equipo y está conectada a la cámara de trabajo por dos entradas en la parte inferior dentro de las cámaras condensadoras; la tapa de la cámara consiste en una puerta hermética asegurada con pernos y aislamiento

interno de poliuretano que garantice mantener el vacío logrado por la bomba y evite la transferencia de calor durante el proceso.

Se diseñara la configuración de tubería con el fin de adaptar la unidad condensadora actual del fabricante Tecumseh Europe con las siguientes características:

Modelo: TECUMSEH CAJ2432Z

Capacidad: 1500 Btu/hora

Refrigerante utilizado: R-404A

Voltaje / frecuencia: 220V / 60Hz

Potencia del motor: ¾ Hp

Desplazamiento: 18,3 cm<sup>3</sup>

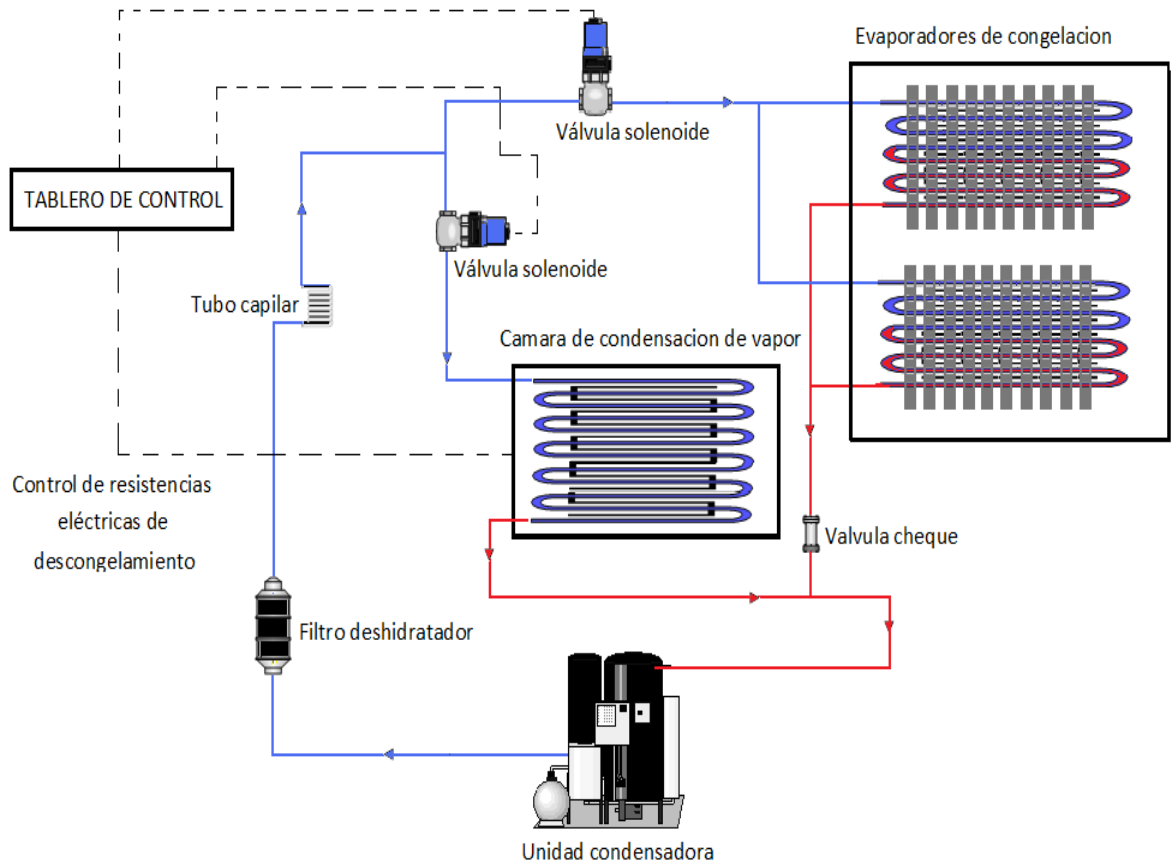
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✘ El sistema de doble cámara permitiría un proceso de retiro de humedad continuo.</li> <li>✘ Menor tiempo de proceso debido al intercambio de cámaras de condensación.</li> <li>✘ El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✘ Requiere de perforaciones adicionales para la cámara.</li> <li>✘ Mayor costo en la construcción debido a la condición hermética al interior de cada cámara de condensación.</li> <li>✘ Incremento en el número de válvulas solenoides necesarias para el control alternante de las cámaras.</li> <li>✘ Mayor consumo energético.</li> </ul>

**Tabla 2.** Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 1.

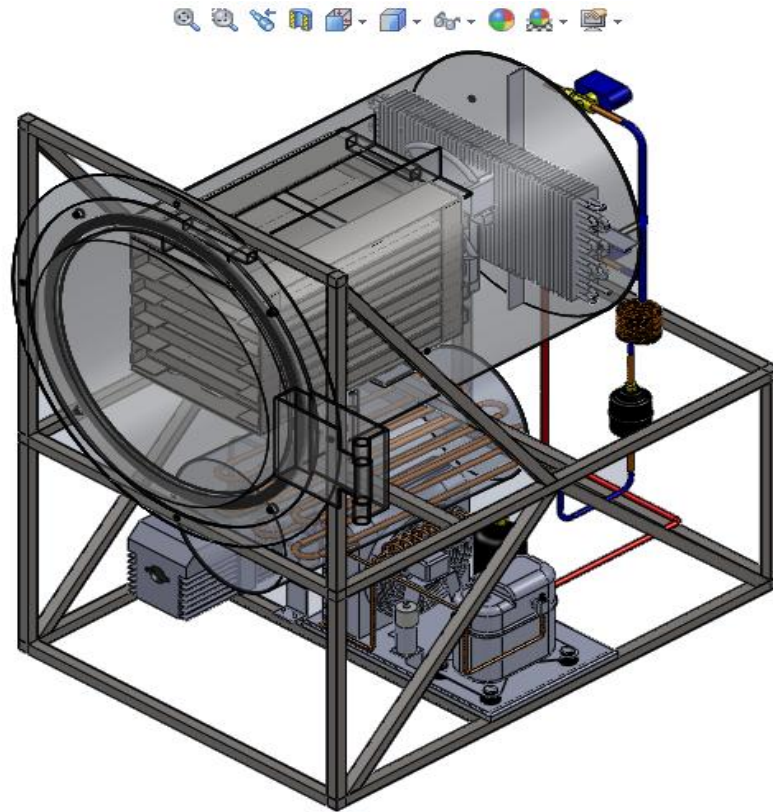
El análisis en las fallas de esta alternativa nos llevo al desarrollo de las alternativas siguientes que consisten en variantes de éstas, en cuanto a configuración y diseño, puesto que el principio y las etapas del proceso son las mismas.

### **3.1.2. Alternativa de diseño 2.**

La segunda alternativa es un diseño menos compacto que el de la alternativa 1 ya que consiste en dos cámaras cilíndricas herméticas (ver figura 59 y 60), una superior que es la cámara de trabajo en donde se ubica el modulo portabandejas igual al sistema anterior, la segunda cámara es la cámara de condensación y está ubicada entre la bomba de vacío y la cámara de trabajo, esta segunda cámara también debe ir aislada con poliuretano para mantener baja temperatura en el serpentín condensador; el descongelamiento es por resistencias eléctricas y se hace al acabar el proceso de liofilización; además cuenta con un tanque de desagüe para drenar el agua proveniente del evaporador y de la cámara de condensación.



**Figura 59.** Esquema del sistema de refrigeración alternativa # 2.



**Figura 21.** Alternativa de diseño # 2 modelada en CAD.

La ubicación del serpentín del evaporador, el sistema de refrigeración, la bomba de vacío y el cierre hermético son las mismas de la alternativa 1, la ventaja de independizar la cámara de condensación facilita la construcción, minimiza el número de válvulas y reduce las perforaciones en las cámaras de trabajo; el proceso de descongelamiento en la cámara condensadora es discontinuo y se hace al finalizar el proceso.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✘ Reduce las perforaciones a la cámara de vacío.</li> <li>✘ Fácil identificación de subsistema de condensación.</li> <li>✘ Dificultad para conseguir la hermeticidad debido a la existencia de más posibilidades de filtración.</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>✘ Más costoso, mayor cantidad de componentes y complejidad de las cámaras.</li> <li>✘ Incrementa el costo debido al aislamiento de las dos cámaras.</li> </ul>

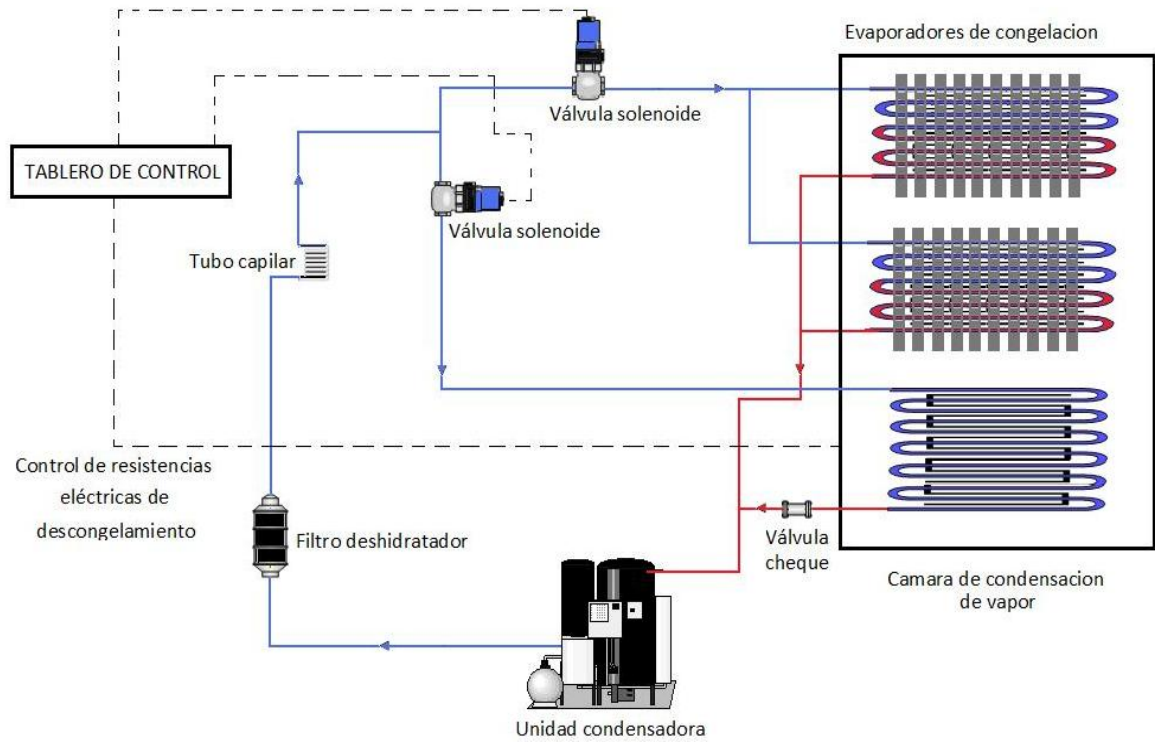
**Tabla 3.** Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 2.

Con la evolución de las ventajas que cada alternativa presenta por separado, llega una propuesta que muestra un perfil de solución al problema planteado, dando cobertura a la mayoría de sub problemas que se presentan buscando la deshidratación en frío y la conservación de las características organolépticas en los productos agroindustriales.

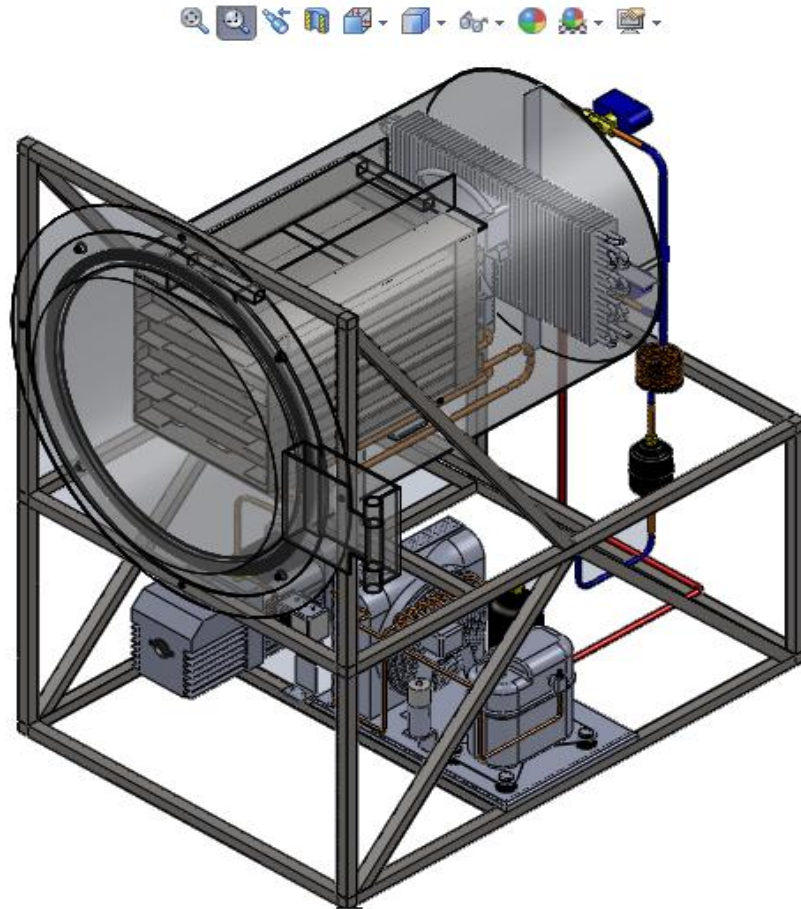
### 3.1.3. Alternativa de diseño 3.

La alternativa 3 retoma el diseño compacto de la primera alternativa y la discontinuidad de una única cámara condensadora de la segunda alternativa, ya que funciona con un sistema de simple cámara cilíndrica (ver figura 61 y 62), donde se ubica el serpentín evaporador en la parte posterior y el serpentín condensador en la parte inferior, dentro de la cámara de trabajo está el modulo removible del portabandejas que contiene el conjunto de las bandejas con el

producto y a su vez el portabandejas con sus respectivas resistencias eléctricas, éstas calientan el producto por contacto directo y por radiación.



**Figura 22.** Esquema del sistema de refrigeración alternativa # 3.



**Figura 23.** Alternativa de diseño # 3 modelada en CAD.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>✘ Sistema integral compacto que reduce costos de construcción.</li> <li>✘ El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso.</li> <li>✘ Aislamiento de una única cámara y distribución de tubería de refrigeración menos complicada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✘ Lograr la temperatura del producto es difícil debido a la distribución del aire respecto a la posición del evaporador.</li> <li>✘ El costo se eleva debido a mayor diámetro de la cámara para que los evaporadores puedan situarse.</li> </ul>

**Tabla 4.** Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 3.

#### **3.1.4. Alternativa de diseño 4 (Propuesta final)**

Para definir la propuesta final se empezó con el logro del vacío en la cámara, para esto se hizo el cierre con pernos los cuales dan un pre-sello a la tapa, el sello definitivo se logra en el contacto entre las caras planas de la tapa y el sello de caucho que va en el anillo de la cámara.

Se encontró la necesidad de continuidad del proceso para realizar el retiro total de la humedad del producto. Para solucionar esto se definió un sistema de condensación de vapor adicional a los evaporadores de refrigeración, este sistema es el encargado del vapor que se sublima en el proceso de calentamiento, está

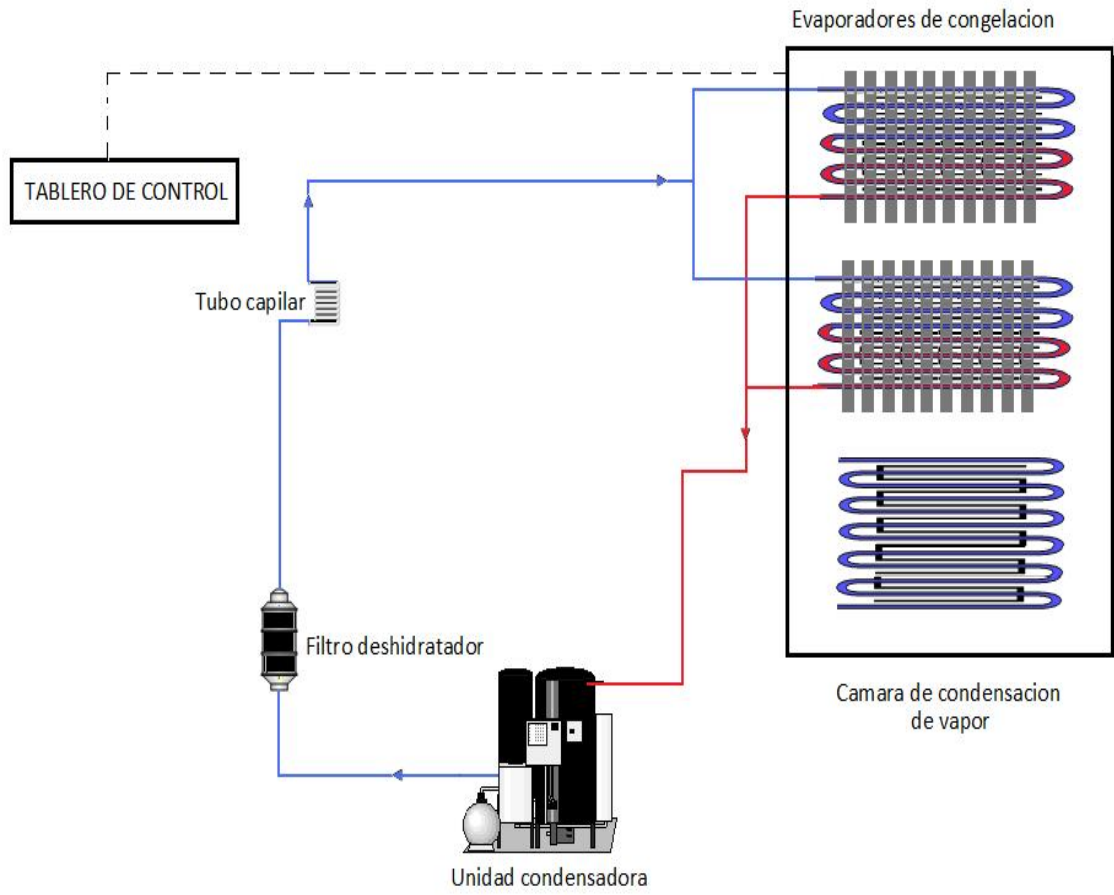
ubicado en la parte inferior de la cámara en un modulo que a su vez sostiene el ventilador de refrigeración.

Teniendo en cuenta el aspecto de facilidad de construcción se definió para la alternativa final un diseño de simple cámara, con compartimiento para 5 bandejas de producto y sistema de calentamiento por resistencias instaladas en contacto directo al modulo portabanderas (ver figura 63 y 64). Para mayor eficiencia en el proceso se estableció el sistema de descongelamiento por resistencias eléctricas el cuál funciona solamente al final del proceso de retiro de humedad del producto.

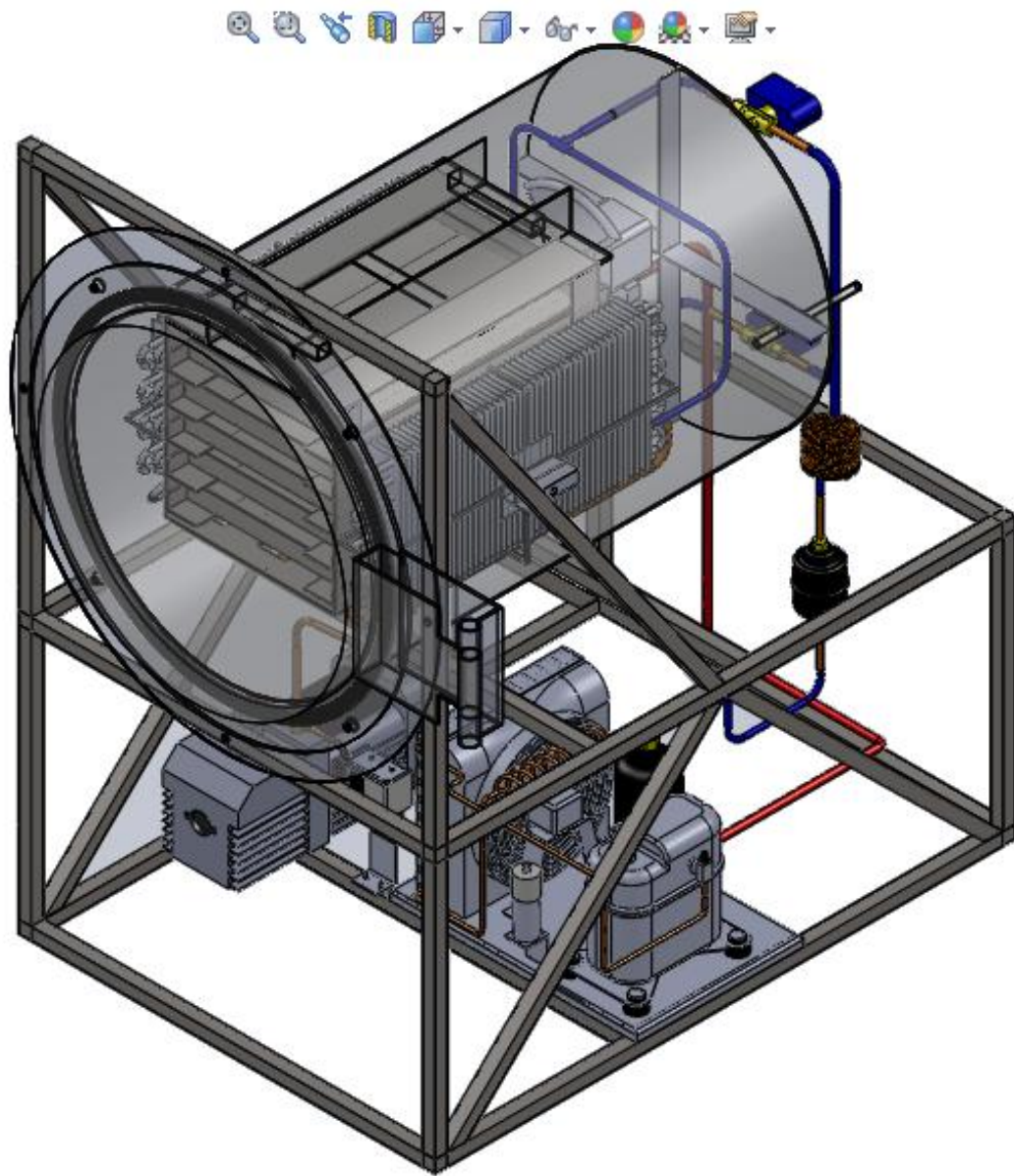
El control del proceso se realiza en base a los elementos disponibles del proyecto anterior como un controlador para el sistema de refrigeración y otros dos controles de temperatura por separado para las resistencias de calentamiento y para el producto. Con esto se busca poder realizar todo el monitoreo del proceso y el estudio de la evolución de la deshidratación de los productos. La ubicación del sistema de control se definió en la parte superior de la estructura debido a la facilidad de lectura de los parámetros durante proceso.

El sistema de calentamiento constará de cinco cavidades en el modulo portabandejas en los que se instalarán las resistencias de calentamiento las cuales serán controladas de manera que el producto no alcance más de 60°C para que el procedimiento de desprendimiento de vapor sea lento y en ningún momento se presente en estado líquido.

Basados en las especificaciones y los requerimientos de diseño, y tomando en cuenta los aspectos definidos para la alternativa final de diseño, se procedió a la etapa de diseño básico y detallado, en la que se realizó todo el proceso de diseño estructural y cálculo del equipo térmico, subsistemas y componentes del liofilizador disponible del proyecto anterior.



**Figura 24.** Esquema de refrigeración alternativa #4 (final).



**Figura 25.** Alternativa de diseño # 4 (final) modelada en CAD.

	<b>ALTERNATIVA 1</b>	<b>ALTERNATIVA 2</b>	<b>ALTERNATIVA 3</b>	<b>ALTERNATIVA 4</b>
<b>CAMARA DE TRABAJO</b>	Sistema de doble cámara integral, en la parte superior el modulo portabandejas y los evaporadores, y en la cámara inferior el condensador de vapor	Sistema de doble cámara independiente, en la parte superior el modulo portabandejas y los evaporadores y en la parte inferior la cámara condensadora acoplada con una electroválvula	Sistema de simple cámara integral con sistema condensación, modulo portabandejas y evaporadores	Sistema de simple cámara integral con los evaporadores ubicados en la parte lateral de la cámara
<b>SISTEMA DE CONDENSACION</b>	Sistema de doble cámara, con funcionamiento alternado y en derivación con los evaporadores	Serpentín condensador ubicado en la cámara independiente de funcionamiento continuo y en derivación a los evaporadores	Ubicado en la parte inferior de la cámara de trabajo, con funcionamiento continuo y conectado en derivación a los evaporadores	Ubicado en la parte inferior de la cámara y sin conexión al sistema de refrigeración.
<b>CONEXIÓN DE VACIO</b>	Conectado con las tres cámaras por medio de electroválvulas	Única conexión al sistema de condensación	Única conexión con la cámara de trabajo	Única conexión con la cámara de trabajo
<b>SISTEMA DE CONTROL</b>	Control sobre las electroválvulas que hacen alternar las cámaras de condensación mientras se efectúa el descongelamiento del serpentín	Control sobre la electroválvula que conecta las cámaras de trabajo y de condensación	Control sobre las electroválvulas que conectan la derivación del serpentín condensador y los evaporadores	Control ON- OFF que gobierna el sistema de refrigeración, el sistema de vacío y el sistema de calentamiento presente en el modulo portabandejas
<b>NUMERO DE PERFORACIONES</b>	11 perforaciones <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 de vacío</li> <li>• 1 del vacuómetro</li> <li>• 1 conexión eléctrica</li> <li>• 6 de refrigeración</li> </ul>	5 Perforaciones por cámara <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 de vacío</li> <li>• 1 del vacuómetro</li> <li>• 1 conexión eléctrica</li> <li>• 2 de refrigeración</li> </ul>	7 perforaciones <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 de vacío</li> <li>• 1 del vacuómetro</li> <li>• 1 conexión eléctrica</li> <li>• 4 de refrigeración</li> </ul>	5 perforaciones <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 de vacío</li> <li>• 1 del vacuómetro</li> <li>• 1 conexión eléctrica</li> <li>• 2 de refrigeración</li> </ul>

**Tabla 5.** Comparación en las alternativas de diseño

#### **4. DISEÑO BASICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR PILOTO.**

Para dar inicio a la etapa de diseño básico y detallado del equipo se tomaron en cuenta cada uno de los parámetros definidos para la alternativa de diseño final y todos los requerimientos y especificaciones fijados en la etapa de diseño preliminar del liofilizador piloto.

##### **4.1. Diseño estructural**

Para definir las dimensiones del equipo se tiene como principal parámetro de diseño la carga de producto que es de 10 Kg, con ésta carga se determinaron las dimensiones y el número de bandejas, además de las proporciones de la cámara de trabajo; las dimensiones de la estructura se definieron de acuerdo a la distribución de los equipos de refrigeración y vacío; otro aspecto a tener en cuenta es que el equipo liofilizador en un equipo piloto, razón por la cual debe de ser de fácil manejo por parte del operador y de fácil traslado para efecto de pruebas, de acuerdo con esto se determinaron las siguientes dimensiones:

##### **4.1.1 Bandejas.**

Para el diseño de las bandejas se seleccionaron cuatro productos agroindustriales (ver figura 65) éstos presentan mayor contenido de agua que otros productos a liofilizar.

Los productos agroindustriales fueron:

- El melón
- La Pitaya
- La Uchuva
- La Fresa



**Figura 65.** Productos agroindustriales utilizados en el diseño

Con el fin de determinar las dimensiones y el número de bandejas se cortaron 100 gr de cada producto y se arreglaron de forma tal que se pudiera determinar el área de bandeja que ocuparían estos 100 gr de producto.

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
-

- **Para el Melón**



**Figura 66.** Distribución de 100 gr. de melón

Al realizar la medición de los 100 gr obtenemos 10 cm x 7cm (ver figura 66)

- **Para la Pitaya**



**Figura 67.** Distribución de 100 gr. de Pitaya

Los 100 gr de pitaya ocupan un área de obtenemos 10cm x 7.5cm (ver figura 67)

- **Para la Uchuva**



**Figura 68.** Distribución de 100 gr. de uchuva

Para los 100gr de uchuva las mediciones son 9 cm x 7 cm

- **Para la Fresa**



**Figura 69.** Distribución de 100 gr. de fresa

Los 100 gr fresa ocupan 10cm X 8 cm (ver figura 69).

Del análisis en la distribución de los cuatro productos agroindustriales observamos que la fresa es la que ocupa mayor área debido al tamaño de la fruta, con estas dimensiones calculamos el tamaño de las bandejas, entonces si los 100 gr ocupan un área de  $80 \text{ cm}^2$  10 kg ocuparan un área de  $8000 \text{ cm}^2$  al dividirlo en cinco Bandejas, cada bandeja debe tener un área de  $1600 \text{ cm}^2$  las dimensiones para satisfacer esta área son de 32 cm x 50 cm

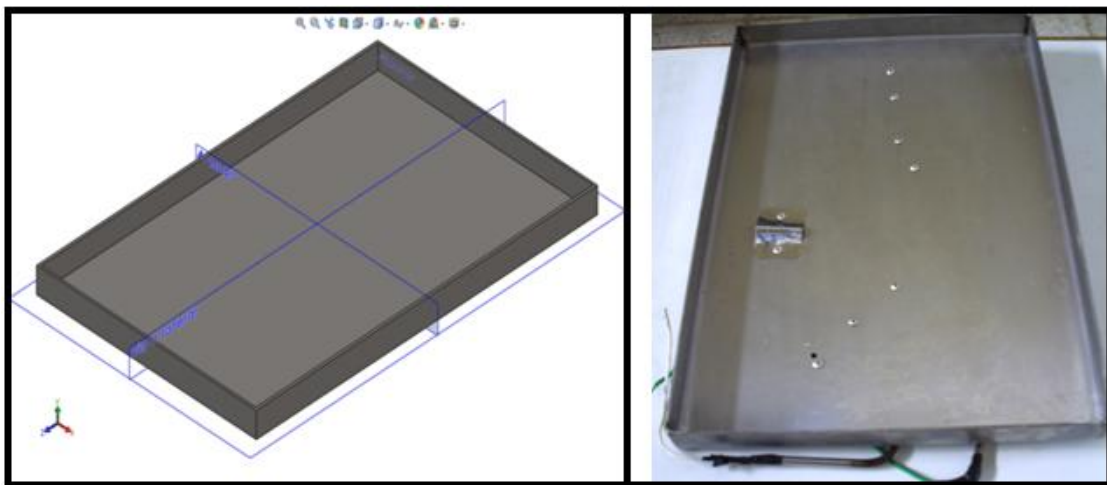
- **Dimensiones de las Bandejas.**

Alto: 3.3 cm

Ancho: 32.6 cm

Fondo: 50.6 cm

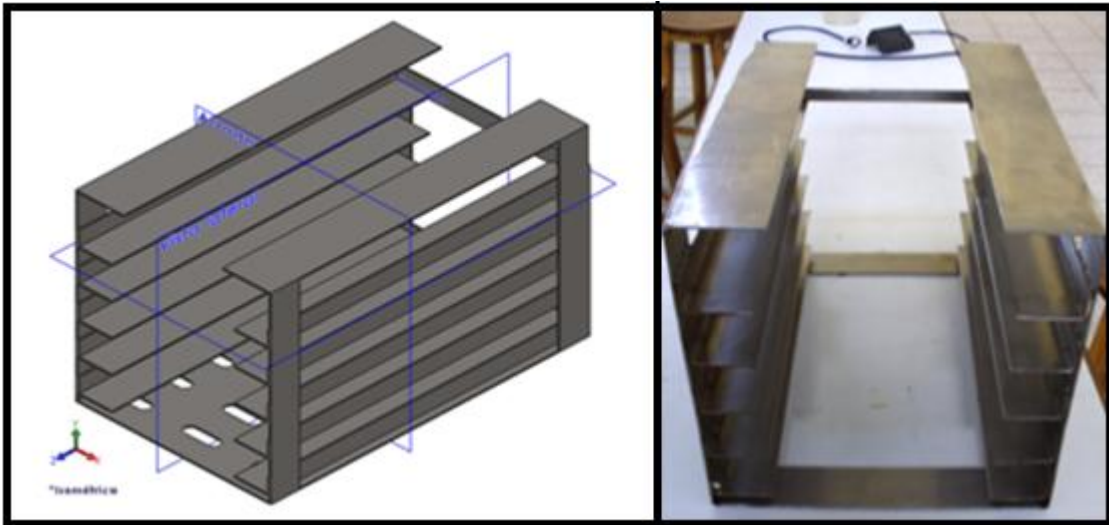
Número de bandejas: 5 (ver figura 70)



**Figura 70.** Simulación del Portabandejas en CAD

#### 4.1.2. Modulo Portabandejas.

Con el fin de favorecer la limpieza al interior del equipo liofilizador se diseño el modulo portabandejas de forma removible (ver figura 71); el modulo debe contener las cinco bandejas y las resistencias eléctricas además debe ser de fácil manipulación y debe ser acoplado perfectamente a la estructura de trabajo con el fin de brindar al usuario la mayor comodidad posible.



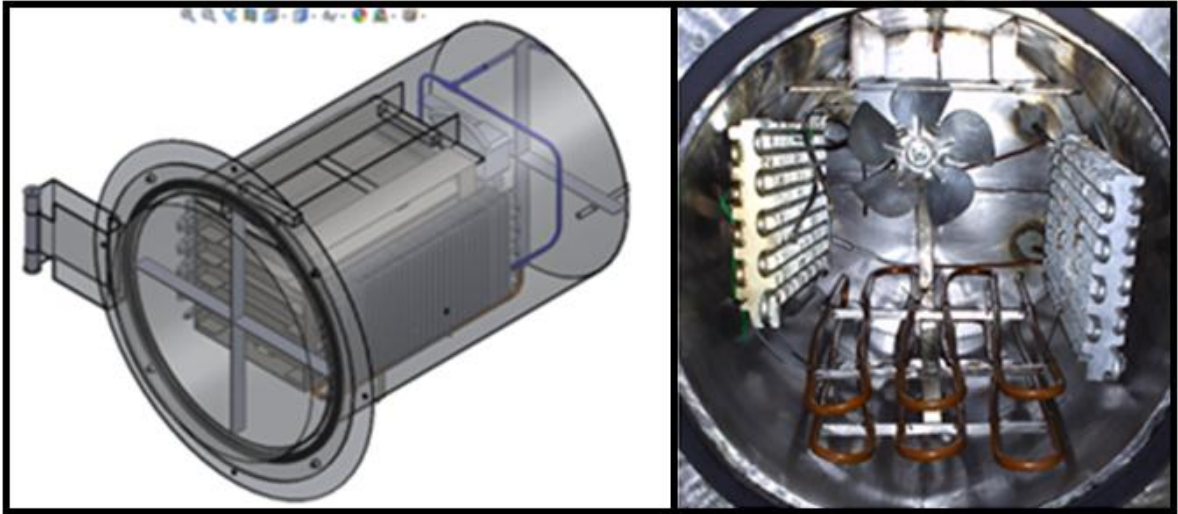
**Figura 71.** Simulación de modulo Portabandejas en CAD

#### 4.1.3. Cámara de Trabajo.

Una vez determinadas las dimensiones del modulo de trabajo (ver figura 72), del sistema de refrigeración y del sistema de vacio hacemos el arreglo en el software SOLID WORK y determinamos la geometría de la cámara cilíndrica de trabajo que son:

Diámetro: 60 cm

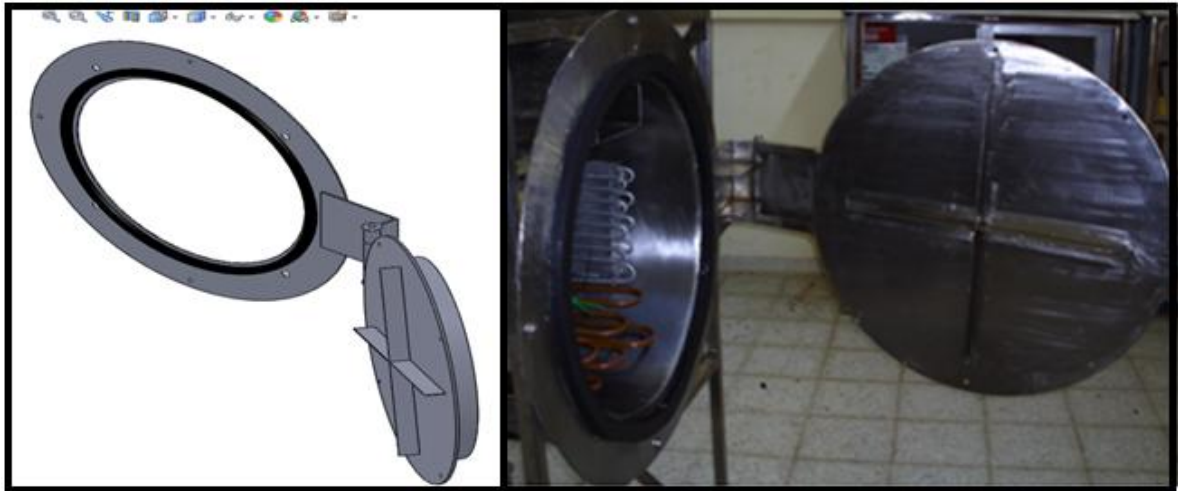
Fondo: 90 cm



**Figura 72.** Simulación de la Cámara de trabajo en CAD

#### **4.1.4. Puerta.**

El parámetro clave a tener en cuenta al definir el cierre fue la hermeticidad por tal razón se selecciono una tapa plana reforzada con una cruz para contrarrestar la deformación por el vacío (ver figura 72). Para mantener la hermeticidad dentro de la cámara se coloco un empaque de caucho entre la puerta y el aro, además se selecciono una junta apernada con el fin de aplicar presión al empaque y se aplico resina de fibra de vidrio silicona loctite en todas las uniones y en el empaque de la cámara para ayudar el sello hermético.



**Figura 73.** Simulación de la Puerta en CAD

#### **4.1.4.1. Diseño de la Cruz**

La función de la cruz en la tapa es evitar la deformación por el vacío, el diseño de esta cruz se realizó mediante el software ANSYS y se tomó como parámetro la deformación permisible de un recipiente a vacío según la sección VIII.

#### **4.1.4.2. Deformación Permisible en recipientes a vacío según la sección VIII de la norma ASME.**

Parámetros de cálculo

Diámetro de interior [mm]	600
Longitud de cilindro [mm]	800
Espesor de pared [mm]	3
Material de cilindro	Acero AISI 304

Tomamos la sección VIII de la norma ASME la cual tiene la siguiente clasificación:

- División 1 Reglas para la construcción de recipientes a presión.
- División 2 Reglas alternativas (Reglas para la construcción de recipientes a presión.)
- División 3 Reglas alternativas para la construcción de recipientes a alta presión.

Tomamos la División 1 la cual se divide en tres subsecciones

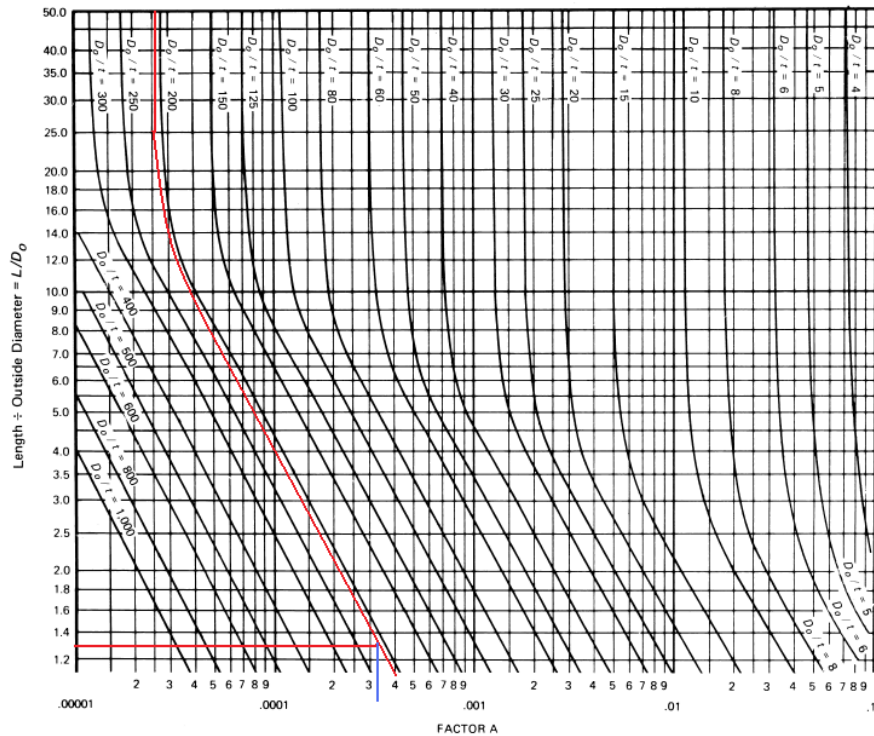
- Subseccion A Requerimientos generales
- Subseccion B Requisitos para el método de fabricación
- Subseccion C Requerimientos para la clase de materiales a utilizar

Tomamos la subseccion A que a su vez se divide en diferentes partes pero tomaremos la parte UG la cual nos habla de los requerimientos generales para todo los métodos de construcción y todos los materiales.

### **UG-28 Espesor de carcasas t de tubos para recipientes sometidos a presión externa**

FACTORES:

A: Partiendo de  $\frac{L}{D_o} = \frac{800}{606} = 1.32$   $\frac{D_o}{t} = \frac{606}{3} = 202$  entramos en la figura 74:



**Figura 74.** Curvas para hallar el factor A de los cálculos del espesor de la puerta

**Fuente:** Norma ASME Sección III

$A \approx 0.00032$  (Para todos los materiales)

Para determinar el factor B nos vamos para la parte UG-20 (c)

- Que a su vez nos lleva a la sección II subparte 1 parte D donde se dan las siguientes tablas para hallar la máxima temperatura de diseño:
  - Existe un gran rango de tablas donde se tienen diferentes posibilidades de Acero Inoxidable 304 pero debemos tener en cuenta:

- La forma del producto tubería soldada.
- Espesor > 5 in.
- La temperatura mínima de trabajo  $-35^{\circ}\text{C} = -31^{\circ}\text{F}$  y la temperatura máxima de trabajo cuando se encienden las resistencias  $40^{\circ}\text{C} = 104^{\circ}\text{F}$ .

Se puede decir que por temperatura todos funcionan por que limite mínimo para todos los tipos de acero inoxidable 304 la temperatura menos alta como límite es  $800^{\circ}\text{F}$  como se ve en las siguientes tablas:

Table 1A

2001 SECTION II

TABLE 1A (CONT'D)  
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3; \* AND SECTION VIII, DIVISION 1  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES  $S$  FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Cond./ Temper	Size/ Thickness, in.	P.No.	Group No.
1	18Cr-8Ni	Forged pipe	SA-430	FP304H	S30409	...	...	8	1
2	18Cr-8Ni	Forged pipe	SA-430	FP304H	S30409	...	...	8	1
3	18Cr-8Ni	Cast pipe	SA-451	CPF3	J92500	...	...	8	1
4	18Cr-8Ni	Cast pipe	SA-451	CPF8	J92600	...	...	8	1
5	18Cr-8Ni	Forgings	SA-182	F304	S30400	...	≤ 5	8	1
6	18Cr-8Ni	Forgings	SA-182	F304	S30400	...	≤ 5	8	1
7	18Cr-8Ni	Forgings	SA-182	F304H	S30409	...	≤ 5	8	1
8	18Cr-8Ni	Forgings	SA-182	F304H	S30409	...	≤ 5	8	1
9	18Cr-8Ni	Smls. tube	SA-213	TP304	S30400	...	...	8	1
10	18Cr-8Ni	Smls. tube	SA-213	TP304	S30400	...	...	8	1
11	18Cr-8Ni	Smls. tube	SA-213	TP304H	S30409	...	...	8	1
12	18Cr-8Ni	Smls. tube	SA-213	TP304H	S30409	...	...	8	1
13	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	302	S30200	...	...	8	1
14	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	302	S30200	...	...	8	1
15	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304	S30400	...	...	8	1
16	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304	S30400	...	...	8	1
01 17	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304H	S30409	...	...	8	1
01 18	18Cr-8Ni	Plate	SA-240	304H	S30409	...	...	8	1
19	18Cr-8Ni	Wld. tube	SA-249	TP304	S30400	...	...	8	1
20	18Cr-8Ni	Wld. tube	SA-249	TP304	S30400	...	...	8	1
21	18Cr-8Ni	Wld. tube	SA-249	TP304	S30400	...	...	8	1
22	18Cr-8Ni	Wld. tube	SA-249	TP304	S30400	...	...	8	1

Tabla 5. Tabla de propiedades de los materiales

Fuente: Norma ASME Sección VIII

TABLE 1A (CONT'D)  
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3;\* AND SECTION VIII, DIVISION 1  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES *S* FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

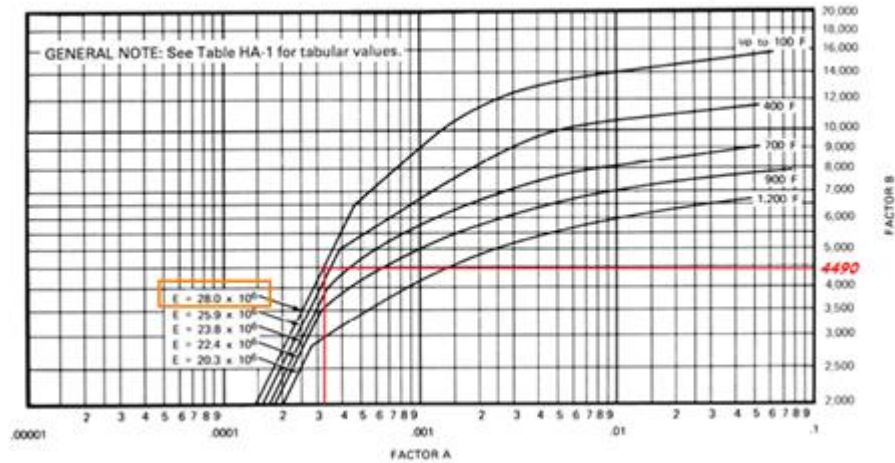
Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applic. and Max. Temp. Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)			External Pressure Chart No.	Notes
			I	III	VIII-1		
1	70	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G18, H1, T7
2	70	30	1500	NP	1500	HA-1	G18, H1, T8
3	70	30	NP	800	NP	...	G5, G18, G17, G32
4	70	30	NP	800	NP	HA-1	G5, G18, G17, G32
5	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G12, G18, T8
6	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G12, G18, T7
7	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G18, T8
8	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G18, T7
9	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G12, G18, T8
10	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G12, G18, T7
11	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G18, T8
12	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G18, T7
13	75	30	NP	NP	750	HA-1	G5
14	75	30	NP	NP	750	HA-1	...
15	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G12, G18, T8
16	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G12, G18, H1, T7
17	75	30	1500	800	1500	HA-1	G5, G18, T7
18	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G18, T8
19	75	30	1500	NP	NP	...	G12, G18, T8, W15
20	75	30	1500	800	NP	HA-1	G5, G12, G18, T7, W12, W15
21	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G3, G5, G12, G18, G24, T7
22	75	30	1500	NP	1500	HA-1	G3, G12, G18, G24, T8

01  
01

Tabla 6. Tabla de propiedades de los materiales

Fuente: Norma ASME Sección VIII

La máxima temperatura de la cámara es 105°F de la figura 74 tabla de la sección II D subparte 3 con el valor de  $A = 0.00032$



**Figura 75.** Curva de factor B para el cálculo del espesor

**Fuente:** Norma ASME Sección II

$$B \approx 4490$$

$$E \approx 28 \times 10^6 \text{ psi}$$

Calculo de  $P_a = \text{presion maxima permitida de trabajo}$

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} = \frac{4 \times 4490}{3\left(\frac{606}{8}\right)} = 29.63 \text{ psi}$$

En UG-28 (f) envía a U1-(c)2(h) donde dan las recomendaciones de la presión de diseño teniendo en cuenta las limitaciones o no de tamaño.

- Encontramos que sin limitaciones de tamaño la máxima presión externa que debe soportar cualquier recipiente es 15 Psi valor que se da en nuestro diseño.

Duda con longitudinal lap joint (solapa longitudinal) en la carcasa de cilindro.

Por último para UG-28 tomamos en cuenta la forma de las cargas a considerar las cuales se dan en la UG-22:

- a. Presión de trabajo bien definida.
- b. Peso del recipiente y de los fluidos en operación y en la prueba hidrostática.
- c. Peso de tubería, aislamiento, cámaras anexas
- d. Apendices que no los he conseguido
- e. Variaciones de carga durante la operación sean cargas cíclicas o dinamicas
- f. Viento, nieve y reacciones sísmicas
- g. Reacciones de impacto de los fluidos
- h. Gradientes de temperatura y expansión térmica
- i. Presiones anormales causadas por la deflagradacion.

#### 4.1.5. Diseño de tapa trasera

Fórmula para calcular el espesor:

$$t = d \left( \frac{CP}{SE} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

d=diámetro efectivo de la placa plana, in

C= coeficiente entre 0.1 hasta 0.33, dependiendo de los detalles en la esquina

P=presión de diseño, psi

S=esfuerzo permisible a la temperatura de diseño, psi

E=Eficiencia de la soldadura en la unión de la placa plana

t= espesor mínimo requerido de la placa plana, in

E se requiere para el cálculo cuando el diámetro de la tapa es tan grande que necesita estar hecho con más de una pieza.

$$d = 60\text{cm} = 23.622\text{ in}$$

$$C = 0.33$$

$$P = 15\text{ psi}$$

$$E = 1$$

$$S = 30000\text{ psi}$$

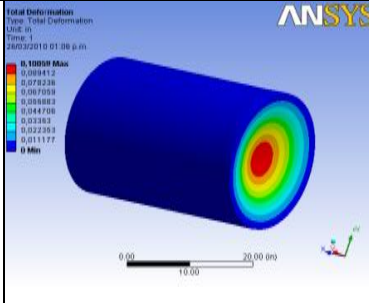
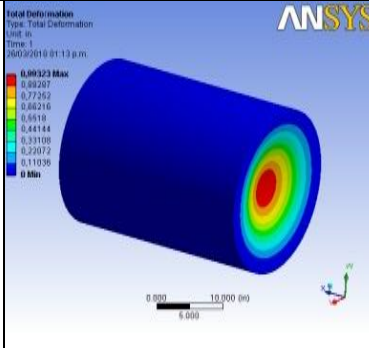
$$t = d \left( \frac{CP}{SE} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$t = 23.622 \left( \frac{0.33 \times 15}{30000 \times 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad t = 0.30343\text{ in} = 7.70739\text{ mm}$$

Este es el espesor recomendado por la Norma ASME que permite una deformación de 2.54 mm en el centro de la tapa

A continuación se muestra la simulación de la tapa en ANSYS buscando lograr la deformación permisible por la norma ASME con un espesor de la tapa de 3 mm:

## Tabla de deformaciones y pruebas en ANSYS

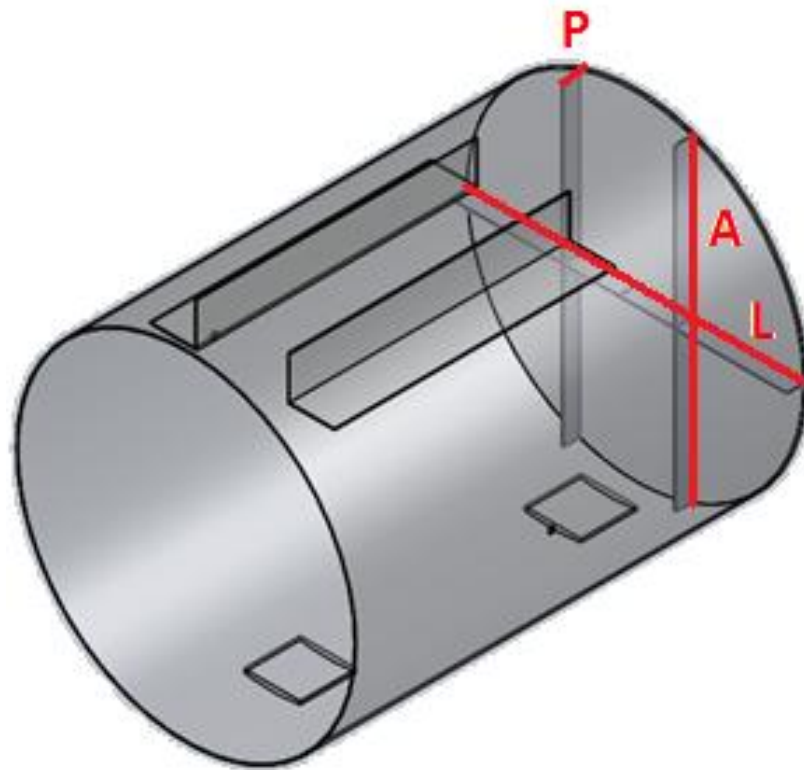
Espesor tapa t (mm)	Deformación en ANSYS (mm)	Imagen
7.71	2.554986	
3	25.2280	

**Tabla 7.** Resultados de simulación de carga en ANSYS Workbench

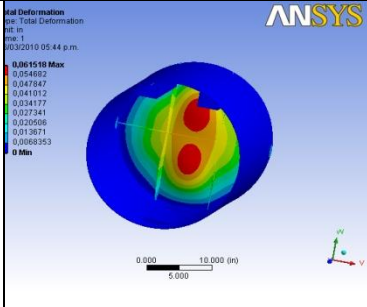
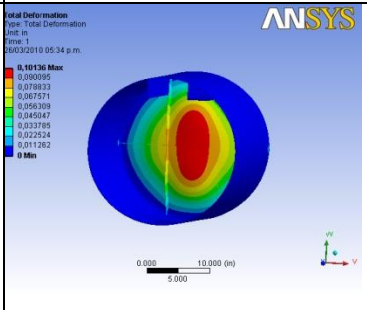
En la tabla se observa la diferencia entre la deformación permisible de la norma y la deformación con el espesor de 3 mm.

Como la deformación de la tapa con el espesor de 3 mm es muy superior a la deformación permisible a continuación se estudian diferentes opciones de refuerzo para lograr la deformación de la norma ASME con un espesor de 3 mm.

- Configuración de refuerzo en H (ver figura 76)

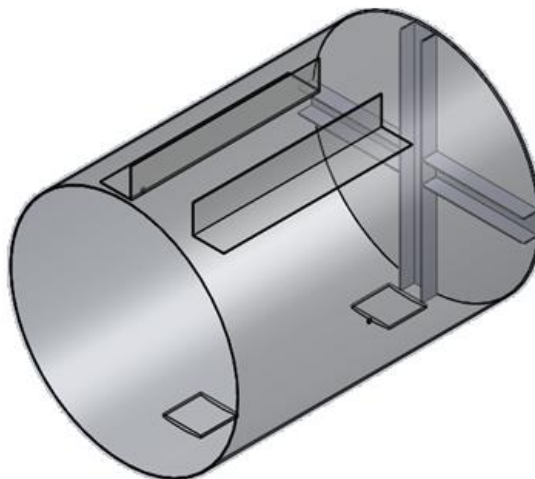


**Figura 76.** Simulación de refuerzo en CAD

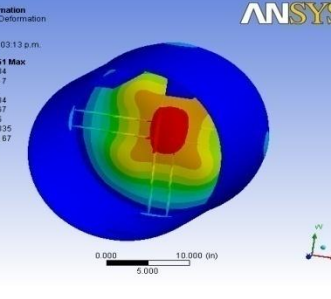
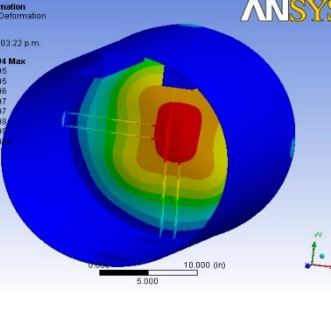
Espesor tapa t (mm)	Dimensiones de la H (LxAxP mm)	Deformación en ANSYS (mm)	Imagen
3	600x564x40	1.5625572	
3	600x564x30	2.574544	

**Tabla 8.** Resultados de simulación de carga en ANSYS Workbench

- **Configuración de refuerzo en cruz acanalada (ver figura 77)**

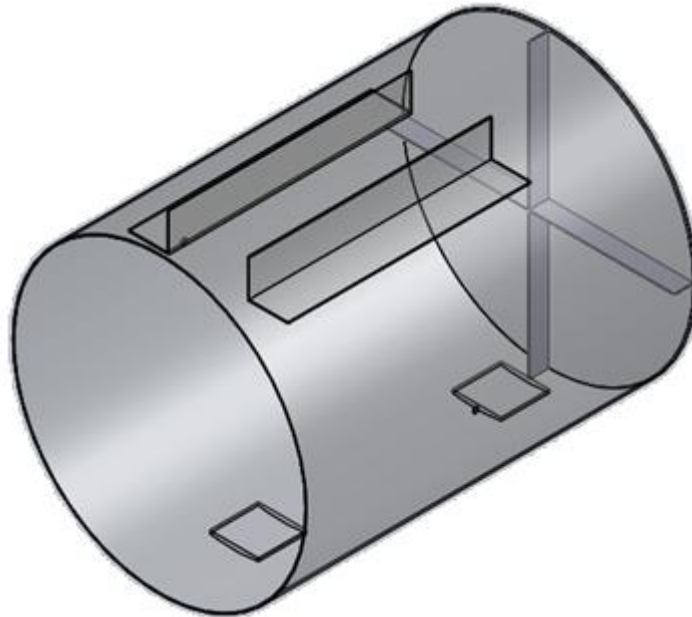


**Figura 77.** Simulación de refuerzo de cruz acanalada en CAD

Espesor tapa t (mm)	Dimensiones de cruz de (mm)	Deformación en ANSYS (mm)	Imagen
3	40X60X600	1.1239754	
3	30X40X600	1.9886676	

**Tabla 9.** Resultados de simulacion de carga en ANSYS Workbench

- Configuración de refuerzo en cruz



**Figura 78.** Simulación de refuerzo de cruz simple en CAD

Espesor tapa t (mm)	Dimensiones de cruz de soporte (mm)	Deformación en ANSYS (mm)	Imagen
3	40X600	1.4980666	

**Tabla 10.** Resultados de simulación de carga en ANSYS Workbench

De las configuraciones anteriores seleccionamos el refuerzo en cruz por las siguientes razones:

- Cumple con la deformación de norma.
- Menos material utilizado.
- No requiere dobleces.
- Menos costo en la soldadura por centímetro.

#### **4.2. CALCULOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACION.**

El sistema de refrigeración juega un papel fundamental dentro del proceso de liofilización ya que es el encargado de realizar la primera etapa del proceso que consiste en llevar el producto a una temperatura por debajo de  $-35^{\circ}\text{C}$ , para el liofilizador piloto se definió un sistema de refrigeración utilizando evaporador aleteado puesto que se logra una mayor eficiencia ya que se requiere llegar a una temperatura muy baja dentro de una cámara muy pequeña, este sistema seleccionado por el proyecto anterior brinda la siguiente capacidad:

Peso neto a liofilizar: 4Kg

Temperatura de congelación alcanzada:  $-30^{\circ}\text{C}$

Tiempo de trabajo: 24 Horas

##### **4.2.1. Cálculos Térmicos**

El liofilizador piloto se basa en el cálculo de la carga total a extraer por parte del sistema de refrigeración. Este cálculo es de vital importancia ya que el rediseño del prototipo final tiene características particulares que difieren en gran medida de

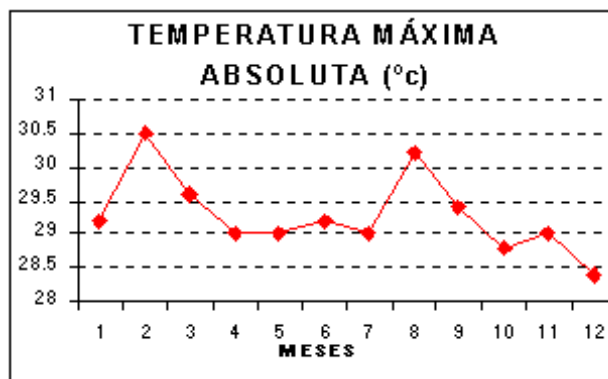
las cámaras o neveras convencionales. Previamente, se deben definir los parámetros de entrada requeridos por el sistema, los cuales son:

- Temperatura ambiente exterior
- Temperatura de diseño de la cámara
- Temperatura de evaporación
- Temperatura de condensación

#### 4.2.1.1. Determinación de Temperaturas.

- **Temperatura de ambiente exterior**

Según el INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) la temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga varía de acuerdo a la época del año como se muestra en la figura 79.



**Figura 79.** Temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga (IDEAM).

**Fuente:** <http://www.ideam.gov.co:8080/sectores/aero/climat/tempebucaramanga.ht>

De aquí se puede apreciar que la máxima temperatura se alcanza en el segundo mes del año y corresponde a 30,5 °C, y es ésta la temperatura ambiente usada en el diseño de la cámara para efectos de seguridad.

**Temperatura de ambiente exterior: 30,5°C= 86,9°F**

- **Temperatura de 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°C, como se había mencionado anteriormente el sistema de refrigeración disponible arroja un resultado de -30°C en 10 horas, entonces esta será la temperatura de diseño de la cámara.

**Temperatura de diseño de la cámara: -30°C=-22°F**

- **Temperatura de evaporación**

El parámetro DT de selección de un evaporador se define como la diferencia entre la temperatura del aire que llega al evaporador tomada generalmente como la temperatura de diseño de la cámara además en este caso es mas verídico debido a la hermeticidad de la cámara, y la temperatura de saturación del refrigerante correspondiente a la presión de salida del evaporador

Para conocer la temperatura de evaporación del refrigerante a utilizar en nuestro caso 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 grafica calcular la DT del evaporador.

- **Temperatura de condensación**

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<sup>1</sup>. Para los fines de nuestro proyecto utilizamos una diferencia de temperatura del condensador de 17°F.

$$DT = T_{cond} - T_{amb} = 17°F$$

Despejando  $T_{cond}$  y reemplazando  $T_{amb} = 86,9°F$ , se tiene

$T_{cond} = 103,9°F = 40°C$  Esta temperatura es la que brinda el sistema de refrigeración disponible del proyecto anterior.

#### **4.2.1.2. Cálculo de Carga del sistema.**

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

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

---

<sup>1</sup> Tomado de Copeland "Manual de refrigeración" Sección 16, Pág. 16-2

Las cargas por servicio en este caso no aplican porque la cámara permanecerá cerrada durante todo el proceso.

- **Cargas por paredes**

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

$$Q_p = A * U * D \text{ [Btu]}^2$$

Donde: A= Área [ft<sup>2</sup>]

U= Factor de transmisión de calor [Btu/ft<sup>2</sup>.°F]

D= Diferencia de temperatura entre los dos lados de la pared [°F]

Para nuestro caso el aislante utilizado es poliuretano, ampliamente acogido en la industria de la refrigeración, el mueble o estructura del liofilizador está construida con lámina de acero inoxidable 304 brillante calibre 3mm.

#### Datos de cálculo

- Dimensiones de la cámara (ver figura 80)

- 

Diámetro: 60cm = 1,9685 ft

Profundidad: 90cm = 2,9527 ft

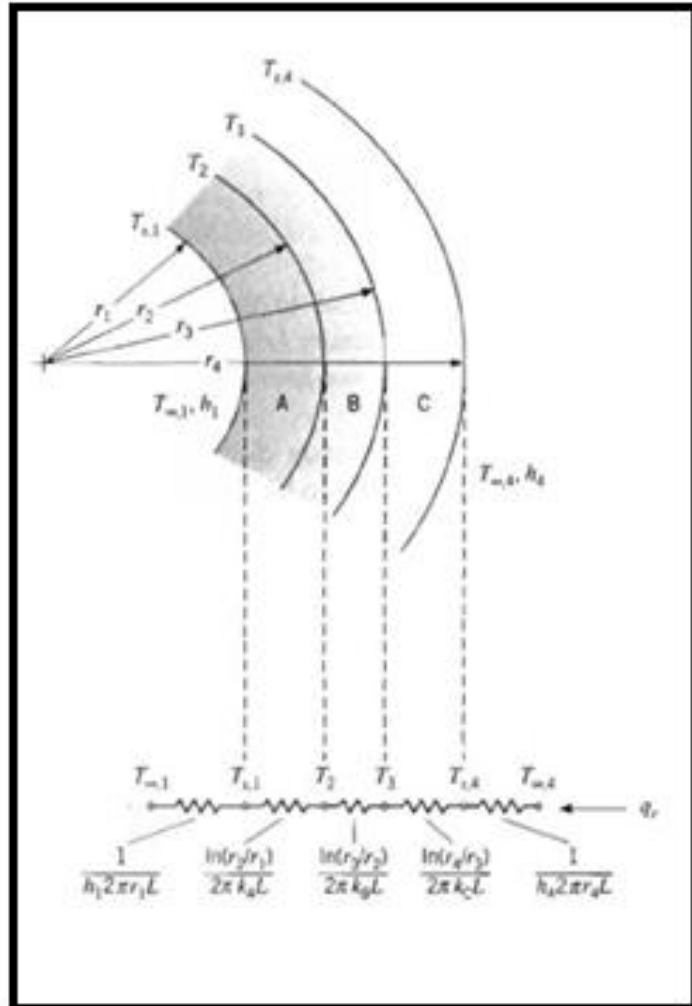
---

<sup>2</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed. Pág. 191

A: espesor de lamina de AISI 304

B: espesor de poliuretano

A: espesor de lamina de AISI 304



**Figura 26.** Diagrama de las fases de la liofilización

**Fuente:** Libro "Transferencia de calor y masa", Edición 3<sup>ra</sup>, Yunus Cengel

RADIOS DE LAS CAPAS DE LA CÁMARA		
	Cm	Ft
radio R1	30	0,98424
radio R2	30,3	0,9940824
radio R3	36,8	1,2073344
radio R4	36,87	1,20963096

**Tabla 11.** Tabla de datos geométricos de las paredes cilíndricas

Espesor de poliuretano  $R3 - R2 = 36,8 - 30,3$   $R3 - R2 = 6,5cm$

- Temperaturas

	°F	°C
T. INTERIOR [Tcam]	-22	-30
T. EXTERIOR [Tamb]	86,9	30,5
Delta [D]	108,9	60,5

**Tabla 12.** Datos de temperatura para cálculo de cargas

$$D = T_{amb} - T_{cam} = 86,9 - (-22) = 108,9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

- Conductividades térmicas  
 Poliuretano:  $k=0,16$  [Btu/ft°F]<sup>3</sup>  
 Acero inoxidable AISI 304:  $k= 8,6$  [BTU/h ft R]<sup>4</sup>

Para calcular el factor de transmisión de calor utilizamos la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * K_A * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * K_B * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 * \pi * K_C * L} + \frac{1}{f_o} \text{ [ft}^2 * \text{ }^\circ\text{F/Btu]}^5$$

Donde:

$1/f_i$  y  $1/f_o$ = Coeficientes de convección de las paredes interna y externa respectivamente (para nuestro caso es un valor despreciable ya que la velocidad del aire en ambas partes de la cámara es muy mínima).

$L$ = Longitud de material

$K$ = conductividad térmica del material

$$\text{Area} = 2 * \pi * r * L \text{ [cm}^2 \text{ ó ft}^2\text{]}$$

---

<sup>3</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A6i, Pág. 754.

<sup>4</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A6i, Pág. 754.

<sup>5</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed. Pág. 197.

Con los datos anteriores podemos completar la siguiente tabla:

<b>CALCULO DE CARGAS PARA LA CÁMARA</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>material</b>	Aisi 304 (3mm)	Poliuretano (6,5 cm)	Lamina brillante(calibre 22)
<b>Áreas (ft<sup>2</sup>)</b>	18,43644905	22,39146288	22,43405533
<b>K (BTU/h ft R)</b>	8,6	0,013289	8,6
<b>L (ft)</b>	2,9529	2,9529	2,9529
<b>Resistencia</b>	6,23606E-05	0,788249914	1,191E-05
<b>Resistencia Total</b>			0,788324184
<b>Calor Total [BTU/h]</b>			138,1411381
<b>CALOR TOTAL [BTU]</b>			3093,182166

**Tabla 13.** Datos de los cálculos de carga en las paredes cilíndricas

Para el fondo y la tapa se tomo la condición de pared plana (ver figura 81), pero las áreas se calculan con:

$$Area = \pi * r^2 [cm^2 \text{ ó } ft^2]$$

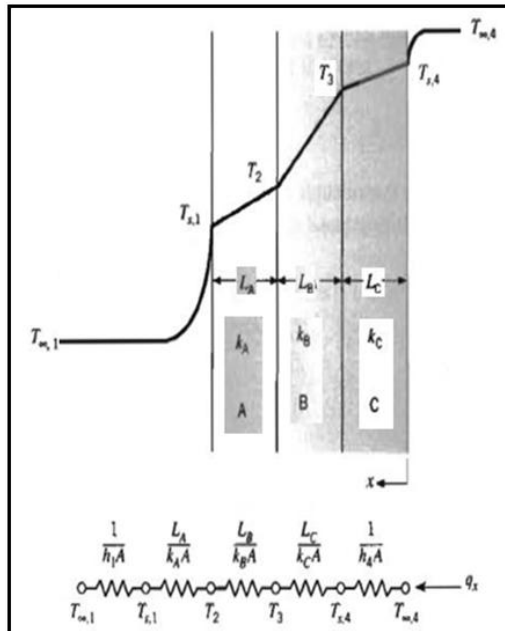


Figura 27. Perfil de temperatura de las paredes cilíndricas

Fuente: Libro “Transferencia de calor y masa”, Edición 3<sup>ra</sup>, Yunus Cengel

CALCULO DE CARGAS PARA EL FONDO			
	A	B	C
<b>Material</b>	Aisi 304 (3mm)	Poliuretano (6,5 cm)	Lamina brillante(calibre 22)
<b>Áreas (ft<sup>2</sup>)</b>	3,104521288	3,104521288	3,104521288
<b>K (BTU/h ft R)</b>	8,6	0,013289	8,6
<b>L (ft)</b>	0,009843	0,16405	0,0022967
<b>Resistencia</b>	0,000368667	3,976392912	8,60223E-05
<b>Resistencia Total</b>			3,976847602
<b>CALOR TOTAL BTU</b>			27,38349841

Tabla 14. Datos de los cálculos de carga en el fondo

<b>CALCULO DE CARGAS PARA LA TAPA</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Material</b>	Aisi 304 (3mm)	Poliuretano (6,5 cm)	Lamina brillante(calibre 22)
<b>Áreas (ft<sup>2</sup>)</b>	3,104521288	3,104521288	3,104521288
<b>K (BTU/h ft R)</b>	8,6	0,013289	8,6
<b>L (ft)</b>	0,009843	0,16405	0,0022967
<b>Resistencia</b>	0,000368667	3,976392912	8,60223E-05
<b>Resistencia Total</b>			3,976847602
<b>CALOR TOTAL BTU</b>			27,38349841

**Tabla 15.** Datos de los cálculos de carga en la tapa

Con los datos anteriores podemos calcular la carga a través de las paredes de la cámara:

<b>CALCULO DE CARGAS TOTALES</b>	
<b>CALCULO DE CARGAS PARA LA CÁMARA [BTU]</b>	3093,182166
<b>CALCULO DE CARGAS PARA EL FONDO [BTU]</b>	27,38349841
<b>CALCULO DE CARGAS PARA LA TAPA [BTU]</b>	27,38349841
<b>CARGAS TOTALES [BTU]</b>	3147,949163

**Tabla 16.** Datos de resultados totales de cálculos de cargas de las paredes

- **Cargas por producto**

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:

<b>PARAMETROS DE CALCULOS</b>	<b>VALORES</b>
Masa de producto a liofilizar	$m = 10\text{kg} = 22,04\text{ lbs}$
Calor específico promedio por encima del punto de congelación <sup>6</sup> :	$C_{ph} = 0,822\text{ Btu/lb}^\circ\text{F}$
Factor de rapidez de enfriamiento promedio <sup>7</sup> :	$fr = 0,8$
Calor latente promedio <sup>8</sup> :	$h_{fi} = 103,5\text{ Btu/lb}$
Calor específico promedio por debajo del punto de congelación <sup>9</sup> :	$C_{pl} = 0,422\text{ Btu/lb}^\circ\text{F}$
Temperatura de congelación promedio <sup>10</sup> :	$T_c = 29,0^\circ\text{F}$
Temperatura Ambiente:	$T_{amb} = 86,9^\circ\text{F}$
Temperatura de la cámara:	$T_{cam} = -22^\circ\text{F}$

**Tabla 17.** Datos de los parámetros de cálculos de cargas

<sup>6</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

<sup>7</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Tabla 10-9, Pág. 211.

<sup>8</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

<sup>9</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

<sup>10</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

- **Calculo del calor sensible por encima del punto de congelación**

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_{enf} = \frac{m \cdot C_{ph} \cdot \Delta T}{fr} \quad 11$$

Donde:

- **m:** masa del producto [lb]
- **C<sub>ph</sub>:** calor específico por encima del punto de congelación (este se obtuvo de promediar los calores específicos de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla A7i pg 755) [Btu/lb°F]
- **ΔT:** Diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del producto y la temperatura de congelación del producto. [°F]
- **fr:** factor de rapidez de enfriamiento (este factor se utiliza debido a que la carga del equipo durante la primera parte del periodo de enfriamiento es mayor que la carga promedio debido a la gran diferencia de temperatura que se tiene entre el producto y el aire del espacio refrigerado en este periodo).

Este factor se aplica a cuartos de enfriamiento y asegura la capacidad de la maquina ya que incrementa el valor de la carga del producto al valor correspondiente a la condición de pico máximo.), este se obtuvo de promediar los factores de rapidez de enfriamiento de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla<sup>12)</sup> [Btu/lb°F]

---

<sup>11</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Pág. 212.

<sup>12</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Tabla 10-9, Pág. 211

Con los datos anteriores tenemos:

$$Q_{enf} = \frac{m * C_{ph} * \Delta T}{fr} \quad Q_{enf} = \frac{22,04 * 0,822 * (86,9 - 29)}{0,8} = 1311,56 \text{ [Btu]}$$

- **Calculo del calor latente de congelación**

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{sol} = m * h_{fi}^{13}$$

Donde:

**m:** masa del producto [lb]

**hfi:** calor latente de congelación (este se obtuvo de promediar los calores latentes de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla<sup>14</sup>)

$$Q_{sol} = m * h_{fi} \quad Q_{sol} = 22,046 * 103,5 \quad Q_{sol} = 2281,761 \text{ [Btu]}$$

- **Calculo del calor sensible por debajo del punto de congelación**

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{alm} = m * C_{pl} * \Delta T \text{ [Btu]}$$

Donde:

**m:** masa del producto [lb]

---

<sup>13</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Pág. 213.

<sup>14</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

$C_{pl}$ : calor específico por debajo del punto de congelación (este se obtuvo de promediar los calores específicos de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla A7i pg 755) [Btu/lb°F]

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura entre la temperatura de congelación y la temperatura de diseño de la cámara. [°F]

$$Q_{alm} = m * C_{pl} * \Delta T \quad Q_{alm} = 22,046 * 0,422 * (29 - (-22))$$

$$Q_{alm} = 474,474 \text{ [Btu]}$$

- **Calculo del calor 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 tomamos 6 horas.

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

$$Q_{res} = m * C_{res} * t \text{ [Btu]}^{15}$$

Donde:

---

<sup>15</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 10, Pág. 216.

- **m**: masa del producto [lb]
- **C<sub>resp</sub>**: calor de respiración (este se obtuvo de promediar los calores de respiración de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla 10-13 pg 217 dossat) [Btu/lb\*h]
- **t**: tiempo de almacenamiento del producto en la cámara [h]

$$Q_{res} = m * C_{res} * t \quad Q_{res} = 22,046 * 0,0487 * 22 \quad Q_{res} = 23,62 [Btu]$$

Lo cual es un valor despreciable ya que la cantidad de producto no es significativa. Cuando se observo que el sistema de refrigeración no se debía apagar después de haber congelado el producto, se debe tener en cuenta el porcentaje de la carga que aporta las resistencias eléctricas y el calor de sublimación del agua.

<b>FUENTE DE CALOR</b>	<b>CALOR TRASNFERIDO [Btu]</b>
Calor sensible antes de congelar	1311,56
Calor latente de congelación	2281,761
Calor sensible después de congelar	474,474
Calor de respiración del producto	23,62
<b><u>CALOR TOTAL POR PRODUCTOS</u></b>	<b>4091,415</b>

**Tabla 18.** Carga total debida a productos.

- **Cargas varias**

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

Velocidad: 2600 rpm

Corriente: 0,58 A

Frecuencia: 60 hz

Voltaje: 110 V

El calor cedido por el ventilador es igual a la potencia consumida por el ventilador en las 22 horas de trabajo del sistema de refrigeración, por lo tanto, la ecuación a utilizar en este caso es:

$$Pot = V \times I = 110 \times 0,58 = 63,8 \text{ watts}$$

Partiendo del hecho de que 1 watt = 3.41 Btu/hora<sup>16</sup>, y del tiempo de trabajo del sistema de refrigeración del liofilizador equivalente a 22 horas, obtenemos:

$$63,8 \text{ watts} = 217,558 \text{ Btu/h}$$

Multiplicando por las horas de trabajo del sistema de refrigeración:

$$Q_{vent} = 217,558 \times 22 = 4786,276 \text{ Btu en 22 horas de trabajo}$$

- **Calor por resistencias eléctricas**

Las resistencias están ubicadas de tal forma que todo el calor que generan no se conduce al producto, buena parte de este calor es llevado por el sistema de refrigeración entonces calcularemos el calor de las resistencias y trabajaremos sobre la base de un 60% de calor generado es llevado por el sistema de refrigeración.

---

<sup>16</sup> Tomado de Copeland "Manual de refrigeración" Sección 15, Pág. 15-1

Entonces el calor lo calculamos con:

$$Pot = V \times I = 110 \times 1.7 = 187 \text{ watts}$$

Partiendo del hecho de que 1 watt = 3.41 Btu/hora, y del tiempo de trabajo de las resistencias de calentamiento del liofilizador equivalente a 14 horas, obtenemos:

$$187 \text{ watts} = 637,67 \text{ Btu/h}$$

Multiplicando por las horas de trabajo de las resistencias de calentamiento:

$$Q_{cal} = 637.67 \times 14 = 8927.38 \text{ Btu en 14 horas de trabajo}$$

Como vamos a trabajar sobre la base del 60% del calor entonces:

$$Q_{cal} = 8927.38 \times 0.6 = 5356.428 \text{ Btu}$$

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.

	<b>Q[Btu]</b>	<b>Q[Btu/h]</b>
<i>Cargas por paredes</i>	3147,949163	131,1645
<i>Cargas por productos</i>	4091,415	409,1415
<i>Cargas varias</i>	4786,276	199,428
	5356,428	446,369
<b>SUMA DE LAS CARGAS</b>	17382,0682	1186,103
Factor de seguridad	10%	10%
<b>CARGA TOTAL RETIRADA POR EL EQUIPO</b>	<b>19120,27498</b>	<b>1304,7133</b>

**Tabla 19.** Resumen de cargas a extraer en 22 horas de trabajo.

#### 4.2.2. Cálculo y selección del sistema de refrigeración

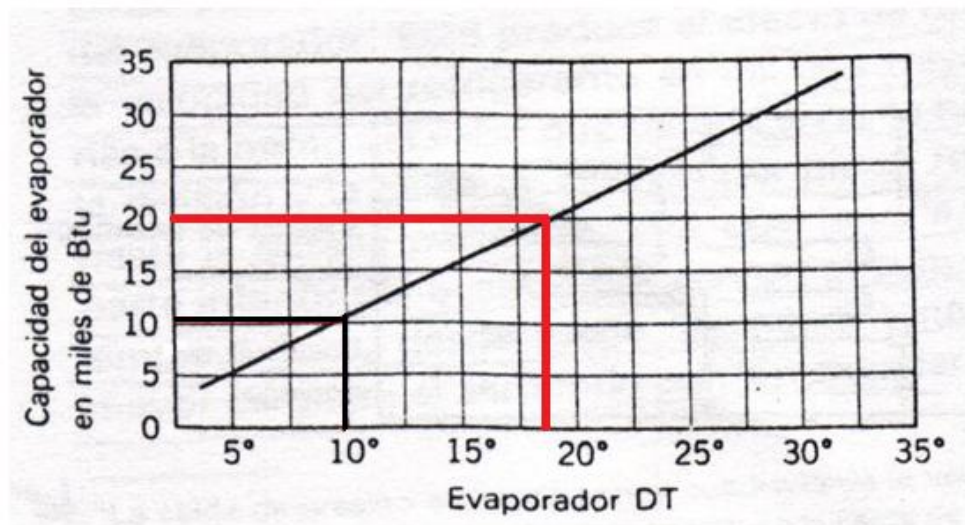
- **Cálculo y selección del evaporador**

El cálculo y selección del evaporador es una de las etapas más importantes ya que por medio de este se retira el calor necesario del producto en todos los procesos de la liofilización. Del proyecto desarrollado en el año 2008 se siguió trabajando con los mismos evaporadores que poseen las siguientes características:

- Evaporadores aleteados.
- Evaporadores de aleta separada debido a la aplicación de baja temperatura (esto buscando que el hielo que se forma no tape toda el área de intercambio de calor).
- Dos evaporadores en derivación paralela, esto produce el efecto de reducir la velocidad del refrigerante en las dos trayectorias a la mitad del valor que tendría si no se hiciera la división y la caída de presión por pie se reduce

hasta la octava parte del valor que tendría en la parte inferior del evaporador con un circuito de serie simple mejorando su capacidad.

Con el dato de la capacidad requerida del evaporador, es decir de la cantidad de energía calculada anteriormente podemos hallar la DT del evaporador con la siguiente grafica, este dato de:



**Figura 28.** Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador.

**Fuente:** Adaptada de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Fig. 11-21, Pág. 244.

Con esto tenemos un  $DT = 18^{\circ}F$  y de la siguiente ecuación sacamos la temperatura de evaporación del refrigerante:

$$DT = T_{cam} - T_{eva} \quad 18 = -22 - T_{eva} \quad T_{eva} = -40^{\circ}F = -40^{\circ}C$$

Entonces vamos a determinar si los evaporadores que seleccionaron en el proyecto anterior nos dan la capacidad de enfriamiento

Características del evaporador:

- Evaporador de dos compartimientos

Numero de tubos	24
Numero de aletas por pulgada	3 [Aletas/In]
Capacidad del evaporador	7,9 [Btu/h*°F*In]
Ancho verdadero	19,06 [In]

**Tabla 20.** Datos técnicos del evaporador

Ahora calculamos la capacidad requerida con las nuevas consideraciones de servicio de la maquina:

$$\frac{CAP}{h} = \frac{19120,27498}{22} = 869.103 \frac{Btu}{h}^{17}$$

$$\frac{\frac{CAP}{h}}{L_{alsta}} = \frac{\frac{869.103}{18}}{19,06} = 2.533 \frac{Btu}{h*°F*DT*In}^{18}$$

<sup>17</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 11, Pág. 248.

<sup>18</sup> Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 11, Pág. 248.

Para concluir cabe decir que a pesar que la carga requerida es más alta que la carga con la que inicialmente se seleccionaron los evaporadores, dan más capacidad por el mayor tiempo de servicio y por el DT mayor debido a la linealidad que se ve en la grafica de los evaporadores.

#### 4.2.2.2. Calculo de la unidad condensadora

- **Calculo del compresor**

Para el cálculo de la unidad es necesario identificar los parámetros iniciales y definir el proceso en la figura 83 para así definir todos los estados y saber que potencia se requiere y compararla con la que nos brinda la unidad ya seleccionada.

Datos conocidos:

Temperatura de condensación	40°C ó 104°F
Temperatura de evaporación	-40°C ó -40°F
Calor del sistema	19120,27498 Btu ó

**Tabla 21.** Datos de cálculo de compresor

#### Estado C

El estado C se encuentra en la entrada del compresor.

$$T_{\text{eva}} = -40^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{eva}} = p_c = 1,322 \text{ Bar}$$

$$h_c = 346.12 \text{ KJ/Kg}$$

$$s_c = 1.6461 \text{ KJ/Kg}\cdot\text{K}$$

Presión de saturación @  $T_{\text{eva}}$

Entalpia de vapor saturado @  $T_{\text{eva}}$

Entropía de vapor saturado @  $T_{\text{eva}}$

### Datos de condensación

$$T_{\text{cond}} = 40^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{cond}} = 18,255 \text{ bar} \quad \text{Presión de líquido saturado de condensación @ } T_{\text{cond}}$$

### **Estado D**

Este estado es el correspondiente a la salida del compresor y se define de la interpolación en la grafica de las propiedades del R404A grafica con la misma entropía de la salida del evaporador es decir en el estado A y a la misma presión de condensación:

$$P_{\text{cond}} = P_d = 18,255 \text{ bar}$$

$$s_d = s_c = 1.6461 \text{ [KJ/Kg}\cdot\text{K]}$$

Entropía de vapor saturado @  $T_{\text{eva}}$

$$T_d = 50 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Temperatura de la salida del compresor

$$h_d = 405 \text{ [KJ/Kg]}$$

Entalpia a la salida del compresor

### **Estado A**

Este es el correspondiente a la entrada del capilar y se define como el punto de líquido saturado a la presión de condensación.

$$T_{\text{cond}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{cond}} = P_c = 18,255 \text{ bar}$$

$$h_a = 264,08 \text{ KJ/Kg}$$

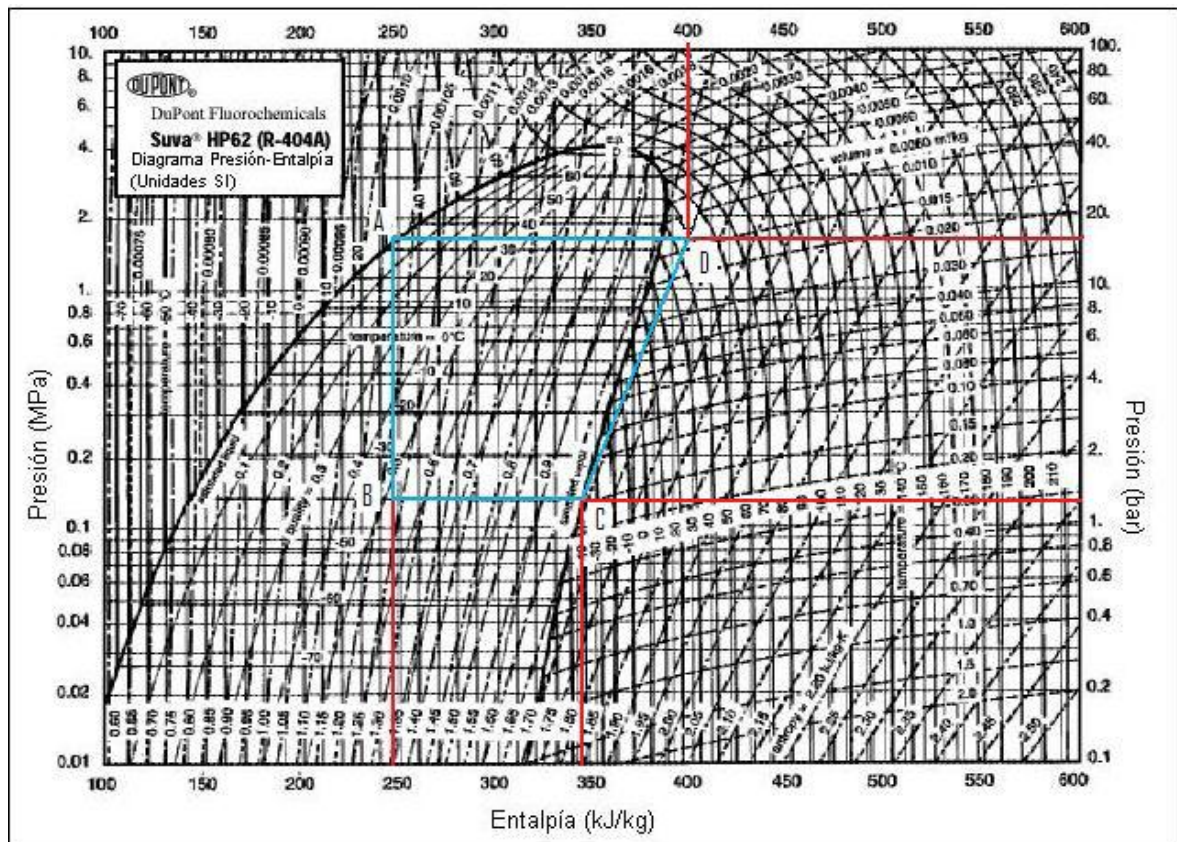
Entalpia de líquido saturado @  $P_{\text{cond}}$

## Estado B

El estado B se considera en la entrada del evaporador, es decir dónde termina la caída de presión del tubo capilar, entonces se considera un proceso de entalpia constante.

$$P_{\text{eva}} = p_c = 1,322$$

$$h_b = h_a = 264,08 \text{ KJ/Kg}$$



**Figura 83.** Diagrama de Presión-Entalpía para (R-404 A) en Unidades SI

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

Ya definidos todos los estados del ciclo hallamos el trabajo de compresor que se necesita en el nuevo sistema, para hallar la potencia mínima necesaria para comprimir el vapor de refrigerante llamada potencia teórica, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$P = W * m \left[ \frac{KJ}{min} \right]^{19}$$

Donde:

W= trabajo de compresión

m= flujo másico del refrigerante

Estos podemos hallarlos de la siguiente manera:

$$W = h_d - h_c [KJ/Kg]^{20}$$

$$m = \frac{Q_{sis}}{ER} \left[ \frac{Kg}{min} \right]^{21}$$

Donde:

- $h_d$ : Entalpia de vapor sobrecalentado a la salida del compresor, se halla siguiendo la línea isoentropica del refrigerante en la grafica 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 de vapor saturado a la temperatura de evaporación del refrigerante.
- $Q_{sis}$ = carga del sistema
- $ER$ = efecto refrigerante del sistema.

---

<sup>19</sup> Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 75.

<sup>20</sup> Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 75.

<sup>21</sup> Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 74.

El efecto refrigerante se puede hallar de la siguiente manera.

$$ER = h_c - h_b \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]^{22}$$

Donde:

$h_b$  = entalpia de liquido saturado a la salida del tubo capilar, la cual es igual a la entalpia a la salida del condensador ya que el paso por el capilar es un proceso isoentálpico.

Asi:

$$ER = h_c - h_b \qquad ER = 346.12 - 264,08 \qquad ER = 82,04 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$m = \frac{Q_{sis}}{ER} \left[ \frac{Kg}{min} \right] \qquad m = \frac{1304,7133}{82,04} * \frac{1}{60} \left[ \frac{Kg}{min} \right] \qquad m = 0,265 \left[ \frac{Kg}{min} \right]$$

$$W = h_d - h_c \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] \qquad W = 405 - 346,12 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] \qquad W = 58,88 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$$

La potencia mínima hallada es:

$$P = W * m \left[ \frac{KJ}{min} \right] \qquad P = 58,88 * 0,265 \left[ \frac{KJ}{min} \right] \qquad P = 15,6 * \frac{1}{60} \left[ \frac{KJ}{seg} \right] \qquad P = 0,26 Kw$$

En unidades inglesas seria:

$$\frac{1HP}{0,746 Kw} * 0,26Kw \qquad \mathbf{P = 0,348 Kw}$$

<sup>22</sup> Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 73.

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 perdidas de potencia. La potencia real es por lo general 30 a 50% mayor que la potencia teórica calculada dependiendo de la eficiencia del compresor.

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

$$P = 0,35 + (0,35 \times 0,5) = 0,525 \text{ HP}$$

Por lo tanto el compresor de ¾HP TECUMSEH CAJ2432Z disponible se puede utilizar puesto que nos brinda la potencia requerida para el proceso.

- **Calculo del condensador**

Para el cálculo del condensador buscamos el calor de rechazo o calor removido por lb de refrigerante en el condensador:

$$CR = h_d - h_a \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]^{23} \quad CR = 405 - 264,08 \quad CR = 140,92 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$$

Por lo tanto la capacidad teórica del condensador es:

$$Q_r = m * (h_d - h_a) \quad Q_r = 0,256 * (405 - 246,08) \quad Q_r = 40,6835 \left[ \frac{KJ}{min} \right]$$

---

<sup>23</sup> Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 78

$$Q_r = 42,92 \left[ \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \right] \quad Q_r = 2575,26 \left[ \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right] * 0,293071 \frac{\left[ \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right]}{\text{Watts}} \quad Q_r = 754,53 \text{ Watts}$$

El condensador disponible no cuenta con la capacidad de remover el calor de 754,53 Watts, puesto que la capacidad de refrigerar de este condensador es de 441 Watts, sin embargo la unidad condensadora si entrega los ¾HP que se requiere en la maquina.

#### 4.2.2.3. Selección del Tubo Capilar

De la gráfica 84 tabla para el refrigerante R404A, en la cual es necesario saber la capacidad frigorífica del compresor, que para nuestros caso es igual a la capacidad del compresor seleccionado (1304,7133 Btu/h) equivalente a 328,7 Kcal/h.

Los datos de esta tabla son para unas condiciones de Tcond = 45°C y Tevap = -30 °C que son muy cercanas a las condiciones de nuestro proyecto.

TABLE FOR REFRIGERANT R404A (LBP)															
		Capillary tube length (m)													
QASH	M	Capillary tube internal diameter (mm) & Evaporating temperature (°C)													
		0,6		0,7		0,8		0,9		1		1,2		1,5	
kcal/h	kg/h	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3
130	3,51	1,39	1,47	3,22	3,38										
135	3,64	1,29	1,36	2,99	3,13										
140	3,78	1,20	1,26	2,77	2,91										
145	3,91	1,11	1,18	2,58	2,71										
150	4,05	1,04	1,10	2,41	2,52										
155	4,18		1,03	2,25	2,36										
160	4,32			2,11	2,21										
165	4,45			1,98	2,08										
170	4,59			1,87	1,96										
175	4,72			1,76	1,84	3,68	3,81								
180	4,86			1,66	1,74	3,48	3,60								
190	5,13			1,49	1,56	3,11	3,22								
200	5,40			1,34	1,40	2,80	2,90								
225	6,07			1,05	1,10	2,20	2,28								
250	6,74					1,77	1,83	3,35	3,49						
275	7,42					1,46	1,51	2,75	2,87						
300	8,09					1,22	1,26	2,30	2,40						
325	8,77					1,04	1,07	1,94	2,03	3,55	3,69				
350	9,44							1,67	1,74	3,04	3,17				
375	10,12							1,45	1,51	2,64	2,74				
400	10,79							1,27	1,32	2,30	2,40				
425	11,46							1,12	1,17	2,03	2,11				
450	12,14								1,04	1,80	1,88				
475	12,81									1,61	1,68				
500	13,49									1,45	1,51				
525	14,16									1,31	1,36	3,54	3,78		

**Figura 84.** Tabla para selección del tubo capilar para refrigerante 404.

**Fuente:** <http://bit.ly/cwWmZc>

Con la ayuda de la grafica anterior encontramos que la longitud del tubo capilar con un diámetro interno de 1mm es de  $L_{cap}=2,64 m$ .

#### 4.2.2.4. Cálculos de la bomba de vacío

Aquí trabajaremos de la misma forma que en los cálculos anteriores calculando las necesidades del nuevo proyecto y comparando lo que tenemos disponible, para eso necesitamos los siguientes datos:

#### 4.2.2.5 Dimensiones de la cámara de trabajo:

Diámetro interno: 60cm = 1,9685 ft

Profundidad: 90 cm = 2,9527 ft

Volumen de la cámara:  $\pi * r^2 * L$        $V = \pi * \left(\frac{1,9685}{2}\right)^2 * 2,9527$        $V = 8,98648 \text{ ft}^3$

De acuerdo con los datos requeridos la bomba de vacío disponible del proyecto anterior QVP-800, nos da un caudal de 8 CFM, de la figura 85 obtenemos el rendimiento suficiente, superando las pérdidas por fugas; en la figura 86 se observa la bomba de vacío seleccionada.

MANUAL DE SELECCION		VACUUM PUMP		
PARAMETROS TECNICOS				
CARACTERISTICAS	UNID.	QVP-800	QVP-2000	QVP-4000
Caudal nominal	CFM	8	20	40
Capacidad de aceite	ml	500	5800	5000
Presión total última obtenible	Pa	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
Potencia del Motor	HP	3/4	2	3
Voltaje	V/Hz	110/60	110/60	110/60
Peso neto	Kg	20,5	70	120
Dimensiones	mm	385x140x280	395X255X835	395X255X950

**Figura 85 Datos técnicos de bombas de vacío VACUUM PUMP.**

Fuente: Manual de selección VACUUM PUMP.



**Figura 86. Bomba de Vácuo VACUUM PUMP modelo QVP-800.**

Fuente: Fuente: Manual de selección VACUUM PUMP.

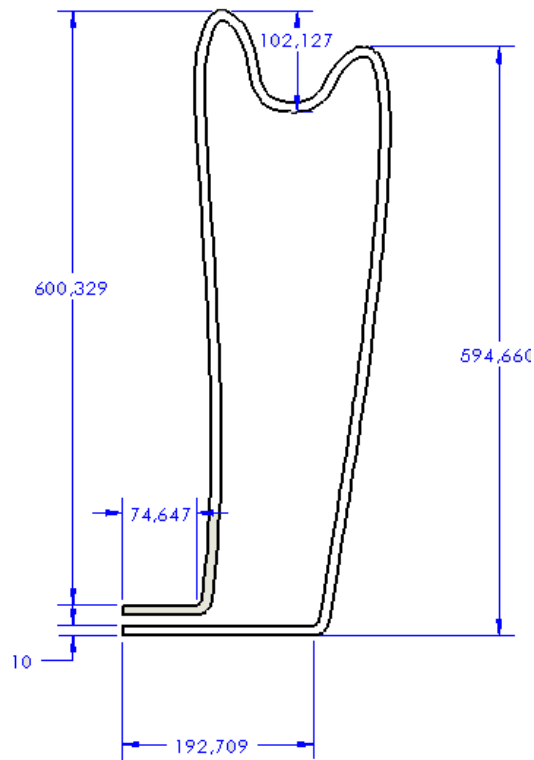
#### **4.2.2.5. Cálculos del sistema de calentamiento**

El sistema de calentamiento es el encargado de generar el desprendimiento de la humedad del producto en forma de vapor, una vez el producto ha sido llevado a la temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$  y en la cámara de trabajo se baja a una presión de vacío de 0,089 psi, se debe comenzar a suministrar calor al producto a través de unas resistencias de calentamiento instaladas en los portabandejas con el fin de acelerar la sublimación.

Las resistencias se conectar pueden conectara 220 Volts consumiendo 2,9 Amp y a 110 Volts consumiendo 1,7 Amp; entonces calculemos la potencia generada.

- **Selección de las resistencias de calentamiento.**

Las resistencias de calentamiento se adecuaron de acuerdo a las medidas de las bandejas buscando la existencia de un buen contacto y buena distribución del calor para el producto (ver figura 87 y 88).



**Figura 87.** Detalles de resistencias eléctricas

La longitud total de la resistencia es 1,70 m y su material es una barra de acero inoxidable de 1/4 in, por eficiencia de calentamiento, para hallar la potencia de la resistencia tomamos los datos de calor específico y densidad del cobre puro:

$$C_{p_{\text{aceroInox}}} = 477 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}^{24}$$

$$\rho_{\text{aceroInox}} = 7900 \text{ Kg/m}^3^{25}$$

Con la densidad y el volumen se halló la masa de cobre:

<sup>24</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A3, Pág. 720.

<sup>25</sup> Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A3, Pág. 720.

$$Vol = \pi * r^2 * L \quad Vol = \pi * 0,003175^2 * 1,70 \quad Vol = 0,0000538377 \text{ m}^3$$

$$m = \rho * Vol \quad m = 7900 * 0,0000538377 \quad m = 0,425317 \text{ Kg}$$

Para determinar la potencia se requiere conocer la temperatura de calentamiento de la resistencia y el tiempo de trabajo; la temperatura máxima a la que trabajaremos será de 100°C debido el sistema de refrigeración se lleva buena parte de este calor generado y se estimó que el calentamiento se realice en 4 horas ya que el desprendimiento de humedad debe ser lento.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

$$Q = 0,425317 * 4770 * (333,15 - 238,15) \quad Q = 19273,2666 \text{ J}$$

$$Q = 192732,666 * \frac{1}{105,506} \quad Q = 913,373 \text{ Btu}$$

Donde  $\Delta T$  es el cambio de temperatura de las resistencias.

Considerando que el calentamiento se realiza en 4 horas entonces tenemos

$$Pot = \frac{Q}{t} \quad Pot = \frac{913,373}{4} \quad Pot = 228,3432 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \quad 1 \text{ Watt} = 3,41 \text{ Btu/hora}$$

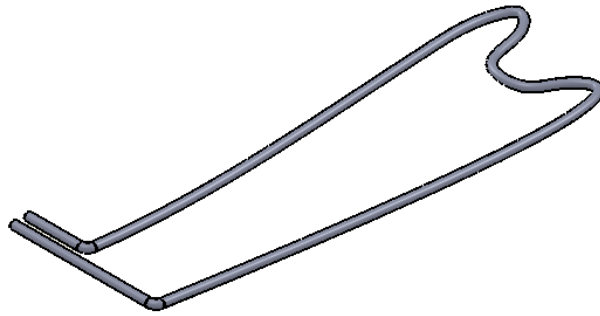
$$Pot = 66,96 \text{ Watts}$$

El sistema de calentamiento se compone entonces por tres resistencias eléctricas que teóricamente disipan 66,96 Watts.

$$Pot = V * I \quad Pot = 220 * 2,9 \quad Pot_{int} = 638 \text{ Watts}$$

Entonces este sistema tiene una eficiencia de:

$$\eta = \frac{Pot}{Pot_{int}} \quad \eta = \frac{66,96}{638} * 100 \quad \eta = 10,5\%$$



**Figura 88.** Esquema de resistencias de calentamiento modelado en CAD

#### **4.2.2.6. Sistema de control y potencia**

Para cumplir con la aplicación del presente proyecto de realizar el estudio de la implementación de un proceso de liofilización para productos agroindustriales en el medio local, se requiere dar un enfoque al diseño del liofilizador piloto como una aplicación netamente académica en la que se requiere que cada una de las etapas y condiciones del proceso sean realizadas de forma manual y visual por los estudiantes quienes realicen las prácticas, para poder familiarizarse con cada una de las fases del proceso de liofilización y con los subsistemas que componen el equipo.

Es necesario también contar con elementos que permitan realizar el monitoreo del comportamiento de los productos y la evolución del proceso dentro de la cámara de trabajo, para obtener más datos de cara al estudio de los resultados de la experimentación del proceso.

De acuerdo con esto se busca que la operación del equipo se realice de la forma más manual posible y con opción de visualización de los parámetros de progreso del proceso.

El montaje y selección del control se estructuró de acuerdo al orden de activación del funcionamiento de los sistemas de refrigeración, vacío, calentamiento y dentro de las distintas distribuciones, sus periodos de operación, de retardo, su control y sus señales de mando.

Para esto se hace conveniente describir el tipo de mando de control a usar para cada subsistema; detrás del cual se detallará cada uno de los arreglos dispuestos para la operación.

- **Control del sistema de refrigeración.**

Para el control del sistema de refrigeración se escogió un controlador electrónico EKC 201 de Danfoss (ver figura 89) el cuál se ajusta adecuadamente a los requerimientos de funcionamiento.

El controlador electrónico EKC-201 de Danfoss es un dispositivo flexible que consiste en un termostato electrónico en el que se han integrado algunas funciones técnicas de refrigeración de forma que puede sustituir a un conjunto de termostatos y programadores tradicionales.

El controlador cuenta con dos sensores de temperatura, que captan las temperaturas de la cámara de trabajo y la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador; una entrada digital (DI), y una serie de funciones de control de tiempo, a través del cual es posible programar los intervalos de funcionamiento y

parada del compresor, intervalo entre desescarches, como también una serie de periodos de retardo del ventilador y alarmas.

El procesamiento interno por parte del controlador de estas señales captadas (temperatura) o programadas (intervalos de tiempo y límites de temperatura), son las que hacen posible el comando de los cuatro relés de salida que posee (relé de refrigeración, relé de descarche, relé de ventiladores y relé de alarmas o luces); con lo cual se da lugar al apropiado control de temperatura on/off en el compresor o solenoide, control de descarche eléctrico o descarche por “gas caliente”, control del ventilador del evaporador y control de las señales para alarma o luces.



**Figura 89.** Controlador EKC 201 de Danfoss.

**Fuente:** [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

- **Principio de funcionamiento.**

El control de temperatura se realiza a través de una sonda o sensor Pt 1000 PTC ( $R_{25} = 1000 \text{ ohm}$ ), el cual normalmente se colocará en la corriente de aire a la entrada, o salida del evaporador.

Los controladores permiten realizar el control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide y se han agrupado en cuatro aplicaciones principales, dependiendo del tipo de desescarche y su control.

Los controladores se utilizan para (ver figura 89):

- control de temperatura
- control de desescarche
- control de ventilador
- señales de alarma

Función	Aplicación			
	1	2	3	4
Control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide				
Desescarche natural				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por temperatura				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por tiempo				
Control del ventilador				

**Figura 29. Aplicaciones del controlador EKC 201 de Danfoss.**

**Fuente:** Folleto Técnico “Controladores electrónicos EKC 201 y EKC 301” Danfoss 2006

Este controlador presenta variedades en su funcionamiento, la programación de las posibles funciones están explicadas en el folleto técnico anexo, el nuevo diseño del liofilizador no tiene la necesidad de controlar todas las funciones que este dispositivo nos brinda.

- Descongelamiento

El diseño de la cámara y la cantidad de producto no presenta la humedad correspondiente para descongelar, además se evita perforaciones a la cámara cuidando así la condición de hermeticidad que se debe presentar en el proceso.

- Refrigeración.

El sistema de refrigeración debe estar encendido en todo momento para que pueda atrapar la humedad proveniente de la fruta, por esta razón no se necesita de encendido y apagado por periodos.

- Ventilador

El ventilador en la etapa de congelación nos da la distribución de aire posible para el enfriamiento, y en las otras dos etapas nos brinda calor para la sublimación, por esta razón no tiene periodos de encendido y apagado.

Sin embargo se utilizo el controlador para censar la temperatura de condensación del gas refrigerante.

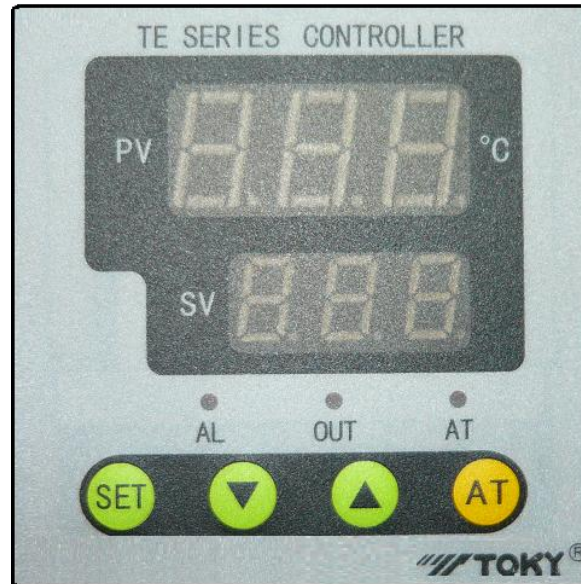
- **Control del sistema de calentamiento.**

Una vez se logra el vacío en la cámara de trabajo se requiere encender las resistencias de calentamiento del producto para iniciar el proceso de desprendimiento de vapor, para el diseño del liofilizador piloto se requiere que esta función se maneje de forma manual, ya que el control del sistema de vacío se realiza con un manovacuómetro análogo, el cuál no permite el envío de una señal digital para el encendido de las resistencias.

Para el funcionamiento del sistema de calentamiento se requiere hacer control de dos variables que definen su encendido y apagado; la temperatura del producto a lo largo del proceso y la temperatura de las resistencias durante la etapa de calentamiento.

Cuando se alcanza la presión de vacío dentro de la cámara de trabajo, se debe visualizar la temperatura del producto, cuando esta se logra mantener en  $-30^{\circ}\text{C}$ , se enciende el sistema de calentamiento de forma manual, se empieza a realizar el desprendimiento de vapor seco del producto manteniendo la cámara con el vacío suficiente y se debe controlar que los productos en ningún momento sobrepasen un valor de temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ .

Para realizar el control de temperatura de los productos y las resistencias se seleccionaron dos controladores de temperatura TOKY TE7/TM7 (ver figura 91) los cuales a través de una termocupla permiten visualizar la evolución de las temperaturas a lo largo del proceso y manejar el encendido y apagado de las resistencias durante la etapa de calentamiento.



**Figura 91.** Controlador de temperatura TOKY TE7/TM7

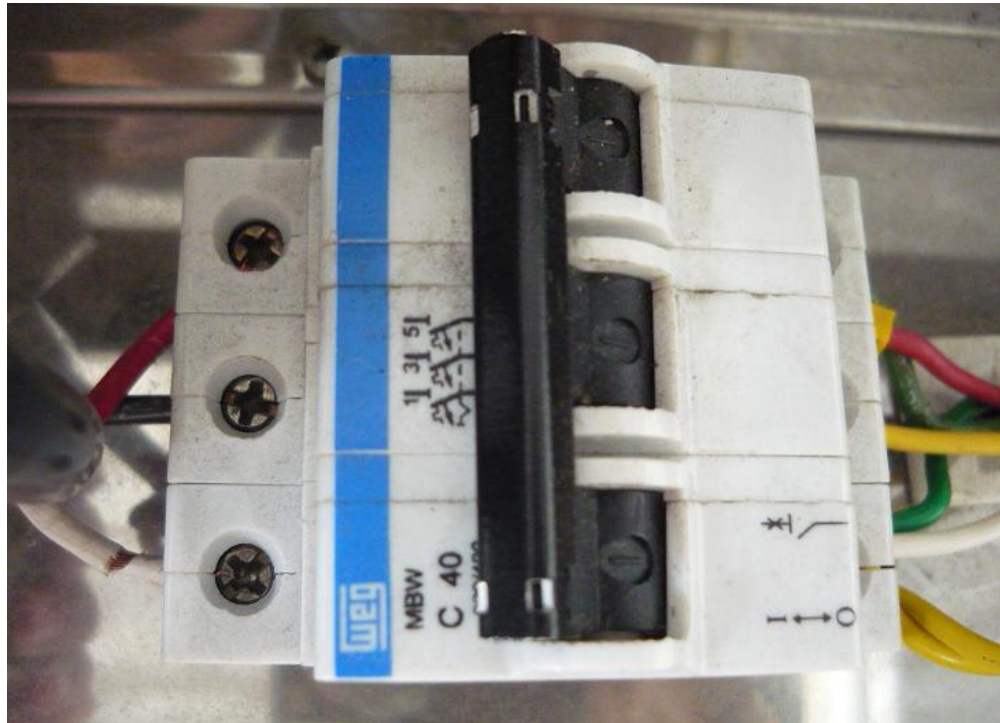
- **Sistema de potencia eléctrico del liofilizador Piloto.**

El sistema de potencia eléctrico del liofilizador piloto requiere una fuente de tensión de 220V, dado que la mayoría de los elementos que hacen parte del mismo así lo demandan; sin embargo, el controlador electrónico EKC 201 es el único dispositivo que necesita para su funcionamiento una fuente de tensión de 12V, para lo cual es empleado un convertidor de voltaje 220V a 12V (ver figura 92) para mecanismos de hasta 50 Watt.



**Figura 92.** Convertidor de Voltaje Danfoss 220V-12V

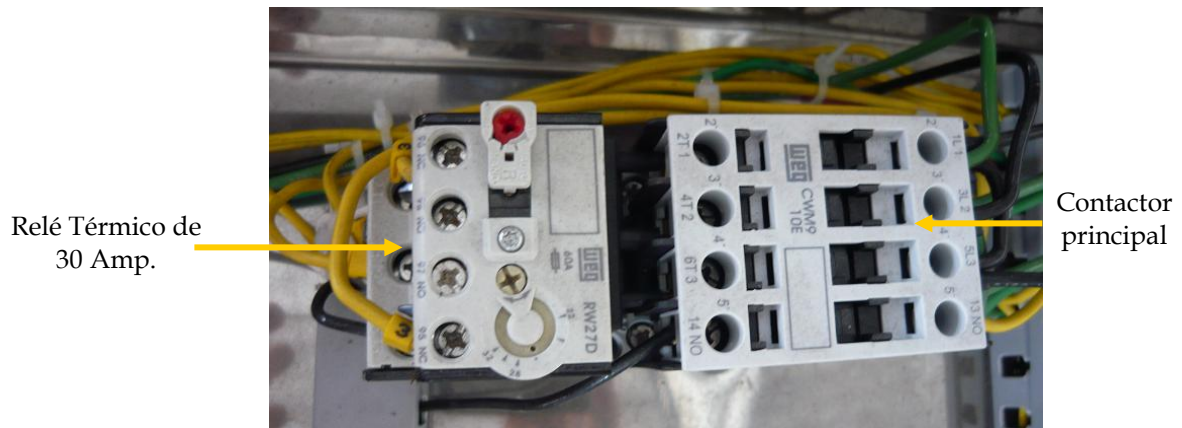
El sistema de potencia eléctrica está compuesto por un breaker totalizador (ver figura 93) que por seguridad se instaló para efectos de control de sobrecargas en el sistema, por medio de este elemento se energizan los demás componentes; un contactor principal y cuatro relés que permiten o interrumpen el flujo de corriente hacia los elementos que requieren de energía durante ciertos momentos específicos.



**Figura 93.** Breaker trifásico de 50 Amp.

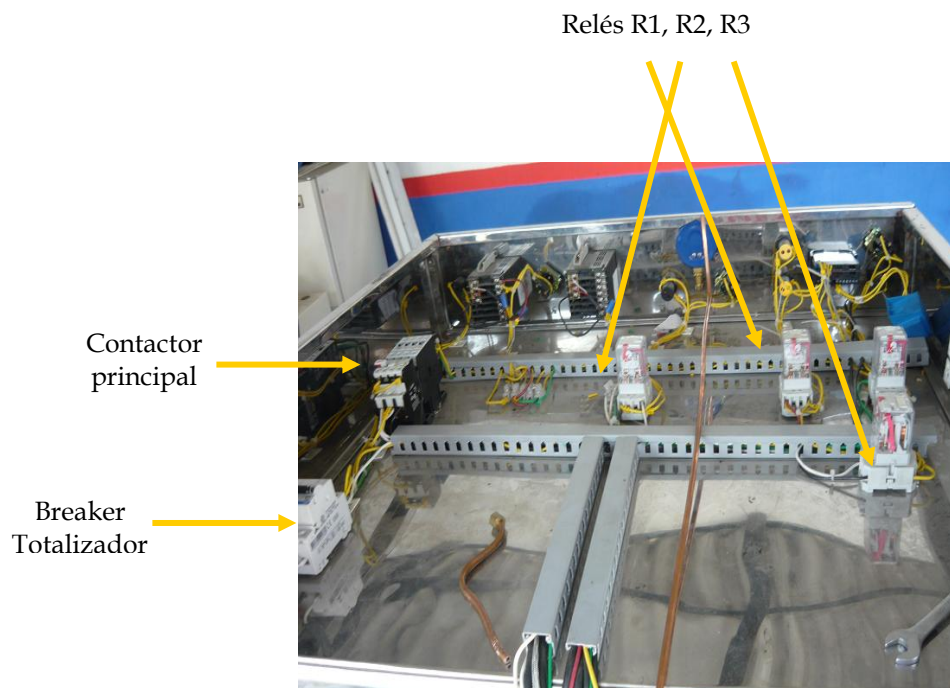
El contactor principal es un relevo de 1 Hp a 220 V con cabeza para contactos auxiliares, integrado a él se instaló un Relé térmico de 20 Amp (ver figura 93). Para protección por temperaturas del sistema.

El contactor principal es alimentado por el breaker totalizador y este a su vez alimenta a los relés R1, R2 y R3 es alimentado directamente por el breaker totalizador.



**Figura 94.** Contactor principal con el relé de protección térmica.

Los relés tienen la función de suministrar la potencia eléctrica a los subsistemas del liofilizador piloto para realizar su tarea (ver figura 95); el relé R1 (ver figura 96) es el encargado de arrancar las el sistema de refrigeración y el ventilador del evaporador, el R2 recibe la señal del switch de vacío de activación manual y da paso al funcionamiento de la bomba de vacío, el relé R3 enciende las resistencias eléctricas. Cuando se enciende el breaker totalizador se encienden los controladores TOKY que muestran la temperatura del producto  $t$  de la bandeja, aproximándose esta última a la de la cámara, en la figura 97 se visualizan los planos eléctricos del sistema.



**Figura 95.** Vista panorámica del sistema de potencia eléctrica.



**Figura 96.** Relevos VCP de 8 pines a 220 V (Relés R1, R2 y R3).

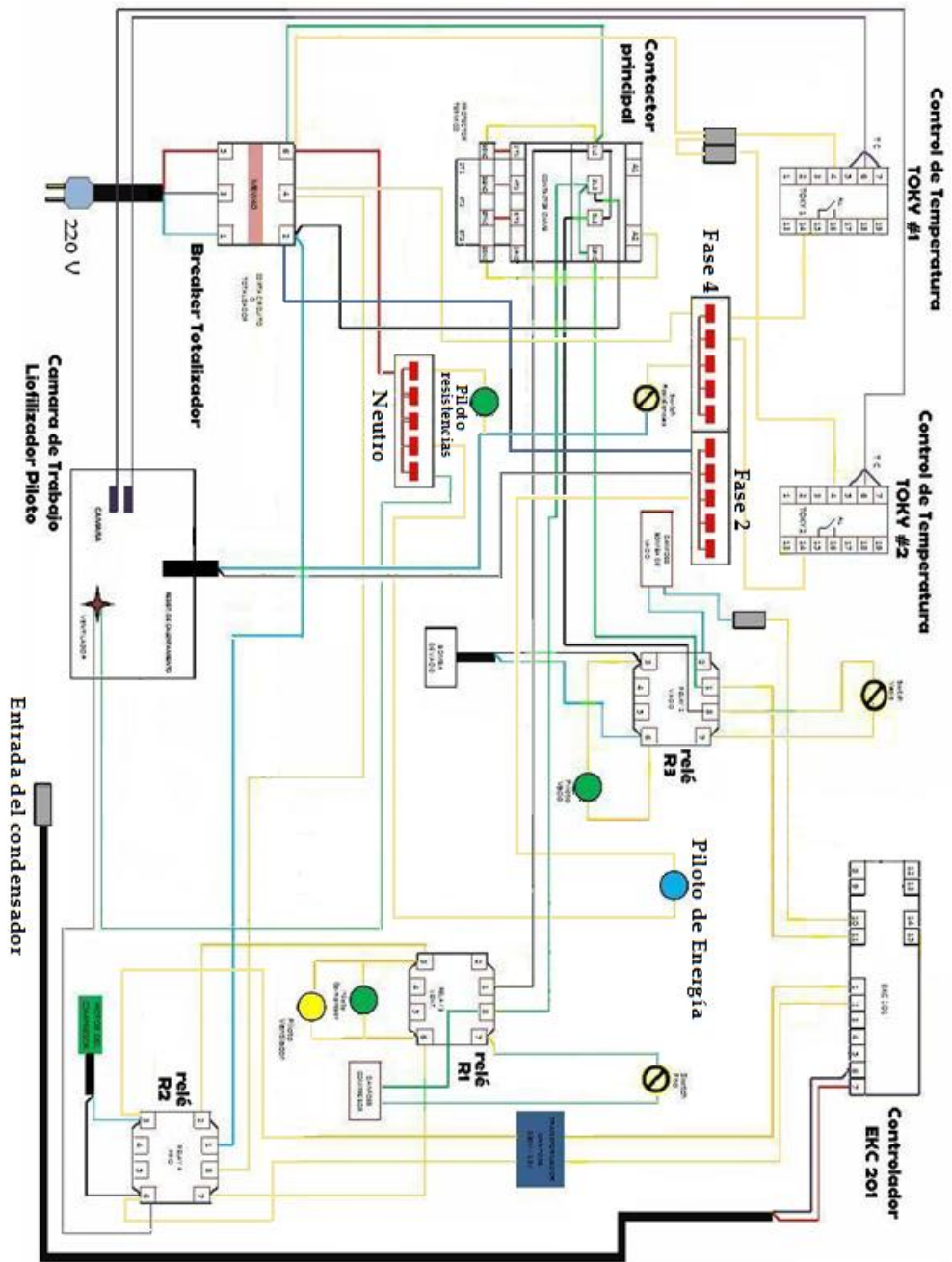


Figura 97. Esquema eléctrico del sistema

## **5. ARGUMENTACION DE DISEÑO.**

Con la recuperación de la capacidad operativa del liofilizador piloto es posible reproducir el proceso de liofilización en condiciones idénticas a un equipo industrial, con lo que se puede dar paso a la realización del estudio sobre su aplicabilidad en el medio local, buscando dar cobertura a la necesidad de obtener nuevos productos agroindustriales y fomentar el desarrollo de este método de deshidratación en frío.

En el capítulo anterior se determinaron todos los cálculos y los parámetros de selección de los sistemas y elementos que componen el liofilizador piloto. A continuación se describirá el sistema operativo del equipo y cada uno de los elementos que lo componen y se corroborará que cumplan con los requerimientos de diseño aquí calculados.

### **5.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO.**

El liofilizador piloto es un sistema manual de liofilización, que permite realizar la deshidratación de muestras de productos agroindustriales mediante secado al vacío de manera óptima y eficiente.

Consta de una estructura base y cuatro subsistemas principales que se encargan de realizar las funciones básicas para realizar el proceso de liofilización:

- Cámara de trabajo.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de Vacío.
- Sistema de calentamiento.

La estructura base consiste en un mueble en el cual se encuentra ubicada la cámara de trabajo y sobre el que se soportan cada uno de los componentes de los sistemas principales del equipo.

Dentro de la cámara de trabajo se encuentran el modulo portabandejas sobre las cuales se colocan las bandejas cargadas con el producto a liofilizar, en la parte inferior de la bandeja se encuentran las resistencias eléctricas que tienen por función el suministro de calor a los productos una vez se ha llevado a los valores de temperatura y presión requeridos dentro de la cámara de trabajo.

El sistema de refrigeración esta ubicado en la parte inferior del mueble y basa su principio de funcionamiento en una unidad condensadora y un evaporador aleteado ubicado dentro de la cámara de trabajo y que son los encargados de lograr bajar la temperatura de los productos dentro de la cámara.

La operación se inicia con la alimentación del producto a liofilizar en la cámara de trabajo, en donde el sistema de refrigeración se encarga de llevar la temperatura del producto por debajo de  $-30^{\circ}\text{C}$ .

El sistema para su operación tiene un tablero de control que por ergonomía y facilidad de visualización de datos por parte del operario se encuentra ubicado en la parte superior del mueble, este tablero se compone de tres switches con los que se energizan los subsistemas de la máquina, un controlador para el sistema de refrigeración, un manovacúmetro que censa desde la presión atmosférica y un vacúmetro que indica la presión de vacío dentro de la cámara y dos controles de temperatura encargados de monitorear y controlar las temperaturas del producto y las resistencias de calentamiento.

El sistema de vacío está compuesto por una bomba de vacío que se encuentra ubicada en la parte inferior del mueble junto al sistema de refrigeración y es el encargado de llevar la cámara de trabajo a una presión de vacío de 690 mmHg.

Una vez se ha logrado el vacío la temperatura del producto baja entre  $-31^{\circ}\text{C}$  y  $-32^{\circ}\text{C}$  al tener estas condiciones, se enciende el sistema de calentamiento para continuar con el desarrollo del proceso de liofilización, se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2%.

## **5.2. Descripción de los componentes.**

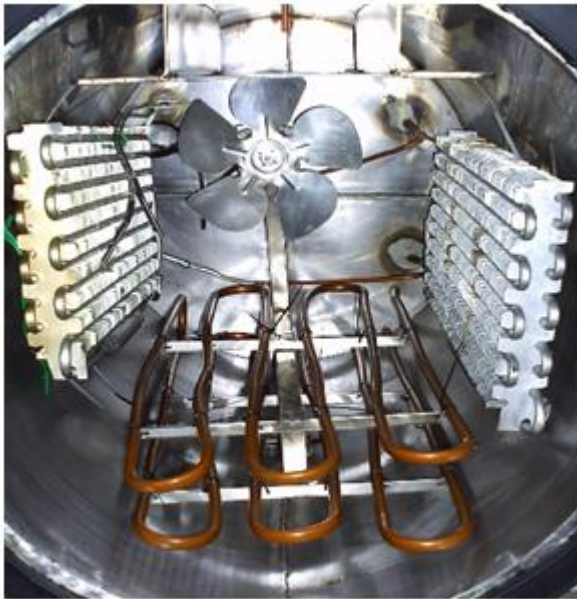
Todos los elementos y materiales de construcción de los sistemas que componen el liofilizador piloto son de fácil consecución en el mercado local, se revisó su estandarización y soporte técnico.

A continuación se muestra un resumen de los diferentes componentes que tiene el liofilizador piloto y de los cuales se hará una breve descripción en este capítulo.

### **5.2.1. Cámara de trabajo**

La cámara de trabajo (ver figura 97) es el lugar donde se alojará el modulo portabandejas (ver figura 98) con el producto además de los serpentines evaporadores, aquí se liofilizara el producto agroindustrial; la cámara de trabajo es de diseño cilíndrico de 60 cm de diámetro y 90 cm de fondo y está construida completamente en acero inoxidable AISI 304 calibre 3 mm con todas las uniones soldadas con el fin de evitar cualquier fuga en las uniones.

Dentro de la cámara de trabajo se encuentran el subsistema del modulo portabandejas aquí encontramos las cinco bandejas con sus respectivas resistencias eléctricas.



**Figura 30.** Cámara de trabajo



**Figura 31.** Modulo Portabandejas

### **5.2.2. Sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración está compuesto básicamente por cuatro elementos: Evaporador, compresor, condensador y el tubo capilar. A continuación se describirá estos elementos del liofilizador piloto.

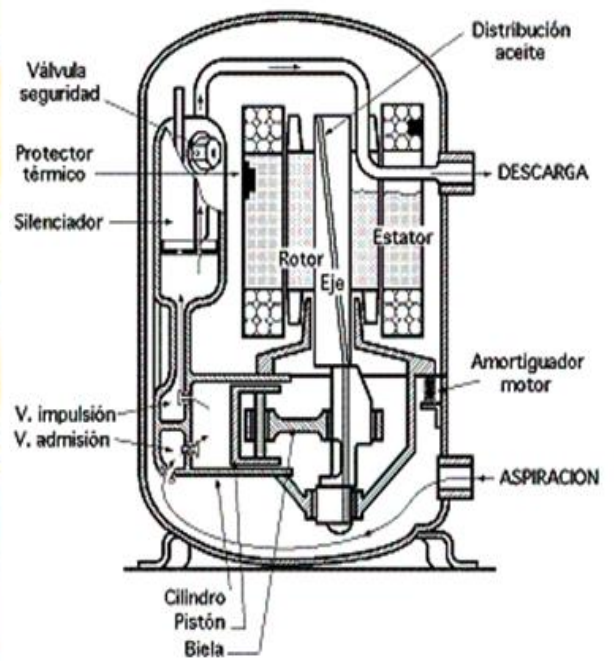
### 5.2.2.1. Elementos principales del sistema de refrigeración

- **Moto compresor hermético de pistones**

La tarea principal del compresor (ver figura 100 y 101) en el circuito de refrigeración es succionar vapor del lado de baja presión y comprimirlo para descargarlo hacia el lado de alta presión. En la figura # se puede observar los componentes internos del compresor hermético TECUMSEH CAJ2432Z



**Figura 100.** Compresor Tecumseh



**Figura 32.** Detalles de compresor

El compresor hermético TECUMSEH CAJ2432Z tiene una gran flexibilidad en cuanto a sus aplicaciones; pudiéndose utilizar en aplicaciones de baja (LBP), media (MBP) y alta temperatura (HBP).

Los parámetros de selección del refrigerante van íntimamente ligados a la aplicación del sistema de refrigeración y por ende a las características del compresor utilizado para tal fin. Debido a lo anterior, y a la imperante necesidad de proteger la capa de ozono, es indiscutible la utilización de un tipo de refrigerante HFC (Hidrofluorocarbonado), específicamente el R-404A, el cual presenta varias ventajas sobre los otros refrigerantes

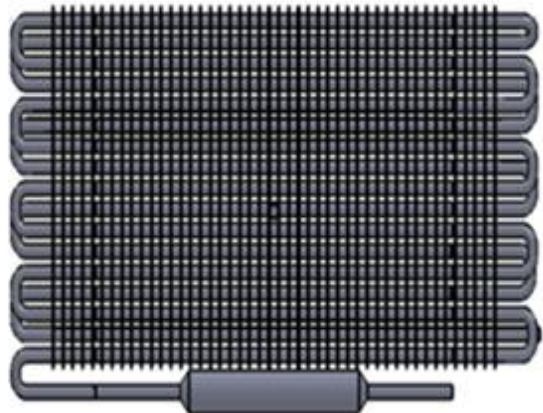
- **Serpentines evaporadores**

El evaporador es el encargado de retirar el calor del producto para llevar a cabo el proceso de liofilización.

El evaporador del liofilizador piloto (ver figura 102 y 103) está constituido por dos evaporadores JORVAN de aluminio montados en paralelo y dispuestos en las paredes laterales del producto, cada uno de dos hileras de 8 tubos en fondo de 19,5 in de largo y 3/8" de diámetro, su capacidad es de 1500 btu/hora, tiene 76 aletas en una disposición de 4 aletas/in.



**Figura 102.** Evaporador JORVAN montado en la cámara de trabajo.



**Figura 103.** Evaporador JORVAN simulado en CAD.

- **Tubo capilar**

Todo sistema de refrigeración necesita de un elemento de control de flujo de refrigerante y éste puede ser una válvula de expansión o un tubo capilar.

El tubo capilar además de unir el condensador con el evaporador, permite la caída de presión del fluido frigorífero causada por el drástico cambio de sección en él, lo cual, permite la alimentación del evaporador con refrigerante expandido, sin embargo, no logra un ajuste automático de fluido hacia el evaporador en función de la carga del mismo, como si lo pueden hacer otros dispositivos tal como la válvula de expansión.



**Figura 104.** Tubo capilar simulado en CAD



**Figura 105.** Tubo capilar

Sin embargo en circuitos dotados de tubo capilar, las presiones en los lados de succión y descarga se igualan durante la parada del compresor, lo que facilita posteriormente su puesta en marcha y permite la utilización de un motor de bajo par de arranque.

- **Condensador.**

El condensador es un intercambiador térmico que se usa para transmitir al medio de enfriamiento (aire) el calor de los vapores descargados por el compresor. El condensador recibe vapor caliente a alta presión del compresor, lo enfría y lo regresa en estado líquido. Este enfriamiento lo realiza por medio de aire forzado debido a un ventilador. El condensador posee un intercambiador de calor, por los tubos del mismo circula el vapor caliente que descarga el compresor y por fuera de los tubos el aire atmosférico, los tubos son del tipo aleteado. La cantidad de calor a evacuar por el condensador es superior a la producida por el evaporador.



**Figura 106.** Condensador simulado en CAD



**Figura 107.** Condensador

### 5.2.2.2. Otros componentes del Sistema de refrigeración

- **Acumulador de líquido de succión**

El acumulador de succión o botella de aspiración tiene por objeto, evitar la aspiración accidental de fluido frigorígeno no evaporado en el compresor, ya que los compresores son extremadamente susceptibles a daños por refrigerante en estado líquido. Un excesivo retorno de líquido al compresor puede no sólo provocar una dilución del aceite (pérdida de lubricación), sino que la pérdida completa de la carga de aceite. Además el líquido en el compresor provoca deterioro debido al golpeteo de los pistones al tratar de comprimir el refrigerante líquido (golpe de líquido) y un gasto prematuro de los cojinetes.



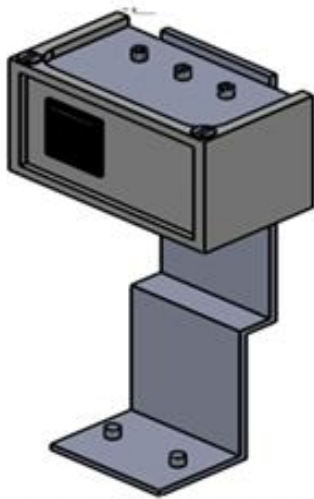
**Figura 108.** Recipiente de líquido simulado en CAD.



**Figura 109.** Recipiente de líquido

- **Control de presión de succión.**

Con el fin de proteger el compresor en caso de una baja presión en la succión se dispone de un controlador de presión de succión, al censar la baja presión el controlador envía una señal al relé y este interrumpe el funcionamiento del compresor.



**Figura 110.** Presóstato simulado en CAD.



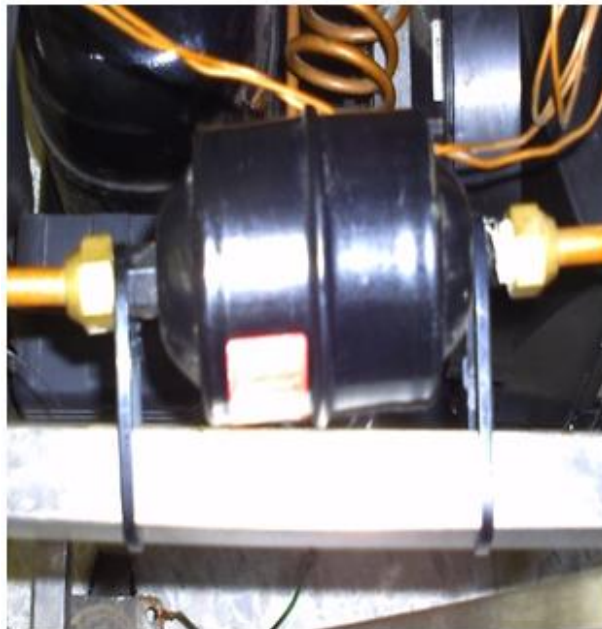
**Figura 111.** Presóstato Danfoss.

### **Filtro deshidratador de la línea de líquido**

Su función es retener la contaminación existente en el sistema (humedad, ácidos, suciedad, lodos, barnices, rebabas, ceras) que puedan causar daño al compresor o a otros elementos como el tubo capilar. Denominados también filtros secadores, mantiene el contenido de humedad del refrigerante por debajo de un valor máximo.



**Figura 33. Detalles del Filtro deshidratador Danffos.**

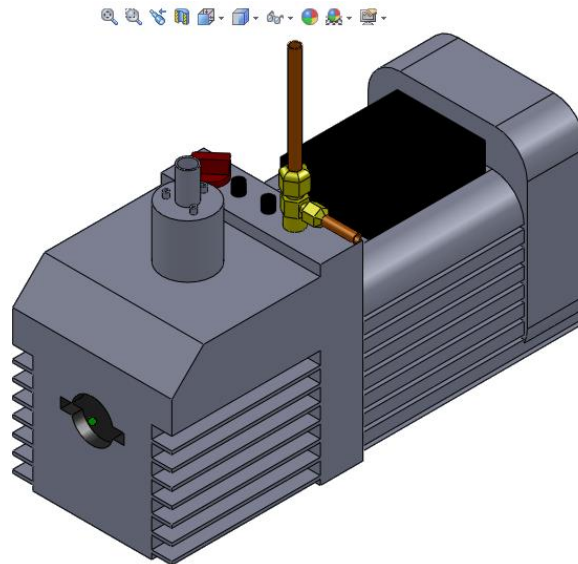


**Figura 34. Filtro deshidratador Danffos.**

### 5.2.3 Sistema de vacío

#### 5.2.3.1. Bomba de vacío

La bomba de vacío es la encargada de lograr la presión dentro de la cámara de 610 Pa, que se aproxima a una lectura del vacuómetro de 69 cm Hg, para poder dar paso al proceso de retiro de humedad de los productos. Está compuesto por una bomba de vacío de paletas rotativas en baño de aceite de doble efecto VACUUM PUMP modelo QVP-800, de 8 CFM de caudal, diseñada para ser utilizada en aplicaciones de medio y alto vacío, indicada para caudales elevados de bombeo en condiciones duras de trabajo. Sus dimensiones son 385 mm x 140 mm x 280 mm, y pesa 20,5 Kg. Utiliza motor de  $\frac{3}{4}$  hp y un voltaje de 110 V a 60 Hz.



**Figura 35. Bomba de vacío simulada en CAD**



**Figura 36. Bomba de vacío.**

### 5.2.3.2. Llaves de paso

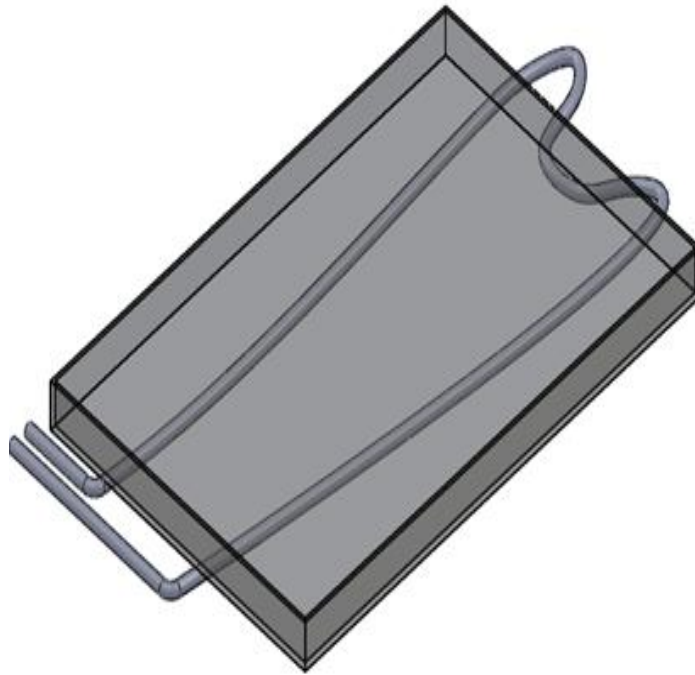
Son los elementos encargados de presurizar la cámara una vez terminado el proceso; éstas a su vez cumplen la función de bloquear el ascenso del aceite en condición de vacío ya que al apagar la bomba el aceite tiende a subir a la cámara de trabajo por la diferencia de presiones.



**Figura 37. Llaves de paso a la bomba de vacío.**

### 5.2.4. Sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento es el encargado de generar el desprendimiento de la humedad del producto en forma de vapor cuando se alcanzan los valores de presión y temperatura requeridos para el producto dentro de la cámara; el sistema de calentamiento está compuesto por cinco resistencias eléctricas presentes en cada bandeja estas resistencias tienen una longitud de 170 cm y trabajan a 220 V.



**Figura 38. Bandeja de producto simulado en CAD**



**Figura 39. Bandeja de Producto.**

## **6. ANALISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se analizaron las muestras liofilizadas y los datos recopilados durante cada ensayo, con el fin de comparar y determinar el comportamiento de de las siguientes variables:

- Peso y Propiedades organolépticas
- Duración de las etapas del proceso
- Consumo energético durante las etapas
- Factibilidad del proceso

### **6.1. Peso y Propiedades organolépticas**

Durante la etapa de pruebas se realizaron seis ensayos en busca de lograr el correcto funcionamiento del equipo liofilizador, las muestras a liofilizar fueron:

- Fresa
- Banano
- Papaya
- Pitaya
- Melón
- Kiwi
- Leche materna
- Aloe vera

De cada prueba se selecciono una muestra y se hicieron mediciones de peso, para determinar el comportamiento de esta variable al concluir el ensayo y se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 40. Muestras liofilizadas en la balanza**

FRUTA	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr)	% HUMEDAD RETIRADA	% HUMEDAD TEORICA	% HUMEDAD RESIDUAL
PAPAYA	101,08	12,18	87,9501385	94,6	7,029451898
MELON	109,63	7,17	93,45981939	95,9	2,544505326
GUINEO	92,99	21,58	76,79320357	75,8	1,310294948
PITAHAYA	104,05	15,32	85,27630947	85,5	0,261626355
FRESA	103,65	13,15	87,31307284	89,9	2,877560799

**Tabla 22 . Tabla de resultados de la fruta liofilizada**



**Figura 41. Muestras liofilizadas de diversas frutas**

En la tabla anterior apreciamos el gran cambio en el peso, atribuido al desprendimiento de humedad de la muestra ya que las muestras presentan elevada cantidad de agua en su composición, al observar los porcentajes de humedad residual concluimos que el procesos de liofilización permite retirar casi la totalidad de agua del producto con un gran valor agregado que es la conservación organoléptica de las frutas.

## **6.2. Duración de las etapas del proceso**

Como se menciona en los primeros capítulos el proceso de liofilización se divide en tres etapas que son

- Congelación
- Desección primaria

- Desección secundaria

### **6.2.1 Congelación**

En esta etapa se hace llegar la temperatura del producto a  $-30^{\circ}\text{C}$  en un tiempo estimado de 8 a 12 horas dependiendo de las características del producto.

### **6.2.2. Desección primaria**

Una vez lograda la temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$ , procedemos a encender la bomba de vacío y lograr la presión de 680 mm Hg en aproximadamente 30 minutos, para continuar con el encendido de las resistencias eléctricas y dar inicio al proceso de sublimación este se realiza hasta que la temperatura del producto alcanza los  $0^{\circ}\text{C}$ , cabe destacar que durante esta etapa los tres equipos trabajan.

### **6.2.3. Desección secundaria**

Esta es la etapa final del proceso y ocurre una vez el producto sobrepasa los  $0^{\circ}\text{C}$  hasta llegar a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , entre el tiempo de congelación y el tiempo de desecación secundaria transcurre un tiempo de 10 horas en el que no se debe sobrepasar la temperatura de la bandeja de  $50^{\circ}\text{C}$  esto con el fin de no quemar la superficie del producto.

## **6.3. Consumo energético**

Durante el proceso de liofilización como es sabido ocurren varias etapas, estas etapas requieren de equipos distintos por ende durante la etapa de pruebas se realizaron distintas mediciones de corrientes en los equipos involucrados, con el fin de diferenciar y detallar los consumos energéticos de los siguientes equipos:

### **6.3.1. Etapa de congelación**

<b>TIEMPO (h)</b>	<b>SISTEMA DE REFRIGERACION (amp)</b>	<b>VENTILADOR (amp)</b>	<b>ENERGIA CONSUMIDA [KW]</b>	<b>COSTO (KW/h)</b>	<b>CONSUMO</b>
1	3,47	0,63	0,862648552	348,36	300,51225
2	3,29	0,63	0,821495025	348,36	286,176007
3	3,13	0,61	0,782714112	348,36	272,666288
4	3,1	0,66	0,78135519	348,36	272,192894
5	3	0,7	0,76289212	348,36	265,761099
6	2,8	0,6	0,706165978	348,36	245,99998
7	2,75	0,7	0,705734443	348,36	245,849651
8	2,7	0,6	0,683302908	348,36	238,035401
TOTAL			6,106308328		2127,19357

**Tabla 23. Datos de consumo de energía en la etapa de refrigeración.**

### **6.3.2. Deseccación primaria**

Durante esta etapa trabaja el sistema de refrigeración el sistema de vacío y las resistencias eléctricas.

<b>TIEMPO (h)</b>	<b>SISTEMA DE REFRIGERACION (amp)</b>	<b>VENTILADOR (amp)</b>	<b>SISTEMA DE VACIO (amp)</b>	<b>SISTEMA DE CALENTAMIENTO [amp]</b>	<b>ENERGIA CONSUMIDA [KW]</b>	<b>COSTO KW/h [\$]</b>	<b>CONSUMO [\$]</b>
1	2,43	0,6	8,3	2,9	2,172572617	348,36	756,837397
2	2,44	0,5	8,17	2,9	2,149558924	348,36	748,820347
3	2,5	0,5	8,1	2,9	2,155576766	348,36	750,916722
4	2,6	0,5	8,5	2,9	2,222439837	348,36	774,209142
5	2,6	0,5	8,21	2,9	2,190539837	348,36	763,096458
6	2,6	0,5	8,3	2,9	2,200439837	348,36	766,545222
TOTAL					13,09112782		4560,42529

**Tabla. 24 Datos de consumo de energía en la etapa de desecación primaria**

### 6.3.3. Deseccación secundaria

Esta es la etapa final de todo el proceso donde se encuentran encendidos todos los sistemas.

TIEMPO [h]	SISTEMA DE REFRIGERACION [amp]	VENTILADOR [amp]	SISTEMA DE VACIO [amp]	SISTEMA DE CALENTAMIENTO [amp]	ENERGIA CONSUMIDA [KW]	COSTO KW/h [\$]	CONSUMO [\$]
1	2,61	0,6	8,31	2,9	2,214826144	348,36	771,556836
2	2,6	0,6	8,29	2,9	2,210339837	348,36	769,993986
3	2,58	0,6	8,3	2,9	2,206867223	348,36	768,784266
4	2,6	0,5	8,3	2,9	2,200439837	348,36	766,545222
TOTAL					8,832473042		3076,88031

**Tabla. 25 Datos de consumo de energía en la etapa de desecación secundaria**

#### 6.3.4 consumos total energético del proceso

<b>ETAPA DEL PROCESO</b>	<b>DURACION DEL PROCESO</b>	<b>ENERGIA CONSUMIDA</b>	<b>COSTOS ENERGETICOS</b>
Congelacion	8 horas	6,106308328	2127,19357
Dsecacion inicial	6 horas	13,09112782	4560,42529
Dsecacion secundaria	4 horas	8,832473042	3076,88031
total	18 horas	28,02990919	9764,49917

**Tabla. 26 Datos de consumo de energía total por etapas**

#### 6.4. Factibilidad económica

Se presenta los análisis de producción de fruta liofilizada en cuanto a valor agregado se refiere, para esto se estima lo siguiente:

- Como el proceso dura 24 horas estimaremos que se trabajan 25 días al mes, en cada proceso se obtiene 1,6 Kg de producto liofilizado, produciendo 40 Kg al mes.
- Costo de la maquina \$ 16.000.000

<b>INSUMO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR [\\$]</b>
Fruta	250 Kg	1000000
Consumo energético	700,75 KW	244112,5
Empleado	1	700000
Retorno al capital	2%	320000
Depreciación	5%	80000
Mantenimiento	1 vez al mes	100000
Arriendo	al mes	600000
<b>Gastos mensuales</b>		<b>3044112,5</b>
<b>Gastos por KG</b>		<b>76102,8125</b>

**Tabla. 27 Datos de factibilidad del proyecto**

Fuente: Autores

De la pagina: <http://www.cocineros.info/mundial/product.php?productid=4755&cat=252&page=1> encontramos el precio de la fresa en rodajas en \$ 39,14 por 0.25Kgs, lo que da un valor de \$ 281808 pesos por Kg de fresa liofilizada.

Comparando con los gastos por 1 Kg obtenemos una ganancia de 270% justificando así la viabilidad del proyecto.

### **6.5. Pruebas de Grado Brix y pH**

Se realizo la prueba de Grado Brix y medición de pH a la fruta liofilizada con el fin de observar los cambios con respecto a la fruta fresca y también cumplir con el último objetivo del proyecto.

### 6.5.1. Grado Brix

Los grados Brix (símbolo °Bx) miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 °Bx tiene 25 g de azúcar (sacarosa) por 100 g de líquido o, dicho de otro modo, hay 25 g de sacarosa y 75 g de agua en los 100 g de la solución.

Los grados Brix se miden con un sacarímetro, que mide la gravedad específica de un líquido, o, más fácilmente, con un refractómetro.

### 6.5.2. Refractómetro

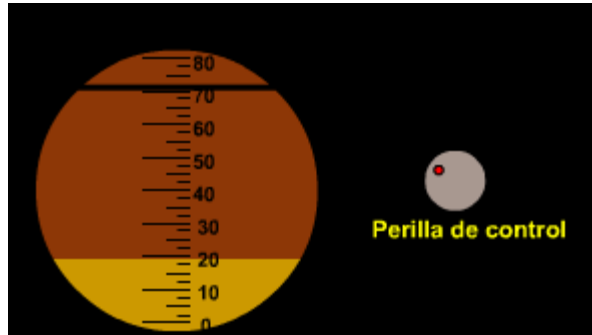
Es un aparato que funciona por medio de un prisma donde se irradia un rayo de luz, mostrando una sombra que se balancea hasta llegar a una escala de medida que nos dice cuanto son los grados Brix.

#### 6.5.2.1. Medida de los grados Brix en un refractómetro.



**Figura 42. Imagen que muestra el refractómetro al inicio de la medición.**

**Fuente:** <http://bit.ly/djE6GW>



**Figura 43. Imagen en el proceso de medida**

Fuente: **Fuente:** <http://bit.ly/djE6GW>



**Figura 44. Punto antes de medida**

Fuente: **Fuente:** <http://bit.ly/djE6GW>



**Figura 45. Lectura del refractómetro**

Fuente: <http://bit.ly/djE6GW>

El proceso de la prueba se realizo en la escuela de Ingeniería química con los siguientes pasos:

- Pesar 2 gr de Pitaya liofilizada y diluirla en agua destilada hasta formar una solución de 10 gr. es decir una solución al 20% en peso.
- Los datos de la dilución fueron:
  - 37°C
  - 120 rpm del agitador
  - 15 minutos
- Filtrar la solución que quedo como gel con el fin de que salga el agua remanente.

El pH se midio introduciendo el pHmetro en la solución y tomando la medida.

Los resultados se comparan con los obtenidos de la página de internet <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/449/44911882010.pdf>:

<b>Pruebas</b>	<b>Pitaya fresca</b>	<b>Pitaya Liofilizada</b>
Grado Brix [%]	18,8	16,3
Ph	7,2	6,27

**Tabla. 28 Datos comparativos de la prueba de grados Brix**

## CONCLUSIONES

Los cambios realizados a los subsistemas del liofilizador piloto permitieron el buen funcionamiento y los resultados esperados, en la deshidratación de productos como la Pitaya, fresa, banano y papaya se obtuvo un producto seco (90% de humedad retirada), con una estructura porosa que facilita la rehidratación y con las características físicas (color y olor) iguales al producto fresco.

A continuación se muestran los cambios realizados para lograr dicho funcionamiento:

- Respecto a la cámara de trabajo se pasó del diseño rectangular al diseño cilíndrico, éste cambio se hizo con el fin de aumentar la resistencia de las paredes obteniendo así la condición de vacío requerida por el proceso.
- El diseño de la puerta permitió mantener la condición de hermeticidad que se requiere en la segunda y tercera etapa del proceso de liofilización, al hacer el vacío la fuerza generada por la presión atmosférica sobre la tapa favorece a la deformación del empaque, alcanzando una presión de vacío de 69 cm Hg en 25 minutos.
- Con el fin de lograr un enfriamiento más uniforme se cambió la ubicación de los evaporadores al interior de la cámara, pasando de los dos evaporadores en la parte posterior, a evaporadores separados ubicados a los lados del módulo portabandejas; además se empleó un ventilador de mayor potencia ubicado en la parte posterior dentro de la cámara de

trabajo para facilitar la transferencia de calor, entre el aire recirculado frío y el producto a liofilizar.

- Para facilitar el manejo del equipo liofilizador por parte del operario se rediseño el tablero de control señalizando cada interruptor y simplificando el circuito eléctrico, haciendo más didáctico el uso del equipo.

Con la recuperación de la capacidad operativa del liofilizador piloto se dotó al laboratorio de refrigeración y aire acondicionado con una herramienta académica que permitirá:

- Desarrollar estudios de deshidratación y conservación en productos agroindustriales como Pitahaya, fresa, banano y otros productos más.
- Capacitar a la comunidad universitaria sobre técnicas innovadoras de deshidratación en frío de productos agroindustriales
- Dejar la base para futuros proyectos de grado pertinentes al proceso de liofilización.

Respecto a la viabilidad del proceso de liofilización cabe destacar que es un proceso costoso que implica una inversión inicial considerable, un alto consumo de energía, además de largos periodos de tiempo durante el proceso; todas estas desventajas se cubren con:

- Características organolépticas se mantiene en su estado original.

- Se conserva más tiempo sin necesitar refrigeración.
- El gran valor agregado, por ejemplo en el mercado el valor de la fresa liofilizada que presenta el enlace <http://www.cocineros.info/mundial/product.php?productid=4755&cat=252&page=1> es de US\$ 39,14 por 0,25 Kg de fresa y el valor comercial en cualquier en las plazas de mercado es de \$ 4.000 pesos 1 Kg.

## RECOMENDACIONES

Con el fin de optimizar el funcionamiento del liofilizador piloto se recomiendan los siguientes cambios en su diseño:

- La instalación de manómetros en las líneas de alta y baja presión, además de cambiar el material de la tapa frontal y trabajar en vidrio lo cual favorece la visión del proceso de esta forma logramos un diseño más académico.
- La instalación de un acumulador de líquido en la succión con el fin de evitar la entrada de líquido al compresor.
- La instalación de una electroválvula entre la cámara de trabajo y la bomba de vacío con el fin de evitar el trabajo continuo de la bomba de vacío.
- La instalación de una termocupla por bandeja para controlar la temperatura del producto en cada bandeja.
- Cambiar el cierre apernado por una manija de pre cierre con el fin de facilitar el cierre.

Trabajar en colaboración con el grupo de investigación CICTA en soluciones para elaborar batidos con frutas liofilizadas.

Enlazar vínculos de investigación con la facultad de salud para investigar la viabilidad de futuros proyecto en la liofilización de plasma sanguíneo y leche materna.

## BIBLIOGRAFIA

- ✘ **FELLOWS, Peter.** Tecnología del procesado de los alimentos, Principios y Prácticas. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza España. 1994.
- ✘ **BARBOSA, Gustavo V.** Deshidratación de alimentos. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza España. 2000.
- ✘ **POTTER, Norman N.** La Ciencia de los Alimentos. The AVI Publishing Company, Inc. Westport Connecticut. Second Printing. 1970.
- ✘ **PITA, Edgard G.** Principios y sistemas de refrigeración, Editorial LIMUSA S.A. Balderas, México, D.F. 1998
- ✘ **DOSSAT J, Roy.** Principios de Refrigeración, Compañía editorial Continental, S.A. México, 1998
- ✘ **CENGEL, Yunus A.** Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, segunda edición.
- ✘ **HAWTHORN, Jhon.** Recent Advances in Food Science, Vol II. Ed. Butter Worths. Londres. 1981.
- ✘ **DESROSIER, W Norman.** Elementos de Tecnología de Alimentos. Editorial Continental S.A. CV, México. 1983
- ✘ **DANFOSS.** Manual Automatización de instalaciones de refrigeración comerciales. 2004

## NOMENCLATURA

$T_{amb}$	Temperatura ambiente, °C
$T_{cond}$	Temperatura de condensación, °C
$T_{evap}$	Temperatura de evaporación, °C
$T_{cam}$	Temperatura de la cámara de trabajo, °C
$T_c$	Temperatura de congelación promedio, °C
$C_{p_h}$	Calor específico promedio por encima del punto de congelación, Btu/lb°F
$C_{p_l}$	Calor específico promedio por debajo del punto de congelación, Btu/lb°F
$f_r$	Factor de rapidez de enfriamiento promedio
$h_{fi}$	Calor latente de congelación promedio, Btu/lb
$Q_p$	Carga por paredes cámara de refrigeración, W
$A$	Área, ft <sup>2</sup>
$U$	Factor de transmisión de calor, Btu/ft <sup>2</sup> °F
$D$	Diferencia de temperatura entre los dos lados de la pared, °F
$M$	Masa, Kg
$\Delta T$	Diferencia entre temperatura de entrada y de congelación del producto, °F
$Q_{enf}$	Calor sensible por encima del punto de congelación, Btu
$Q_{sol}$	Calor latente de congelación, Btu
$Q_{alm}$	Calor sensible por debajo del punto de congelación, Btu
$Q_{resp}$	Calor de respiración del producto, Btu
$Q_{vent}$	Calor cedido por el ventilador del evaporador, Btu
$DT$	Diferencia de temperaturas, °F
$CAP$	Capacidad requerida para el evaporador, Btu
$t$	Tiempo, seg
$W$	Trabajo de compresión, KJ/Kg
$h_d$	Entalpía de vapor sobrecalentado a la salida del compresor, KJ/Kg

$h_c$	Entalpía de vapor saturado a la temperatura de evaporación del refrigerante, KJ/Kg
$Q_{sis}$	Carga del sistema, KJ/min
$ER$	Efecto refrigerante del sistema, KJ/Kg
$L_{cap}$	longitud del tubo capilar
$Cp_{cobre}$	Calor específico del cobre, J/Kg * K
$\rho_{cobre}$	Densidad del cobre puro, Kg/m <sup>3</sup>
$K_{pol}$	Conductividad térmica del poliuretano, Btu/ft°F
$K_{acer}$	Conductividad térmica del acero, Btu/ft°F
$x$	Espesor del material, ft
$NO$	Normalmente abierto
$NC$	Normalmente cerrado

## UNIDADES

$m$	Metro
$s$	Segundo
$kg$	Kilogramo
$^{\circ}C$	Grado Celsius
$^{\circ}F$	Grado Fahrenheit.
$W$	Watt
$TR$	Tonelada de refrigeración (12000 BTU/h, 3750 W)
$N$	Newton (kg m/s <sup>2</sup> )
$Pa$	Pascal (N/m <sup>2</sup> )

## GLOSARIO

**ARENQUE:** Especie de pez que vive en aguas templadas, en las noches desciende a la superficie para alimentarse de plancton, en Europa su pesca se lleva a cabo desde épocas prehistóricas y, en las últimas décadas, las capturas han sido tan incontroladas que su número mermó considerablemente.

**ACUMULADOR:** Tanque de almacenamiento, el cual recibe refrigerante líquido del evaporador, evitando que fluya hacia la línea de succión antes de evaporarse.

**ALETA:** Superficie metálica unida a un tubo para proporcionar mayor superficie de contacto, a fin de mejorar el enfriamiento. Se usan extensivamente en condensadores enfriados por aire y evaporadores.

**CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS:** Son las características que presenta el producto como color, sabor, olor, textura y turgencia.

**COMIDA HIPERCALORICA:** Comida que contiene bastantes calorías

**COMIDA IMPUTRESCIBLE:** Comida que no se pudre fácilmente

**CALOR:** Forma de energía que actúa sobre las sustancias para elevar su temperatura; energía asociada con el movimiento al azar de las moléculas.

**CALOR ESPECÍFICO:** Relación de la cantidad de calor requerido, para aumentar o disminuir la temperatura de una sustancia en 1°C, comparado con la que se requiere para aumentar o disminuir la temperatura de una masa igual de agua en 1°C.

**CALOR LATENTE:** Es la cantidad de energía necesaria para lograr un cambio de fase en un cuerpo.

**CÁMARA DE TRABAJO:** Espacio en el que se lleva a cabo el proceso de liofilización, trabaja a temperaturas y presiones muy bajas para poder realizar el proceso.

**CAPACIDAD:** Sistema de clasificación en refrigeración. Medido generalmente en kcal/h o en watts/h, (o en btu/h).

**CARGA TÉRMICA:** Cantidad de calor medida en watts, kcal o btu, la cual es removida durante un período de tiempo.

**COMPRESOR:** Máquina en sistemas de refrigeración, hecha para succionar vapor del lado de baja presión en el ciclo de refrigeración, y comprimirlo y descargarlo hacia el lado de alta presión del ciclo.

**CONDENSACIÓN:** Proceso de cambiar de estado un vapor o un gas a líquido, al enfriarse por abajo de su temperatura de saturación o punto de rocío.

**CONDENSADOR:** Componente del mecanismo de refrigeración, el cual recibe del compresor vapor caliente a alta presión, enfriándolo y regresándolo luego a su estado líquido. El enfriamiento puede ser con aire o con agua.

**CONDUCCIÓN:** Flujo de calor entre sustancias, por medio de vibración de las moléculas.

**CONGELACIÓN:** Cambio de estado de líquido a sólido.

**CONTROL DE DESCONGELAMIENTO:** Dispositivo para operar un sistema de refrigeración, de tal manera, que proporcione una forma de derretir el hielo y la escarcha formados en el evaporador. Hay tres tipos: manual, automático y semiautomático.

**CONTROL DE TEMPERATURA:** Dispositivo termostático operado por temperatura, que abre o cierra un circuito automáticamente.

**DESCONGELAMIENTO:** Proceso de remover la acumulación de hielo o escarcha de los evaporadores.

**DESECADO:** Proceso mediante el cual se retira el porcentaje de agua contenido en un cuerpo.

**DESERCIÓN:** Acción de desertar, abandonar o desalojar, para este caso es el desalojo casi total de las ultimas trazas de vapor de agua contenidas en el producto a liofilizar.

**DIFERENCIAL:** La diferencia de temperatura o presión, entre las temperaturas o presiones de arranque y paro, de un control.

**ENTALPÍA:** La cantidad de calor en un kilogramo de sustancia, calculada de una base de temperatura aceptada. La temperatura de 0 °C, es una base aceptada para los cálculos del vapor de agua. Para cálculos de refrigeración, la base aceptada es de -40°C.

**EVAPORACIÓN:** Término aplicado al cambio de estado de líquido a vapor. En este proceso se absorbe calor.

**EVAPORADOR:** Componente del mecanismo de un sistema de refrigeración, en el cual, el refrigerante se evapora y absorbe calor.

**GOLPE DE LÍQUIDO:** Condición que se presenta cuando en un sistema de expansión directa, el exceso de refrigerante líquido sale del evaporador y entra al compresor, dañándolo.

**HUMEDAD:** Vapor de agua presente en el aire atmosférico.

**LÍNEA DE ALTA:** Partes de un sistema de refrigeración, que se encuentran bajo la presión de condensación o alta presión.

**LÍNEA DE BAJA:** Partes de un sistema de refrigeración, que se encuentran por abajo de la presión de evaporación o baja presión.

**LÍNEA DE DESCARGA:** En un sistema de refrigeración, es la tubería que acarrea el gas refrigerante, desde el compresor hasta el condensador.

**LÍNEA DE LÍQUIDO:** Tubería que acarrea refrigerante líquido, desde el condensador o receptor, hasta el mecanismo de control de refrigerante.

**LÍNEA DE SUCCIÓN:** Tubería que acarrea refrigerante gaseoso, desde el evaporador hasta el compresor.

**LIOFILIZACIÓN:** Método de deshidratación en frío y al vacío, que sirve para conservar sin daño diversos materiales biológicos, conservando sus propiedades al rehidratarse.

**POLIURETANO:** Cualquier polímero de hule sintético, producido por la polimerización de un grupo HO y NCO, a partir de dos diferentes compuestos. En refrigeración, se utiliza como aislante y en productos moldeados.

**PRESIÓN DE ALTA:** Término empleado para referirse a la presión, a la cual se lleva a cabo la condensación, en un sistema de refrigeración.

**PRESIÓN DE BAJA:** Presión del lado de baja del ciclo de refrigeración, a la cual se lleva a cabo la evaporación.

**PRESIÓN DE CONDENSACIÓN:** Presión dentro de un condensador, a la cual el vapor de refrigerante, cede su calor latente de evaporación y se vuelve líquido. Esta varía con la temperatura.

**PRESIÓN DE SUCCIÓN:** En un sistema de refrigeración, se llama así a la presión a la entrada del compresor

**PRESION DE VACÍO:** Es la presión medida por debajo de la presión manométrica, cuando se extrae el aire o gas contenido en un recipiente cerrado.

**REFRIGERANTE:** Sustancia utilizada en los mecanismos de refrigeración. Este absorbe calor en el evaporador, cambiando de estado de líquido a vapor, liberando su calor en un condensador, al regresar de nuevo del estado gaseoso al estado líquido.

**RESISTENCIAS ELÉCTRICAS:** Elemento que se intercala en un circuito para dificultar el paso de la corriente o para hacer que esta se transforme en calor.

**SENSOR:** Material o dispositivo que sufre cambio en sus características físicas o electrónicas, al cambiar las condiciones circundantes.

**SUBLIMACIÓN:** Proceso de cambio de fase mediante el cual un cuerpo pasa del estado gaseoso al estado sólido sin pasar por líquido.

**TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN:** Temperatura dentro de un condensador, en el que el vapor de refrigerante, cede su calor latente de evaporación y vuelve líquido. Esta varía con la presión.

**TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN:** Temperatura a la cual un líquido cambia a gas

**TERMOCUPLA:** Es un transductor de temperaturas, es decir un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica. Esta constituida por dos alambres metálicos diferentes que unidos desarrollan una diferencia de potencial eléctrica entre sus extremos libres que es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre estas puntas y la unión.

**TERMOSTATO:** Dispositivo que detecta las condiciones de la temperatura ambiente, y a su vez, acciona para controlar un circuito.

**TUBO CAPILAR:** Tubo de diámetro interior pequeño, que se utiliza para controlar el flujo de refrigerante hacia el evaporador. Se utiliza, generalmente, en sistemas de refrigeración pequeños, tales como refrigeradores domésticos, unidades de aire acondicionado de ventana, etc.

**TURGENCIA:** Es la característica que representa la forma de ovalo que tienen algunos alimentos.

**VÁLVULA SOLENOIDE:** Válvula diseñada para funcionar por acción magnética, a través de una bobina energizada eléctricamente. Esta bobina acciona un núcleo móvil, el cual abre o cierra la válvula.

**VALOR NUTRITIVO:** Se considera como la principal característica de los alimentos en el proceso de descomposición en la digestión de estos.

## **ANEXOS**

## **Anexo 1. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO**

## MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

Los pasos para lograr un proceso de liofilización exitoso son:

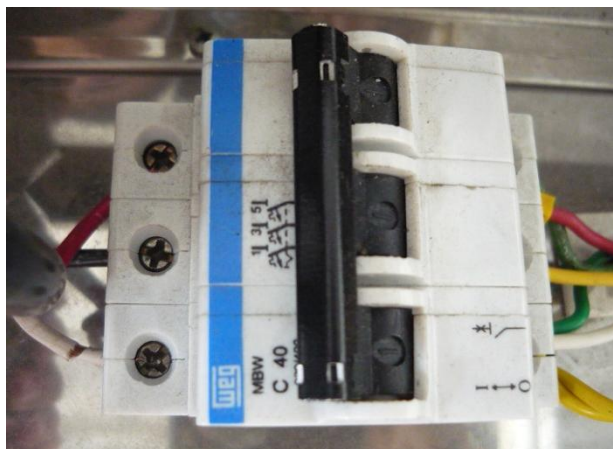
1. Acomodar el producto en las bandejas, cualquiera que sea el producto debe ser colocado en la bandeja en una capa delgada y pareja para asegurar un secado uniforme de alta calidad y evitar charcos de humedad residual, especialmente con productos grandes que en muchos casos se recomienda procesarlos, es decir, partarlos en pedazos más pequeños.



2. Introducir el modulo con las bandejas en la cámara y conectar las resistencias eléctricas de las tres bandejas y las termocuplas al producto y a la bandeja.



3. El liofilizador piloto construido en este proyecto, trabaja con una tensión de 220V, después de conectado a la fuente de energía proceda a accionar el breaker trifasico ubicado en la parte posterior del tablero de control del equipo.



- 3.1. Al accionar el switch se energizan las líneas y se enciende el piloto de señalización azul y los sensores de temperatura del producto y de la bandeja guía.

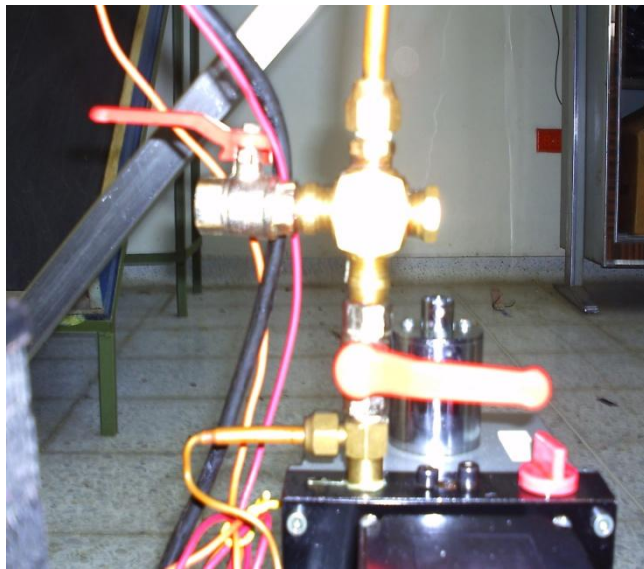


4. Una vez encendido el piloto azul revisar que las llaves de la parte inferior de la cámara estén totalmente cerradas para evitar contacto alguno con el exterior. Proceda a accionar el sistema de refrigeración con la perilla respectiva activándose así los rele 1 y 2.



Al accionarlo se encenderán el pilotos verde que señala el funcionamiento del sistema de refrigeración y el piloto amarillo que muestra que el ventilador ubicado en el interior de la cámara esta encendido. También se ve la temperatura de condensación del gas refrigerante en el display del EKC201.

5. Luego que la temperatura de la fruta este en  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , abra la válvula que se encuentra en posición vertical entre la cámara de trabajo y la bomba de vacío y asegúrese que la otra válvula este cerrada, así puede proceder a encender el sistema de vacío en la perilla respectiva, activándose el rele 3.



En un lapso de 30 minutos el vacuómetro marcara la presión de vacío de 65 cm Hg dando paso al sistema de calentamiento.



6. Encienda el sistema de calentamiento o resistencias eléctricas con la perilla respectiva, el piloto verde se encenderá.



Asegurándose que la temperatura de la bandeja no sobrepase los 50 °C; este proceso se demora alrededor de 4 horas, sin embargo si los 50°C se alcanzan en menos tiempo se debe apagar por media hora el sistema de calentamiento.



7. Ya cumpliendo con los pasos anteriores lo que resta seria el proceso de retirar el producto; para esto se debe primero cerrar la válvula que se encuentra en posicion vertical entre la cámara de trabajo y la bomba de vacio ahora si podemos apagar todos los sistemas y bajar el breaker principal para que el producto se pueda sacar.
8. Para poder sacar el producto se recomienda tener listas las bolsas con sello que no permitan la rehidratación del producto con la humedad del ambiente. Se abre la válvula que se encuentra en la posición horizontal entra la

cámara y la bomba de vacío hasta que la presión en el vacuómetro llegue a cero.

9. Se saca el tornillo con el timón y se procede a abrir la puerta, desconecte las resistencias de los cables verdes y retire el modulo portabandejas lo mas cuidadoso posible evitando así entre en contacto con las resistencias y con las bandejas.



10. El descongelamiento de los evaporadores es descongelamiento natural entonces después de sacar el modulo con las bandejas dejar la puerta abierta en un lugar donde el agua de descongelamiento pueda caer.
11. Empacar el producto lo más rápido posible.



**Anexo 2. MANUAL DE MANTENIMIENTO GENERAL**

## **INSTRUCTIVO DE MANTENIMIENTO GENERAL**

Con el fin de lograr prolongar la vida operativa de liofilizador piloto es importante desarrollar las actividades pertinentes al cuidado básico del equipo. Teniendo en cuenta la necesidad de un programa 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 el cumplimiento de 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 el amperímetro, voltímetro, manóvacuómetros y vacuómetro, termómetros y otros similares.
- Conocer los procedimientos de prueba de continuidad en contactores.
- Conocer el modo de operación del controlador Danfoss EKC 201

### **Circuito de refrigeración**

- Verificación del sistema y su carga refrigerante.

Instale un manómetro en la tubería de succión del compresor y verifique si registra algún valor de presión, de no ser así, seguramente el sistema se encuentra sin

refrigerante. Si el banco se desenergiza por un largo tiempo las presiones de alta y baja corresponderán presión del R404A a la temperatura ambiente.

- Inspección de fugas de refrigerante en las líneas de alta y baja revisando filtros, evaporadores y accesorios, etc.

Uno de los métodos más prácticos, consiste en aplicar una mezcla clara de agua con jabón, esta mezcla debe aplicarse con una esponja sobre la tubería o terminales, en donde se sospecha pueda existir el escape de gas, determinándose la existencia de ella o no percibiendo actividad en la mezcla (burbujeo).

- Inspección de controles, calibración y regulación si es necesario (EKC 201 , manómetros, sensores)

Cheque las conexiones de los manómetros y verifique que no exista ninguna fuga. Además asegúrese que los sensores de temperatura estén debidamente conectados al controlador EKC 201 y que este último se encuentre alimentado.

### **Unidad de refrigeración.**

- Limpieza exterior del compresor.

Para evitar la contaminación con humedad en el compresor, los tubos deben ser mantenidos tapados. Los tapones de solo deberán ser removidos en el momento de la soldadura de los tubos al sistema (el tiempo máximo permitido es de 15 minutos).

- Inspección de ruidos y vibraciones.

Verifique los pernos de anclaje, y realice el ajuste necesario. Si los amortiguadores de caucho están muy apretados, aflójelos, pues de lo contrario la amortiguación de las vibraciones será perjudicada.

- Verificación de mugre en el panel del condensador.

Realice una inspección visual del panel del condensador, en caso de estar lleno de polvo, haga limpieza con un cepillo suave asegurándose de no torcer las aletas.

### **Evaporador**

- Verificación del 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.

Observe que el ventilador se encuentre en funcionamiento y libre de ruidos extraños durante los periodos de congelamiento.

### **Circuito Eléctrico**

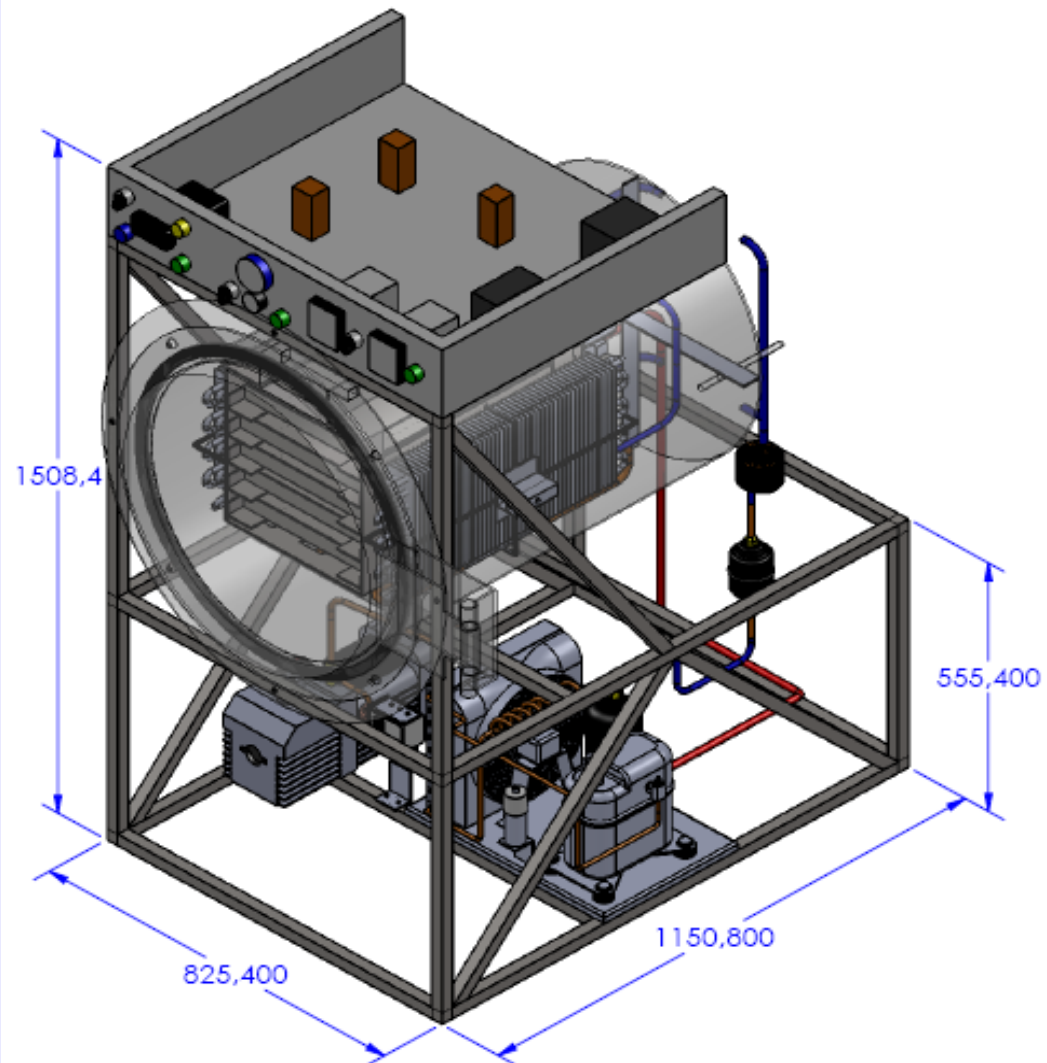
- Revisión de circuito Integral, cables, contactos, relés, controladores, válvula solenoide, resistencias eléctricas, transformador auxiliar y sensores.

Verifique el enchufe y cerciórese de conectarlo en una fuente de alimentación de 220V. Con un multímetro o con el probador de fase, verifique si el cable de potencia del circuito no está interrumpido.

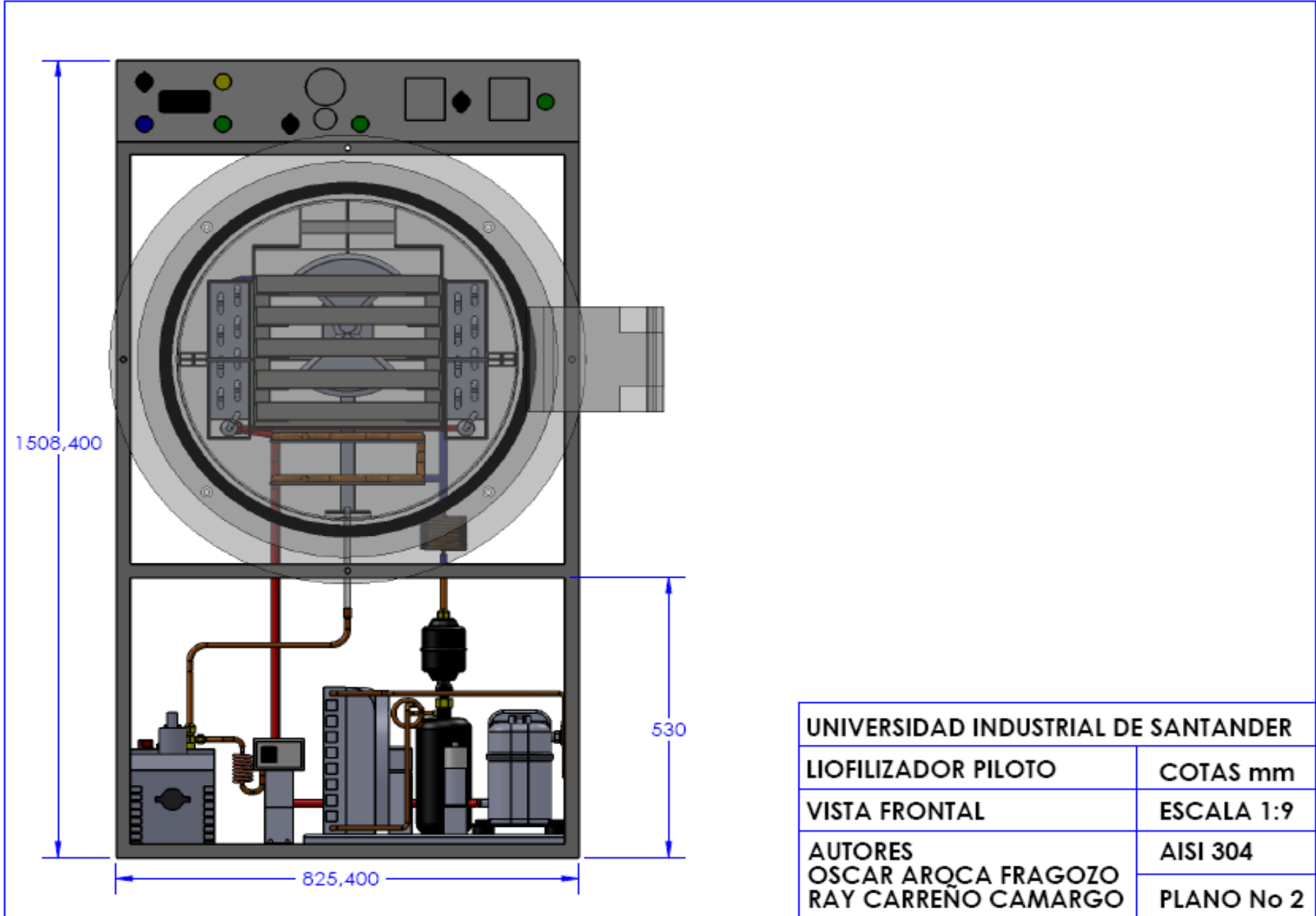
Verifique las conexiones con auxilio del esquema eléctrico del sistema.

Verifique si existe falla en el aislamiento de un componente eléctrico que esté en contacto con partes metálicas. En caso de ser necesario el cambio de cintas aislantes y empalmes desconecte la fuente de alimentación del sistema como primera medida y proceda a realizar el empalme.

**Anexo 3. PLANOS DE LAS VISTAS PRINCIPALES DEL LIOFILIZADOR**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
LIOFILIZADOR PILOTO	COTAS mm
VISTA ISOMETRICA	ESCALA 1:12
AUTORES	AISI 304
OSCAR ARQCA FRAGOZO	PLANO No 1
RAY CARREÑO CAMARGO	



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
LIOFILIZADOR PILOTO	COTAS mm
VISTA FRONTAL	ESCALA 1:9
AUTORES	AISI 304
OSCAR AROCA FRAGOZO	PLANO No 2
RAY CARREÑO CAMARGO	

