



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR  
PARA PRESERVAR LAS CARACTERÍSTICAS NUTRITIVAS  
DE LAS FRUTAS DE LA REGIÓN”**

**AUTORES:**

**BOLÍVAR MESÍAS SUAREZ ESPINOSA**

**ANDRÉS PATRICIO YUPANGUI SEGOVIA**

**DIRECTOR: ING. WASHINGTON FREIRE**

**LATACUNGA**

**2016**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA PRESERVAR LAS CARACTERÍSTICAS NUTRITIVAS DE LAS FRUTAS DE LA REGIÓN”** realizado por los señores **Andrés Patricio Yupangui Segovia y Bolívar Mesías Suarez Espinosa**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Andrés Patricio Yupangui Segovia y Bolívar Mesías Suarez Espinosa** para que lo sustente públicamente.

**Latacunga, 22 de julio del 2016**

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Washington Freire', is written over a horizontal dashed line. The signature is fluid and cursive.

**Ing. Washington Freire**

**DIRECTOR**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Andrés Patricio Yupangui Segovia**, con cédula de identidad N° 050299777-8, y **Bolívar Mesías Suarez Espinosa**, con cedula de identidad N° 050324242-2 declaramos que este trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA PRESERVAR LAS CARACTERÍSTICAS NUTRITIVAS DE LAS FRUTAS DE LA REGIÓN”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Latacunga, 22 de julio del 2016**

Andrés Yupangui Segovia

C.C.: 050299777-8

Bolívar Suarez Espinosa

C.C.: 050324242-2



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Andrés Patricio Yupangui Segovia** y **Bolívar Mesías Suarez Espinosa**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA PRESERVAR LAS CARACTERÍSTICAS NUTRITIVAS DE LAS FRUTAS DE LA REGIÓN”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

**Latacunga, 22 de julio del 2016**

Andrés Patricio Yupangui Segovia  
C.C.:050299777-8

Bolívar Mesías Suarez Espinosa  
C.C.: 050324242-2



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## AGRADECIMIENTO

*Quiero agradecer a Dios por darme salud y vida para continuar por los caminos de la vida, a mis padres por darme el apoyo y la confianza incondicional en todas mis decisiones sabiéndome guiar y confiar para la culminación de mis metas. De igual manera quiero agradecer a cada uno de los ingenieros que impartieron sus conocimientos y me guiaron en toda mi vida estudiantil para culminar con éxito mi carrera.*

*Andrés Yupanqui*

*Mi agradecimiento a Dios, por darme el regalo más grande que puede tener un hijo unos padres que a pesar de mis errores no hay decaído en la lucha de formar un hombre bien, a mis hermanos por ser un apoyo en mis decisiones e incentivar me a ser mejor cada día.*

*Belívar Suarez.*



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## DEDICATORIA

*El presente proyecto dedico a toda mi familia, especialmente a mis padres Mesías y Martha, gracias a ellos y a su apoyo incondicional he podido llegar a ser quien soy, a mis hermanos Gabby y Ihenatan los que me empujan y animan a ser mejor para que vean en mí un buen ejemplo, a mis Tíos y Tías tanto de sangre como los nuevos que han sido un apoyo en todo momento, quienes con consejos, palabras de aliento y alones de orejas han aportado para seguir en la lucha y poder cumplir este escalón más de mi vida, a todos mis primos y primas de igual manera por ser una inspiración para mí. Dejo al final la dedicatoria a mi abuelito Segundo Espinosa que ha sido el pilar fundamental en todos estos años de vida, quien a pesar de no estar ya con nosotros a dejado la enseñanza más grande y que ha sido motivo de orgullo para Él, tener un título profesional fue lo que el siempre anhelo para toda su descendencia.*

*Bolívar Suarez*



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

### DEDICATORIA

*Este proyecto les dedico a mis Padres quienes fueron los pioneros y pilares fundamentales para poder alcanzar este importante momento en mi formación profesional, dándome un ejemplo de valores, perseverancia, trabajo honesto y humildad. A toda mi familia quienes estuvieron presentes de una u otra manera dándome su apoyo para la culminación de este proyecto.*

*Andrés Yupanguí*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>PORTADA</b> .....	<b>i</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xix</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxi</b>

## CAPÍTULO I

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo General .....	3

1.4.2 Objetivos Específicos. ....	3
-----------------------------------	---

## CAPÍTULO II

<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS. ....</b>	<b>4</b>
2.1. Sistemas de enfriamiento. ....	4
2.2. Enfriamiento por aire. ....	6
2.2.1. Enfriamiento en cámara frigorífica. ....	8
2.2.2. Enfriamiento por presión de aire. ....	8
2.2.3. Túneles de enfriamiento. ....	9
2.2.4. Enfriamiento del aire ....	9
2.3. Enfriamiento por agua. ....	10
2.3.1. Enfriador de agua. ....	10
2.4. Enfriamiento por vacío. ....	10
2.4.1. Equipos para el enfriamiento por vacío. ....	11
2.5. Conservación en refrigeración. ....	12
2.5.1. Temperatura. ....	13
2.5.2. Humedad relativa. ....	13
2.6. Sistemas de deshidratación. ....	13
2.6.1. Secado al sol. ....	14
2.7. Secado por gases calientes. ....	16
2.7.1. Secadores de horno. ....	17

2.7.2.	Secadores de bandejas o de armarios.....	17
2.7.3.	Secadores por atomización. ....	18
2.8.	Dispositivos de control o válvulas de expansión. ....	19
2.8.1.	Válvula de expansión manual. ....	19
2.8.2.	Válvula de flotador del lado de baja. ....	20
2.8.3.	Válvula flotadora del lado de alta. ....	21
2.8.4.	Tubo capilar .....	21
2.8.5.	Válvula de expansión automática .....	22
2.8.6.	Válvula de expansión termostática o térmica. ....	22
2.9.	Evaporadores. ....	23
2.10.	Condensadores. ....	24
2.11.	Liofilización.....	24
2.11.1.	Principio de funcionamiento.....	25
2.11.2.	Características de un producto liofilizado .....	26
2.11.3.	Liofilización en la gastronomía .....	27
2.11.4.	Deshidratación por calor.....	27
2.12.	Controlador lógico programable (PLC).....	28
2.13.	Interfaz humano máquina -HMI .....	29
2.13.1.	Características de un HMI .....	30
2.14.	Elementos de presión:.....	30
2.14.1.	Transmisores de presión: .....	31

a.	Sistemas capacitivos.....	32
b.	Tecnología Resonante.....	32
c.	Sistemas Piezoeléctricos.....	32
d.	Reluctancia Variable.....	32
2.15.	Sensores de presión.....	33
2.15.1.	Mecánicos:.....	33
2.15.2.	Electromecánicos:.....	35

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>DISEÑO DEL LIOFILIZADOR PARA FRUTAS.....</b>	<b>37</b>
3.1.	Diseño de los componentes mecánicos.....	37
3.1.1.	Parámetros de diseño.....	38
3.1.2.	Dimensionamiento de la cámara de liofilización.....	39
3.1.3.	Dimensionamiento de las bandejas de secado.....	40
3.1.4.	Dimensionamiento de la cámara de refrigeración.....	42
3.1.5.	Análisis térmico del proceso de liofilización.....	44
3.1.6.	Calculo de las cargas de enfriamiento.....	46
a.	Calculo de la densidad promedio de la frutilla.....	47
b.	Calor específico promedio de la frutilla húmeda.....	52
c.	Calor cedido por la frutilla.....	57
d.	Calor cedido por la cámara de liofilización.....	59

e.	Calor cedido por las bandejas de secado .....	60
f.	Calor cedido por el aire. ....	61
3.1.7.	Ganancia de calor a través de las paredes. ....	64
3.1.8.	Potencia de refrigeración total requerida.....	79
3.1.9.	Potencia de calentamiento requerida. ....	80
a.	Calor específico promedio de la frutilla seca. ....	80
b.	Calor absorbido por la frutilla. ....	82
c.	Calor absorbido por las bandejas de secado.....	84
d.	Calor absorbido por el aire.....	84

## **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>SELECCIÓN DE EQUIPOS.....</b>	<b>86</b>
4.1.	Bomba de vacío. ....	86
4.2.	Compresor – LBP R132a SIKELAN .....	88
4.3.	Cámara de secado. ....	89
4.4.	Condensador tipo radiador. ....	89
4.5.	Evaporador. ....	90
4.6.	Válvula de expansión. ....	90
4.7.	Filtro. ....	91
4.8.	Refrigerante. ....	92
4.9.	PLC SIEMENS LOGO!8. ....	93

4.10. Panel Touch.....	94
4.11. RTD.....	95
4.12. Transductor de presión.....	96
4.13. Conversor de RTD a Voltaje.....	97
4.14. Contactor.....	98

## **CAPÍTULO V**

<b>5. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA .....</b>	<b>99</b>
5.1. Sistema Mecánico.....	99
5.1.1. Construcción de la estructura metálica para el liofilizador.....	99
5.1.1. Sistema de refrigeración.....	102
5.1.2. Sistema de vacío.....	102
5.2. Sistema de control.....	103
5.3. Liofilizador.....	104
5.4. Programación.....	105
<b>6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>120</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>122</b>

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A BOMBA DE VACÍO**

**ANEXO B CÁMARA DE SECADO**

**ANEXO C CONDENSADOR - EVAPORADOR**

**ANEXO D VÁLVULA DE EXPANSIÓN.**

**ANEXO E TRANSDUCTOR DE PRESIÓN**

**ANEXO F PANTALLA TOUCH**

**ANEXO G PLC**

**ANEXO H TABLA DE HIELO SATURADO**

**ANEXO I PROPIEDADES DEL ACRÍLICO**

**ANEXO J PROPIEDADES DE METALES SOLIDOS**

**ANEXO K PROPIEDADES DEL AIRE 1 ATM.**

**ANEXO L NUMERO DE NUSSELT**

**ANEXO M PROPIEDADES TÉRMICAS**

**ANEXO N PROGRAMACIÓN**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Relación entre la velocidad y el coeficiente de película. ....	5
<b>Figura 2.</b> Coeficiente de película en la velocidad de enfriamiento. ....	7
<b>Figura 3.</b> Planta de envases para un enfriamiento por presión de aire. ....	9
<b>Figura 4.</b> Variación de la presión de saturación con la temperatura. ....	11
<b>Figura 5.</b> Instalación de enfriamiento por vacío (Telstar). ....	12
<b>Figura 6.</b> Secadero solar indirecto. ....	15
<b>Figura 7.</b> Secadero solar de túnel (Disposición en serie). ....	16
<b>Figura 8.</b> Secadero solar asistido con almacenamiento de calor por agua. ....	16
<b>Figura 9.</b> Esquema de un secado de bandejas o de armario. ....	17
<b>Figura 10.</b> Secado “surtidor de aire”. ....	18
<b>Figura 11.</b> Válvula de expansión manual. ....	20
<b>Figura 12.</b> Válvula de flotador del lado de baja para amoníaco (A). ....	21
<b>Figura 13.</b> Válvula de expansión automática. ....	22
<b>Figura 14.</b> Válvulas de expansión termoestática. ....	23
<b>Figura 15.</b> Válvula termoeléctrica con un termistor. ....	23
<b>Figura 16.</b> Liofilizador. ....	26
<b>Figura 17.</b> Producto procesado. ....	27
<b>Figura 18.</b> Bastones de piña liofilizada. ....	27
<b>Figura 19.</b> Café liofilizado. ....	28
<b>Figura 20.</b> Controlador lógico programable. ....	29

<b>Figura 21.</b> Pantalla táctil.....	29
<b>Figura 22.</b> Clases de presión.....	33
<b>Figura 23.</b> Tubo Bourdon .....	34
<b>Figura 24.</b> Elemento espiral.....	34
<b>Figura 25.</b> Tipos de sellos.....	35
<b>Figura 26.</b> Esquema general de un equipo convencional de liofilización. ....	37
<b>Figura 27.</b> Dimensiones de la cámara de liofilización. ....	40
<b>Figura 28.</b> Dimensiones de las bandejas de secado.....	41
<b>Figura 29.</b> Dimensiones de la cámara de refrigeración .....	43
<b>Figura 30.</b> Esquema paso a paso del proceso de liofilización .....	45
<b>Figura 31.</b> Distribución de temperaturas en el exterior de la cámara. ....	65
<b>Figura 32.</b> Distribución de temperaturas en el interior de la cámara.....	71
<b>Figura 33.</b> Resistencias térmicas en las paredes de la cámara de refrigeración. 76	
<b>Figura 34.</b> Bomba de vacío Yellow Jacket.....	87
<b>Figura 35.</b> Compresor.....	88
<b>Figura 36.</b> Cámara de secado. ....	89
<b>Figura 37.</b> Condensador tipo radiador 3/4.....	90
<b>Figura 38.</b> Evaporador de 1/5 hp. ....	90
<b>Figura 39.</b> Válvula de expansión.....	91
<b>Figura 40.</b> Filtro.....	92
<b>Figura 41.</b> Refrigerante 134a.....	92

<b>Figura 42.</b> PLC LOGO! 8 MARCA – SIEMENS. ....	93
<b>Figura 43.</b> HMI KTP 400-SIEMENS. ....	95
<b>Figura 44.</b> RTD. ....	96
<b>Figura 45.</b> Transmisor de presión. ....	96
<b>Figura 46.</b> Convertidor de temperatura de sonda de resistencia. ....	97
<b>Figura 47.</b> Contactor eléctrico. ....	98
<b>Figura 48.</b> Construcción de la estructura metálica. ....	100
<b>Figura 49.</b> Montaje de los equipos. ....	100
<b>Figura 50.</b> Caja de acero inoxidable para el sistema de liofilización. ....	101
<b>Figura 51.</b> Montaje de quipos. ....	101
<b>Figura 52.</b> Sistema de refrigeración, parte superior. ....	102
<b>Figura 53.</b> Sistema de refrigeración parte inferior. ....	102
<b>Figura 54.</b> Sistema de vacío. ....	103
<b>Figura 55.</b> Sistema de control. ....	103
<b>Figura 56.</b> Máquina Liofilizadora. ....	104
<b>Figura 57.</b> Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo. ....	106
<b>Figura 58.</b> Frutilla en rodajas. ....	107
<b>Figura 59.</b> Frutilla liofilizada. ....	108
<b>Figura 60.</b> Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo. ....	109
<b>Figura 61.</b> Mashua a trocos. ....	111
<b>Figura 62.</b> Mashua liofilizada. ....	111

<b>Figura 63.</b> Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo .....	112
<b>Figura 64.</b> Higo en trozos. ....	113
<b>Figura 65.</b> Higo liofilizado. ....	114
<b>Figura 66.</b> Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo. ....	116
<b>Figura 67.</b> Polen. ....	118
<b>Figura 68.</b> Polen liofilizado. ....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Especificaciones técnicas bomba de vacío. ....	87
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones técnicas del compresor.....	88
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones técnicas de la cámara de secado.....	89
<b>Tabla 4.</b> Información técnica – R 134a.....	92
<b>Tabla 5.</b> Especificaciones Técnicas del PLC LOGO! 8 Basic. ....	94
<b>Tabla 6.</b> Especificaciones técnicas del KTP 400.....	95
<b>Tabla 7.</b> Especificaciones técnicas del transmisor de presión.....	97
<b>Tabla 8.</b> Especificaciones Técnicas Contactor. ....	98

## RESUMEN

El presente proyecto consta del diseño y construcción de una máquina liofilizadora que permite deshidratar frutas, encontrando una forma adecuada de preservar las características nutricionales de las mismas. El diseño del Liofilizador está adaptado para que realice el proceso de deshidratación de 4 frutas de la región. La máquina está diseñada en base a dos variables que son temperatura y presión. Para el manejo de la temperatura se implementa un sistema de refrigeración, el mismo que tiene como componentes principales un compresor, evaporador, condensador, filtro, válvula de expansión, este sistema está diseñado para alcanzar temperaturas bajo cero. El manejo de la variable presión, esta implementada a un sistema de vacío cuyas partes principales son: bomba de vacío, trampa de vapor sublimado, cámara de secado. La máquina liofilizadora realiza todo el proceso de deshidratación de forma automática, para ello se utilizó un PLC que mediante líneas de programación se realiza el control del proceso. Inicia con el congelamiento de la fruta que al alcanzar una determinada temperatura activa el proceso de vacío para dar lugar al secado primario. El secado primario se basa en el calentamiento (resistencias calefactoras) de la porta-bandejas para empezar la sublimación del agua de la fruta durante un determinado tiempo, se empieza el secado secundario, apagando el circuito de congelación y calentando las bandejas a una temperatura para realizar la desorción del agua de la fruta y un tiempo determinado en la receta. Para finalizar el proceso de liofilización se apaga las bandejas calefactoras y la bomba de vacío y dejando la fruta obtenga la temperatura ambiente para su retiro de la cámara de secado.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **LIOFILIZACIÓN.**
- **PRESIÓN.**
- **TEMPERATURA.**
- **SECADO PRIMARIO.**
- **SECADO SECUNDARIO.**

## ABSTRACT

This project consists of the design and construction of a freeze-drying machine that allows dehydrate fruits, finding an appropriate way to preserve the nutritional characteristics thereof. Lyophilizer design is adapted to perform the dehydration process 4 regional fruit. The machine is designed based on two variables that are temperature and pressure. For handling temperature cooling system is implemented, the same that has as main components a compressor, evaporator, condenser, filter, expansion valve, this system is designed to reach temperatures below freezing. Handling the pressure variable, it is implemented to a vacuum system whose main parts are: vacuum pump, sublimated trap steam drying chamber. The lyophilizer machine performs all the dehydration process automatically for it by a PLC programming lines control process is performed was used. Begins with the freezing of the fruit that upon reaching a certain temperature activates the vacuum process to give the primary drying. The primary drying is based on heating (heating resistors) tray holders to start the sublimation of water from the fruit for a given time, the secondary drying starts turning off the freezing circuit and heating the trays at a temperature for desorption of water from the fruit and a specified time in the recipe. To end the freeze drying process the heating trays and the vacuum pump is turned off and leaving the fruit obtain room temperature for removal of the drying chamber.

### KEYWORDS:

- **LYOPHILIZATION.**
- **PRESSURE.**
- **TEMPERATURE.**
- **DRYING PRIMARY.**
- **SECONDARY**

**DRYING**

## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Las frutas se han constituido en una gran fuente de alimentación, siendo usadas para dietas, postres, jugos, medicina ya sean solas o sometidas a preparación. Sin embargo, esto se limita debido a que las frutas tienden en el tiempo a descomponerse, por lo que se ve la necesidad de crear un Liofilizador que permitirá mantener la fruta seca en el tiempo sin que se descomponga.

#### 1.1 Antecedentes.

El proceso de la liofilización o FreezeDryings se desarrolló comercialmente durante la II Guerra Mundial para preservar el plasma sanguíneo y la penicilina. El proceso industrial tuvo sus inicios en los años 50 del siglo XX, los principios ya eran utilizados por los Incas. El proceso contemplaba en dejar por la noche los alimentos y por el frío de los Andes se congelaban y con los primeros rayos de sol y la baja presión atmosférica que ofrecía las elevadas tierras andinas, se hacía posible la sublimación del agua que se congelo, ha este proceso se le dio el nombre de liofilización natural.

Por el proceso de liofilización se puede extraer más del 95% del agua contenida en un producto pudiendo ser estos alimentos, flores, etc. Esto es un gran beneficio con relación al costo de empaquetado y del transporte, permitiendo cargar mayor cantidad de mercadería omitiendo un proceso de frío en cadena hasta llegar a su destino final de consumo (se obtiene un producto mucho más estable microbiológicamente). Terminando el proceso de liofilización, el producto obtiene una estructura rígida que donde conserva su forma y el volumen, pero con un peso reducido, logrando preservar las características nutritivas y organolépticas de mismo. Realizando el proceso de rehidratación se recuperarán la textura, el aroma y el sabor original.

En el Ecuador este método está siendo utilizado para la exportación de distintas frutas y preservación de las mismas. Se ha realizado estudios y prácticas de

liofilización de frutos como nísperos, naranjilla, remolacha, en distintas universidades y en empresas de nuestro país.

En la Región interandina existen productos a liofilizar como por ejemplo la preservación de rosas y pétalos de rosa es un proceso que permite mantener estos productos por mucho tiempo conservando sus características naturales de color, forma y estructura, sin el uso de colorantes ni preservantes.

### **1.2 Justificación.**

Las necesidades de tener una alternativa de disminuir la pérdida de sustancias volátiles para la conservación de frutas mejoran la estabilidad de éstas, donde se mantienen las cualidades de forma, gusto, sabor, color y valores nutricionales libres de conservantes a un costo mínimo del que ofrece las industrias que manejan la distribución de liofilizadores para un consumo local.

La inestabilidad de los precios de los productos que están fuera de temporada origina un desbalance en la economía y resignación al consumo de productos de temporada alta, más no de los que son de gusto personal.

Existen procesos de liofilización por presión atmosférica que se demora más tiempo en deshidratar y no conservan mucho tiempo la fruta; al diseñar y construir una máquina liofilizadora de vacío se mejora considerablemente la deshidratación y el tiempo de duración de la fruta.

### **1.3 Alcance.**

El proyecto consiste en diseñar y construir una máquina liofilizadora que permita deshidratar frutas al 95%.

En el proyecto se analizarán las variables de presión y temperatura, se evaluará materiales para la construcción que permitan tener un ambiente inerte (libre de bacterias), por ser un proceso con alimentos y un ambiente hermético.

Se diseñará la parte mecánica donde se realizará el análisis de fuerzas para cumplir con factores de seguridad, las mismas que permitirán cumplir con el proceso

soportando temperaturas bajo 0 ° C y hasta 100 ° C, y presiones en vacío a menos de 6 mbar, logrando el punto triple llamado fase de sublimación que es lo más importante para lograr la liofilización. Para esto se controlará la presión y la temperatura con un controlador (PLC) que dará los permisos para el funcionamiento del compresor, el que genera los cambios de temperatura y la bomba que generará la presión de vacío.

La bomba de vacío y el compresor se seleccionarán realizando un análisis y un dimensionamiento que dependerá del volumen máximo de fruta a deshidratar que será como mínimo un litro (1lt).

#### **1.4 Objetivos.**

##### **1.4.1 Objetivo General.**

Diseñar y construir un Liofilizador para preservar las características nutritivas de las frutas de la región.

##### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- Establecer las curvas y condiciones para producir un efecto Liofilizador.
- Dimensionar un sistema automático para control de vacío y de temperatura de un Liofilizador para deshidratar frutas por lo menos 1lt. (un litro).
- Dimensionar y validar el sistema mecánico del Liofilizador en el diseño de ingeniería.
- Construir un Liofilizador con un porcentaje del 95% de secado.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

#### 2.1. Sistemas de enfriamiento.

En el enfriamiento de un producto sólido interviene básicamente dos mecanismos de transferencia de calor:

- En el interior del producto la transferencia de calor se realiza por conducción.
- La transmisión de calor desde la superficie del producto hasta el medio enfriador se efectúa prácticamente por convección.

En el proceso de enfriamiento de un sólido en el seno de un fluido, el calor cedido por el sólido deberá ser igual a la variación de su entalpia. La variación de la entalpia sufrida por el sólido en el proceso se puede expresar como:

$$dQ = M \cdot c_p \cdot dT \quad \text{Ec. 1}$$

$dQ$  = Variación de la entalpia del producto.

$M$  = masa de producto (kg).

$c_p$  = calor específico del producto ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

$dT$  = variación de la temperatura del producto (K).

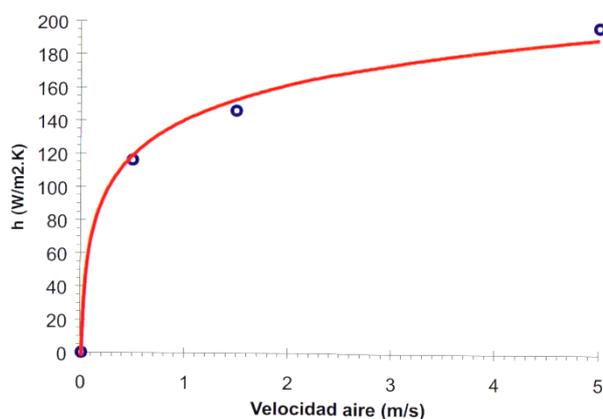
El tiempo de enfriamiento, se ve influenciado en mayor o menor intensidad por diversos factores, que pueden ser:

- Intrínsecos, o propios del producto, sobre los que normalmente no se podrá actuar.
- Extrínsecos, o propios del medio, que dentro de unos márgenes van a permitir la regulación del tiempo de enfriamiento, aplicando la tecnología adecuada.

Entre los factores intrínsecos se pueden destacar la forma de relación entre las dimensiones del producto.

Los factores extrínsecos más importantes son los propios del sistema enfriador, en primer lugar, la naturaleza del agente de enfriamiento elegido, que debe ser tal que su acción sea exclusivamente térmica, sin que sus características químicas puedan modificar los atributos de calidad. (Requena, 2003)

El coeficiente de película depende de las características del agente de enfriamiento, siendo directamente proporcional a su conductividad térmica y a su inercia térmica, e inversamente proporcional a su viscosidad. En segundo lugar, depende de la velocidad del fluido enfriador, incrementando su valor según aumenta aquella con una relación exponencial como se puede apreciar en la figura 1.



**Figura 1 Relación entre la velocidad y el coeficiente de película.**

**Fuente: (Requena, 2003).**

En referencia a la influencia de la temperatura del medio, se ve claramente en la ecuación 1 que cuanto menor sea esta más rápido será el enfriamiento del producto. Sin embargo, su valor viene limitado por la aparición de daños en el alimento, de forma que las temperaturas mínimas del medio enfriador no deben ser inferiores a aquellas a las que se comiencen a producir congelaciones superficiales o daños por fríos en los productos que son sensibles a estas fisiopatías.

Como agente de enfriamiento se podrá utilizar:

- Aire frío
- Agua fría
- Vacío

Cada uno de estos agentes requiere sistemas específicos y son compatibles con unos determinados alimentos, como se expone a continuación.

## 2.2. Enfriamiento por aire.

La utilización de aire como agente de enfriamiento es el sistema más universal, que se empleado, sin que esto quiera decir que en todos los casos sean la mejor solución posible. El enfriamiento se realiza mediante transferencia de calor por convección desde la superficie del producto, a través de la película de aire que le rodea hasta una corriente de aire enfriado por el dispositivo apropiado.

Al mismo tiempo la transferencia de calor desde el interior del producto hasta su superficie se producirá por conducción. La ley que rige el enfriamiento de un cuerpo en estas circunstancias puede expresarse con la ecuación:

$$Q = A \cdot U(T - T_{med}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$Q$  = Calor disipado (W).

$A$  = Area de transferencia ( $m^2$ )

$U$  = Coeficiente global de transmisión de calor ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$T_{med}$  = Temperatura del medio enfriador (en este caso el aire).

$T$  = Temperatura del producto.

El coeficiente global de calor de transmisión de calor depende de la conductividad térmica del producto y de su espesor, a la vez que el coeficiente superficial de transmisión de calor (coeficiente de película) según la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x}{k} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$U$  = Coeficiente global de transmisión de calor ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

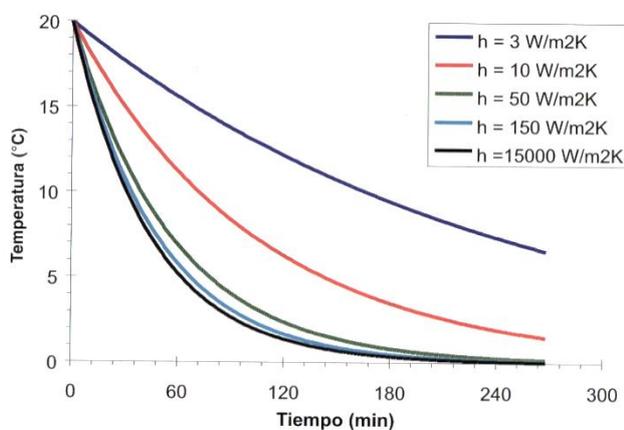
$h$  = Coeficiente de película.

$x$  = Semiespesor del producto.

$k$  = Conductividad térmica del producto ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

La conductividad térmica y el tamaño del producto pueden considerarse constantes para un determinado proceso, se podrá actuar sobre el coeficiente global incrementando el valor del coeficiente de película hasta que su inverso sea de un orden de magnitud inferior al coeficiente entre el semiespesor y la conductividad térmica del producto.

A partir de este valor, el factor limitante que regirá la transferencia de calor será la transmisión por conducción en el interior del alimento.



**Figura 2** Coeficiente de película en la velocidad de enfriamiento.

**Fuente:** (Requena, 2003).

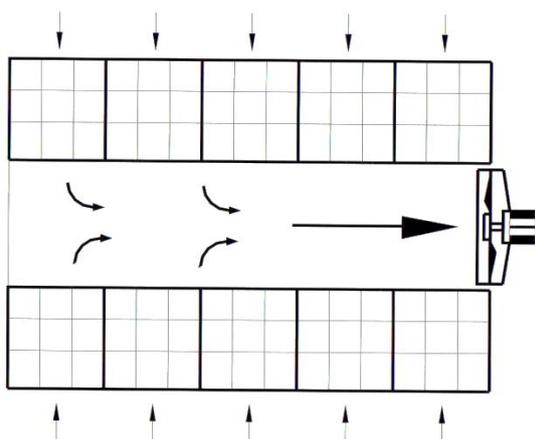
En la figura 2 se muestra cómo influye en el enfriamiento de un producto el incremento del coeficiente de película. Como puede apreciarse, mientras el factor limitante a la transferencia de calor es el pequeño valor del coeficiente de película, se pueden obtener incrementos en la velocidad de enfriamiento aumentando el valor de  $h$ . sin embargo, cuando el valor de  $h$  es suficientemente alto como para que su inverso sea despreciable. El factor limitante de la transferencia de calor pasa a ser la conductividad térmica del producto y su espesor. (Requena, 2003)

### **2.2.1. Enfriamiento en cámara frigorífica.**

Este sistema consiste en emplear para el enfriamiento una cámara frigorífica diseñada únicamente para la conservación de alimentos. La velocidad de circulación de aire que se consigue en estas cámaras es muy pequeña ya que la función de la circulación del aire es únicamente conseguir una homogenización de la atmosfera interna desde el punto de vista de la temperatura y de la concentración de gases. En estas condiciones el coeficiente de película conseguido es muy pequeño que llevará a tiempos de enfriamiento muy largos. (Requena, 2003)

### **2.2.2. Enfriamiento por presión de aire.**

Este sistema de enfriamiento consiste en crear unos gradientes de presión dentro de la cámara que fuercen al aire a pasar por el interior de los envases, poniéndolo en contacto directamente con el producto, en lugar de circular alrededor de los envases como ocurre la mayoría de las veces en las cámaras convencionales. La eficacia de este sistema requiere disponer de envases con ventilación suficiente en la dirección de la corriente de aire, como puede verse en el esquema de la figura 3 (Requena, 2003).



**Figura 3 Planta de envases para un enfriamiento por presión de aire.**

**Fuente: (Requena, 2003).**

De esta forma se pueden adecuar, con pocos gastos, las cámaras frigoríficas tradicionales para el enfriamiento eficiente de los productos, montando en ellas una o varias de estas unidades de enfriamiento a depresión. El coste de estas instalaciones es muy reducido siempre que se aprovechen como fuente de frío los propios evaporadores montados en la misma cámara. (Requena, 2003)

### **2.2.3. Túneles de enfriamiento.**

Son recintos especialmente contruidos para conseguir altas velocidades de aire (comprendidas entre los 5 y 15  $m.s^{-1}$ ), tienen tiempos cortos de enfriamiento. Generalmente se dimensionan para un tiempo total de enfriamiento comprendido entre 1 y 6 horas. Según la forma de realizar la carga de producto los túneles podrán ser continuos o discontinuos. (Requena, 2003)

### **2.2.4. Enfriamiento del aire**

Generalmente el aire frío necesario en los sistemas de enfriamiento que se han expuesto se consigue por medio de evaporadores de expansión directa. A la hora de dimensionar la superficie de evaporación de estos equipos hay que tener en cuenta que el aire a la salida del evaporador deberá tener una humedad suficientemente alta

para que no se produzcan excesivas pérdidas de peso en el proceso de enfriamiento. (Requena, 2003).

### **2.3. Enfriamiento por agua.**

La disipación del calor se efectúa por convección forzada, a través de la película de agua que cubre la superficie del producto. La utilización del agua se debe a su capacidad como agente de enfriamiento. Cuando una corriente de agua fría circula rápida y uniformemente sobre la superficie de un cuerpo caliente, su temperatura superficial llega a ser prácticamente igual a la del agua casi instantáneamente.

La puesta en contacto del agua fría con el producto se puede realizar mediante dos procedimientos que son: por lluvia o por inmersión.

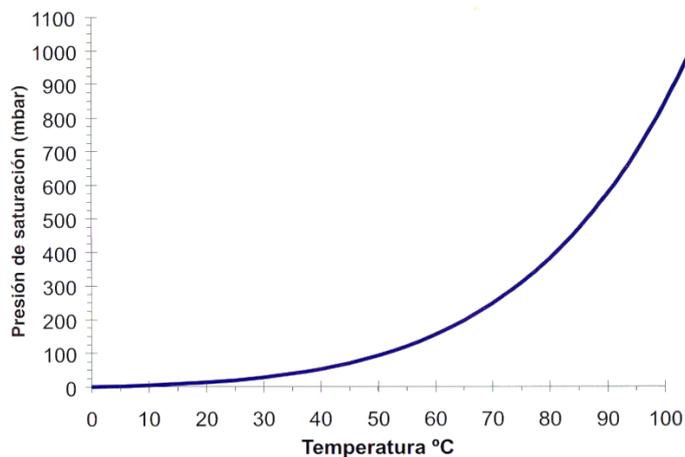
Los sistemas de lluvia se basan en dejar caer sobre el producto un gran caudal de agua desde un plano a mayor altura que la superficie superior del producto. Ambos sistemas tienen la ventaja de conseguir mayores velocidades, y mejor distribución del flujo con menores caudales de agua y menor potencia de bombeo que los sistemas por inmersión, que son con los que se alcanza un menor coeficiente de película. (Requena, 2003).

#### **2.3.1. Enfriador de agua.**

Un enfriador de agua requiere grandes potencias frigoríficas puntuales, se debe utilizar bancos de hielo. Se consigue repartir la producción frigorífica sobre las 24 horas del día, por lo que la dimensión del equipo frigorífico se reduce considerablemente y se aumenta la eficiencia global del sistema. (Requena, 2003).

### **2.4. Enfriamiento por vacío.**

Consiste en colocar la mercancía en un recinto en la que se reduce la presión a un valor suficientemente bajo para que parte de su agua de constitución se evapore, siendo el mismo producto el que suministra el calor de vaporización necesario para el cambio de estado consiguiéndose así la disminución de su temperatura. (Requena, 2003)



**Figura 4 Variación de la presión de saturación con la temperatura.**

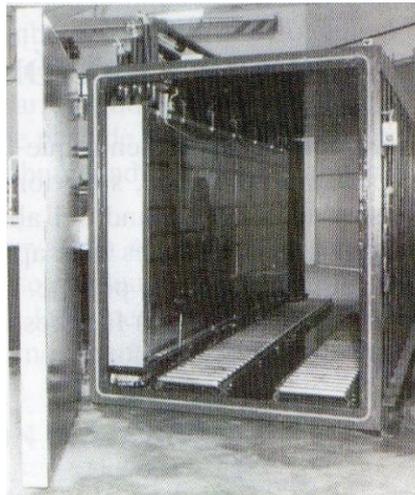
**Fuente: (Requena, 2003).**

Como se muestra en la figura 4. La disipación de calor tiene lugar por transmisión de masa, en régimen variable, desde el producto al medio enfriador. La transferencia se origina como consecuencia de la reducción de presión que se produce en el ambiente que rodea al alimento, hasta alcanzar la tensión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura final que se desea alcanzar. (Requena, 2003).

#### **2.4.1. Equipos para el enfriamiento por vacío.**

Un enfriador por vacío consta básicamente de un recinto estanco conectado a un equipo de producción de vacío. El recinto puede tener forma cilíndrica o paralelepípedica y estará construido en plancha de acero del espesor suficiente para soportar en su interior una depresión próxima a un bar.

Las dimensiones interiores están adaptadas a los tamaños de los pallets normalizados, y hoy en día se fabrican para capacidades de carga que oscilen entre uno y doce pallets, entre 300 y 3500 kg por carga.



**Figura 5 Instalación de enfriamiento por vacío (Telstar).**

**Fuente: (Requena, 2003).**

#### **Ventajas del enfriamiento por vacío.**

- El enfriamiento por vacío es el sistema que implica una mayor inversión.
- Este sistema permite el enfriamiento del producto acondicionado, siempre que el embalaje empleado tenga una permeabilidad al vapor de agua adecuada.
- La homogeneidad del enfriamiento a nivel de la carga es muy buena, ya que la accesibilidad de la presión a toda la mercadería es absoluta.
- El enfriamiento por vacío es un proceso discontinuo que requiere una alta inversión y en consecuencia unas amortizaciones elevadas, su uso queda relegado a productos muy perecederos y de gran valor comercial. (Requena, 2003).

#### **2.5. Conservación en refrigeración.**

Una vez conseguido con el enfriamiento que toda la masa de producto se encuentre a la temperatura apropiada, superior a la de la congelación comienza el proceso de conservación depositando el alimento en un recinto aislado en el que se

mantengan las condiciones más apropiadas para que su vida útil prolongue durante el mayor tiempo posible. (Requena, 2003).

### **2.5.1. Temperatura.**

La temperatura de conservación quedara definida en función de la naturaleza de los productos almacenados y de la duración del almacenamiento, y debe ser tan constante como sea posible y perfectamente uniforme en todo el interior de la cámara frigorífica.

La regulación de la temperatura dentro de la cámara corresponde a un dispositivo de control, el termostato, que se encarga de la apertura y cierre de la válvula solenoide que alimenta al evaporador frigorífico instalado en el interior de la cámara.

Para mantener una temperatura constante es necesario disponer de un aislamiento térmico bien calculado y de una potencia frigorífica suficiente, de forma que las pérdidas de calor sean mínimas y la capacidad de recuperarlas en el menor tiempo posible. (Requena, 2003).

### **2.5.2. Humedad relativa.**

Se recomienda en la conservación frigorífica que la humedad relativa del recinto se mantenga entre el 85 y el 95 %. Sin embargo, cada producto deberá almacenarse a la humedad relativa que más le beneficie, teniendo en cuenta que las humedades relativas altas favorecen el desarrollo de hongos y las humedades relativas bajas incrementan la pérdida de peso de la mercadería.

Durante la conservación se deberá conseguir que la humedad relativa, como la temperatura, se mantenga constante. (Requena, 2003).

## **2.6. Sistemas de deshidratación.**

La deshidratación se conduce según dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático. El proceso adiabático el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar.

En el proceso no adiabático, el calor de evaporación es aportado por el calor radiante o por el calor transferido a través de paredes en contacto con el material a secar.

La selección de un método de secado, depende de una serie de factores entre los cuales se incluye la forma de las materias primas y sus propiedades, la forma física deseada y las características del producto, las condiciones necesarias de operación y los costes de la misma.

A continuación, se exponen las principales características de estos sistemas de deshidratación y los tipos de secados. (Requena, 2003).

### **2.6.1. Secado al sol.**

Los rayos del sol son utilizados como un método para evaporar la humedad de los alimentos este es uno de los métodos de secado más antiguo y largos realizado por todo el mundo que es utilizado hasta el día de hoy por pequeños productores estableciéndose como un método tradicional para el secado.

Al ser limitado las opciones para producir a gran escala, encarece los costos de mano de obra, se debe utilizar grandes superficies, no se tiene control del proceso de secado, contaminación por insectos, putrefacción de los alimentos debido a reacciones bioquímicas y la propagación de microorganismos, como consecuencia por los largos tiempos de secado a los que está expuesto el producto.

La clasificación del secado por sol está dividida en tres grupos principales. (Requena, 2003)

- Solar natural.
- Solar semiartificial.
- Solar asistido.

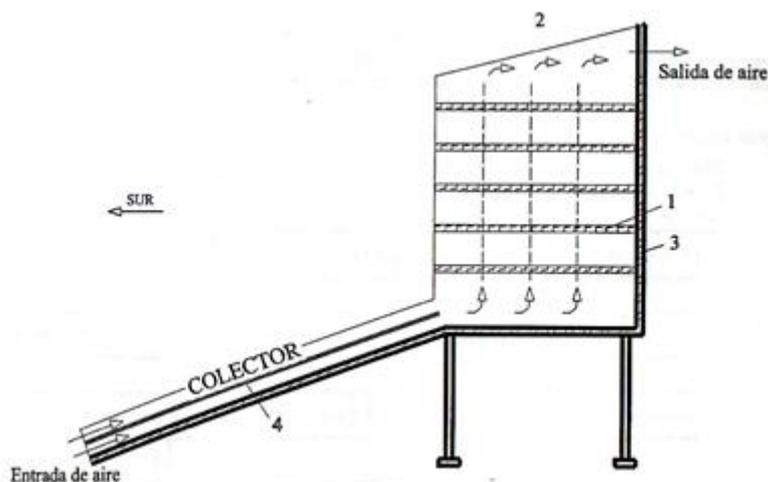
#### **Solar natural.**

- **Solares directos.**

El secado Solar directo como su palabra lo indica es con el contacto directo de los rayos solares con el producto, generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas tales como frutas, forrajes y hortalizas. (Requena, 2003).

- **Solares indirectos.**

Los rayos solares no tienen contacto directo con el producto a ser secado. El procedimiento a seguir es calentar en un colector solar donde es conducido hacia la cámara de secado para posteriormente deshidratar el producto. En la figura 6. Se observa el esquema del secador indirecto.

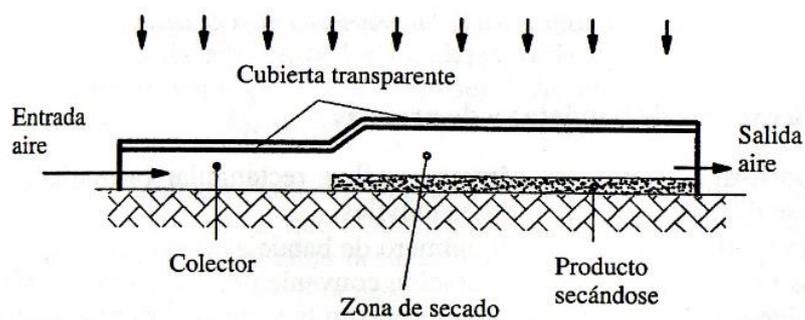


**Figura 6 Secadero solar indirecto.**

**Fuente: (Requena, 2003).**

**Secadero solar semiartificial.**

El caudal másico del aire requerido es proporcionado por un ventilador. En la figura 7. Se distingue el esquema de este tipo de secadero son disposición en serie.



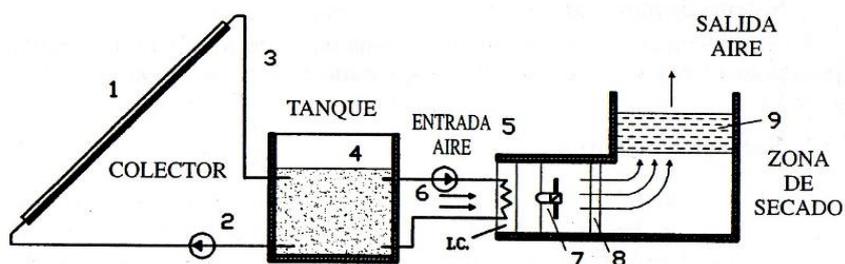
**Figura 7 Secadero solar de túnel (Disposición en serie).**

**Fuente: (Requena, 2003).**

### **Secaderos solares asistidos.**

El proceso de secado planificado y optimizado puede obtener productos de calidad. Se elimina la influencia de las condiciones climatológicas sobre la calidad del producto por la utilización de una fuente independiente.

En la figura 8. Se presenta un esquema de un secadero de este tipo.



**Figura 8 Secadero solar asistido con almacenamiento de calor por agua.**

**Fuente: (Requena, 2003).**

### **2.7. Secado por gases calientes.**

En general son apartados sencillos y de fácil manejo. Son los más utilizados en las industrias agroalimentarias.

En esencia constan de las siguientes partes:

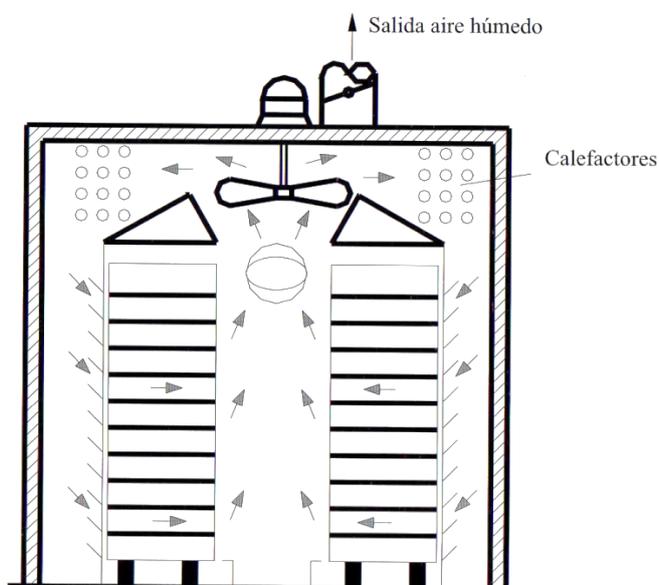
- Recinto, generalmente calorifugado, donde se realiza el secado.
- Sistema de calefacción.
- Sistema de impulsión de aire.

### 2.7.1. Secadores de horno.

Son los más simples. Consta de un pequeño recinto de forma paralelepédica de dos pisos. Su utilización en la industria de alimentos es muy reducida, empleado se para el secado de manzanas, lúpulo y forrajes verdes.

### 2.7.2. Secadores de bandejas o de armarios.

Están formados por una cámara metálica rectangular (armario), en cuyo interior se disponen unos bastidores móviles. El calor del medio de secado (aire caliente) se transmite al producto, no a través del mismo. El aire debe circular sobre la superficie del producto, como se ha dicho, a relativamente alta velocidad para aumentar la eficiencia de la transmisión de calor y de la transferencia de masa. En la figura 9 se representa un esquema de este tipo de secadores.

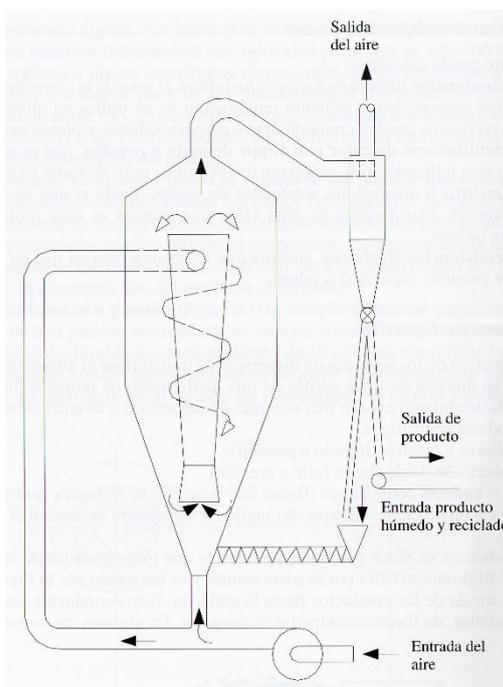


**Figura 9** Esquema de un secado de bandejas o de armario.

**Fuente: (Requena, 2003).**

### 2.7.3. Secadores por atomización.

El secado por atomización cumple la función de secar productos líquidos. Es la metamorfosis de un alimento en estado líquido a una forma seca con el proceso de atomización en un medio caliente. Tiene como su principal función el evaporar rápidamente los disolventes con el método de pulverización del producto en el interior de una corriente de gas caliente.



**Figura 10** Secado “surtidor de aire”.

**Fuente: (Requena, 2003).**

Las partes esenciales de un equipo de secado por atomización son:

- Sistema calefactor de aire.
- Sistema de atomización del producto líquido.
- Cámara de secado.
- Sistema de separación de polvo.

- Sistema de impulsión.

## **2.8. Dispositivos de control o válvulas de expansión.**

En el sector de la refrigeración, normalmente se llama válvula de expansión a la válvula o dispositivo que introduce el refrigerante en el evaporador. La válvula de expansión debe regular el flujo refrigerante de acuerdo con la carga calorífica existente. La válvula de expansión no controla la temperatura.

### **Condiciones de funcionamiento.**

1. La presión cae instantáneamente, pasando de alta presión a baja presión en la aguja de la válvula de expansión.
2. La temperatura cae instantáneamente desde la temperatura de condensación a la temperatura de evaporación en la aguja de la válvula.
3. No hay ningún cambio en el contenido calorífico del refrigerante a medida que pasa atrás de la válvula de expansión. Esto se debe que el calor eliminado para enfriar el líquido pasa al refrigerante en forma de vapor.

Existen varios tipos de válvulas que son:

### **2.8.1. Válvula de expansión manual.**

La válvula de expansión manual o válvula de aguja, en los tipos de mayor tamaño se denomina válvula obturadora, hace posible llevar a cabo un control fino del flujo de líquido.



**Figura 11 Válvula de expansión manual.**

**Fuente: (CHRIS LANGLEY, 2009).**

### **2.8.2. Válvula de flotador del lado de baja.**

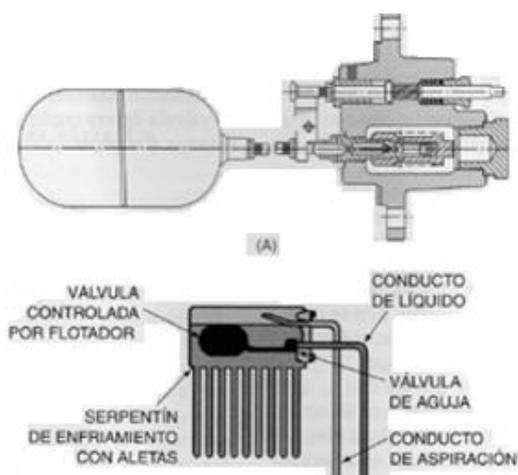
Se conoce como válvula de flotador de lado de baja porque el mecanismo de flotación y la bola del flotador están en el lado de baja presión del sistema. Cuando hay cargas grandes, el flotador desciende para permitir que fluya más refrigerante hacia el evaporador. En condiciones de baja carga o sin carga, el flotador se eleva y restringe el flujo de refrigerante.

#### **Ventajas:**

- Proporciona un excelente control automático y mantiene el nivel de refrigerante apropiado para las condiciones de carga.
- Se puede utilizar cualquier número de evaporadores en el mismo sistema. Cada válvula de flotador solo dejara pasar el refrigerante necesario a su correspondiente evaporador, independientemente de las condiciones.

#### **Desventaja:**

- La válvula de flotador de lado de baja no funciona satisfactoriamente en los serpentines de expansión secos.

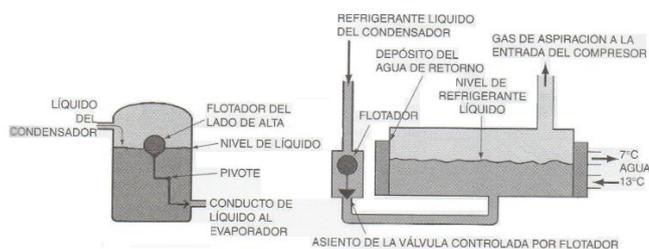


**Figura 12 Válvula de flotador del lado de baja para amoníaco (A).**

**Fuente: (CHRIS LANGLEY, 2009)**

### 2.8.3. Válvula flotadora del lado de alta.

El uso principal de las válvulas de flotador de alta fue en las primeras unidades domesticas que se fabricaron. Se han utilizado en algunas aplicaciones comerciales autos contenidos, tanto con refrigerantes de baja presión como con amoníaco, pero su uso está muy restringido incluso en estas aplicaciones.



**Figura 2.1 Flotadores del lado de alta.**

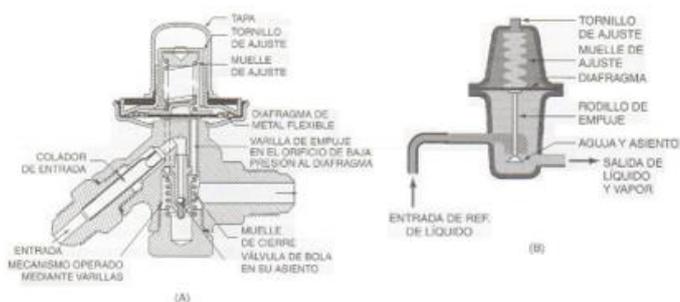
**Fuente: (CHRIS LANGLEY, 2009)**

### 2.8.4. Tubo capilar

El tubo capilar no es otra cosa que un serpentín muy largo, con un diámetro de entre aproximadamente 1mm y 2mm. La presión del lado de alta del sistema se usa para forzar al líquido a pasar a través de ese fino tubo. La longitud del tubo utilizado se ajusta para permitir que en el evaporador entre la cantidad adecuada de líquido.

### 2.8.5. Válvula de expansión automática

La válvula de expansión automática no es otra cosa que una válvula reductora de la presión. El elemento sensible, el diafragma sensible, tiene la presión del evaporador en su parte inferior y la presión atmosférica en la superior. Estas presiones están equilibradas y se ajustan mediante muelles.

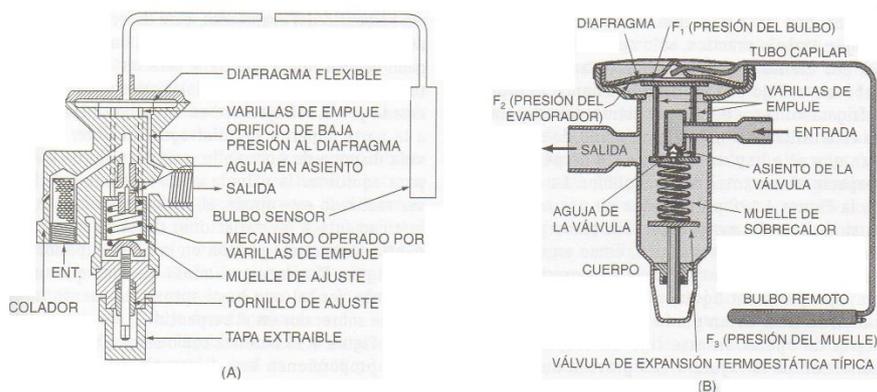


**Figura 13 Válvula de expansión automática.**

**Fuente (CHRIS LANGLEY, 2009)**

### 2.8.6. Válvula de expansión termostática o térmica.

La válvula de expansión termostática o termostática se denomina a veces válvula DX o TX. Se trata de una válvula de expansión automática con un dispositivo adicional para ajustarse a la carga existente en el evaporador.



**Figura 14 Válvulas de expansión termostática.**

**Fuente: (CHRIS LANGLEY, 2009)**

### 2.8.7. Válvula de estado sólido o de expansión termoelectrónica

Las válvulas de expansión de estado sólido, como la de la figura 15 emplean un transformador de tensión de control, un motor térmico y un termistor de acción inverso. El motor térmico es simplemente un dispositivo bimetalico.



**Figura 15 Válvula termoelectrónica con un termistor.**

**Fuente: (CHRIS LANGLEY, 2009)**

## 2.9. Evaporadores.

El evaporador es la parte del sistema en la que el refrigerante líquido se evapora. Se conoce por diversas denominaciones como serpentín de enfriamiento, cuerpo cilíndrico del enfriador, serpentín de congelación, evaporador o lado de baja.

### Requisitos de los evaporadores.

- El evaporador debe proporcionar una superficie de transferencia de calor lo suficientemente grande, que pueda mantenerse a una temperatura más baja que el medio que está siendo enfriado.
- El evaporador debe disponer de una cámara para almacenar el refrigerante líquido que se va a evaporar, y por el compartimiento para el vapor debe estar separado del líquido.
- El evaporador debe proporcionar una circulación de refrigeración sin que se produzca una caída de presión excesiva.

### **Tipos de evaporadores.**

Los evaporadores pueden clasificarse en inundados y secos.

Un **evaporador inundado** dispone de un cierto tipo de tanque o distribuidor que mantiene la superficie interior del evaporador inundado de líquido. Normalmente, con los sistemas inundados se consigue una mayor transferencia de calor por centímetro cuadrado de superficie del evaporado, aunque para mantenerlos inundados se requiere una carga de refrigerante líquido mayor.

Un **evaporador seco** realmente no está seco, sino que contiene menos líquido que un sistema inundado. El interior del evaporador solo contiene entre un cuarto y un tercio de la carga total de líquido.

### **2.10. Condensadores.**

El condensador termodinámico es utilizado en la industria de la refrigeración, el aire acondicionado, en la industria naval, en la producción de energía eléctrica, y en centrales térmicas o nucleares. La condensación se puede producir utilizando aire mediante el uso de un ventilador o con agua. La condensación sirve para condensar el vapor, después de realizar un trabajo termodinámico.

### **2.11. Liofilización**

La liofilización es un método o técnica de deshidratación por frío, un proceso común en la industria alimentaria conocido como deshidro-congelación (secado por congelación) alimentaria el cual tiene la virtud de mantener al máximo las

propiedades organolépticas de los alimentos. Es una operación de secado por sublimación en ausencia de aire. En esta operación, la sustancia que va a secarse se congela, luego el agua se elimina como vapor por sublimación del material congelado en una cámara al vacío. Los vapores sublimados se extraen con bombas de vacío mecánicas o eyectores de chorro de vapor.

### **2.11.1. Principio de funcionamiento.**

Se introduce el producto a ser procesado. Se genera un entorno de vacío donde las bajas temperaturas alcanzan los  $-40^{\circ}$  centígrados, que da lugar a la sublimación (el producto pasa de un estado sólido a un estado gaseoso sin tener que pasar por el estado líquido). Eso básicamente se aplica al contenido de agua que contiene el alimento, el cual se sublima, como resultado final se tiene materia sólida sin ningún remanente líquido.

La deshidratación por liofilización de materiales biológicos, en especial los alimentos, se usa como técnica de preservación. Al provocar un ambiente sin agua en alimentos los microorganismos no pueden crecer ni multiplicarse, las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales no pueden funcionar sin agua.

Si se reduce el contenido de agua debajo del 10% en peso, los microorganismos dejan de ser activos, sin embargo, se necesita bajar el contenido de humedad por debajo del 5% en peso de alimentos para preservar su sabor y valor nutritivo.

Al tratarse de alimentos orgánicos, debe tener precaución en secar sin cocinar el producto, la temperatura debe ser exacta para no afectar el sabor, textura y color.

Cuando la temperatura es muy baja al inicio del proceso, los microorganismos pueden sobrevivir y crecer antes que el producto sea secado completamente. Si la temperatura es alta y la humedad del aire es baja, el producto puede endurecerse sobre su superficie, en conclusión, dificulta el secado porque el agua no puede escapar fácilmente.

La liofilización da lugar a productos alimenticios de alta calidad, preserva la rigidez estructural, esto evita el colapso de la estructura porosa después del secado, si se añade agua al producto para re-hidratarlo debe conservar la mayor parte de la estructura original. (Heinz, 2012)



**Figura 16 Liofilizador.**

**Fuete: (Heinz, 2012)**

**Al generar entornos al vacío**, es posible jugar con las temperaturas de evaporación del agua, porque el agua hierve a los **100°C**, pero si se genera entornos de presión al vacío, se puede hacer hervir **hasta 120°C** (como en el caso de las ollas de presión). Pero en la liofilización, se genera un entorno tan frío que **solo altas presiones de vacío** son capaces de hacer que el agua se evapore a **-40°C**, y esta es la función que hace el Liofilizador. (Heinz, 2012)

### **2.11.2. Características de un producto liofilizado**

El producto como antes mencionado, queda seco, pero es agua lo único que pierde. Su sabor permanece ya que los componentes sápidos característicos del aroma se mantienen, o sea no tenemos alteraciones en el producto. Todos los gustos y aromas se conservan como si de un producto fresco se tratase.



**Figura 17 Producto procesado.**

**Fuete: (Heinz, 2012)**

### **2.11.3. Liofilización en la gastronomía**

El proceso de liofilización al presentar resultados extraordinarios en asepsia y sin pérdida de nutrientes se hizo atractivo para la cocina como se le conoce vulgarmente. Esta no se quiso quedar atrás y comenzó a utilizar este novedoso método para deshidratar creaciones nunca antes pensadas:



**Figura 18 Bastones de piña liofilizada.**

**Fuente: (Heinz, 2012)**

### **2.11.4. Deshidratación por calor.**

Básicamente, al secar un producto por calor, se pierde agua y el sabor queda muy concentrado, pero las altas temperaturas hacen que los gustos naturales y el aroma **cambien radicalmente**. A veces es bueno, pero la liofilización se caracteriza por mantener el sabor original del producto.



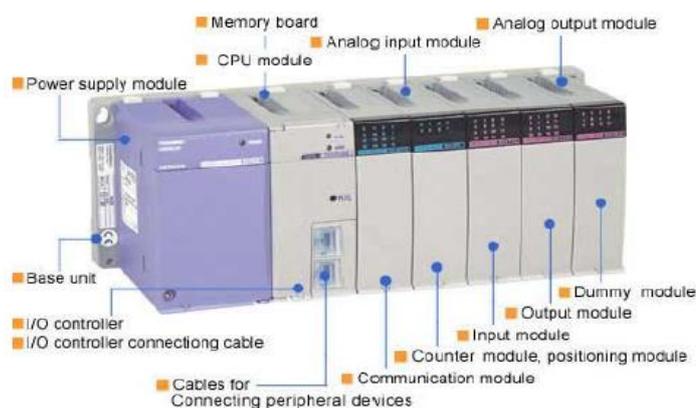
**Figura 19** Café liofilizado.

Existe uno que es el más consumido en el mundo, el café. Aquellos cafés solubles listos para usar en máquinas o directamente a la taza es sencillamente café liofilizado. Las hierbas son liofilizadas como: el eneldo, el perejil y ciboulette entre tantas. La industria alimenticia progresa y hoy en día se cuenta con frutas, verduras y hasta carnes. (Heinz, 2012).

### **2.12. Controlador lógico programable (PLC).**

Un Controlador Lógico Programable, o PLC es un computador especialmente diseñado para automatización industrial, para el control de una máquina o proceso industrial. Un PLC internamente tiene: hardware, procesador, memoria, puertos de comunicación, entre otros y con su software: un sistema operativo, una programación específica para la aplicación.

El PLC contiene múltiples canales para medir distintas señales provenientes de sensores instalados en la máquina o proceso que controlan. Y también tienen canales de salida de señal que actúan sobre la máquina o proceso que controlan.



**Figura 20 Controlador lógico programable.**

**Fuente: (Dahi-Shog, 2012)**

Un PLC permite controlar o proteger un proceso industrial, posibilitando además las opciones de monitoreo y diagnóstico de condiciones (alarmas), presentándolas en un HMI (Human-Machine Interface) o pantalla de operación, o presentándolas a una red de control superior. Un PLC puede ser parte de un sistema de control distribuido (DCS), puede ser parte de un SCADA, puede ser parte del sistema de seguridad.

### 2.13. Interfaz humano máquina -HMI

Los sistemas HMI (Interfaz Humano Máquina) se puede pensarlos como una “ventana” de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora. Los sistemas HMI en computadoras se los conoce también como software HMI o de monitoreo y control de supervisión.



**Figura 21 Pantalla táctil.**

**Fuente: (Interfaz Gráfica Humano Máquina, s.f.)**

En el proceso las señales son transmitidas al HMI por medio de tarjetas de Entrada/Salida en la computadora, PLC's (Controladores lógicos programables), RTU (Unidades remotas de I/O) o DRIVE's (Variadores de velocidad de motores). Estos dispositivos deben tener el mismo protocolo de comunicación que entienda el HMI.

### **2.13.1. Características de un HMI**

- Tiene la habilidad de obtener y mostrar datos del proceso en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, textos o gráficos que permitan una lectura más fácil de interpretar.
- Permiten junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente del panel de visualización.
- Posee la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportar estos eventos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control pre-establecido.
- Incorporan protocolos para comunicarse con los dispositivos de campo más conocidos.
- Tienen herramientas para crear bases de datos dinámicas.
- Permiten crear y animar pantallas en forma sencilla.

Incluyen gran cantidad de librería de objetos para representar dispositivos de uso en la industria como: motores, tanques, indicadores, interruptores, etc.

### **2.14. Elementos de presión:**

#### **Instrumento de columna de líquido:**

Una de las formas más simples de medir presión es la de utilizar líquido en un tubo en U en que la presión que se desea medir se conecta a uno de los extremos y la presión de referencia se conecta al otro extremo. Si la presión de referencia conectada es el vacío, la presión que se mide es la presión absoluta. Si es la

atmosférica se está midiendo la presión relativa y si se conecta cualquier otra presión se está midiendo presión diferencial.

**Instrumentos de Bourdon.** - El principio de funcionamiento consiste en un tubo de sección con forma de elipse. Al ser sometido a presiones crecientes las fuerzas resultantes sobre las distintas áreas del bourdon tienden a darle forma circular, produciendo un movimiento del extremo del bourdon que es función de la presión.

**Instrumentos a diafragma.** - El diafragma es una fina lámina de metal generalmente circular soportada por sus bordes y que se deforma por la aplicación de presión. Puede ser una chapa lisa pero comúnmente se usa la corrugada. La deformación que sufre la lámina es función de la presión ejercida.

**Instrumentos a fuelle.** - Existen elementos huecos con forma de fuelle, cerrados en un extremo, que se utilizan para las mediciones de presión. Del fuelle se aprovecha la capacidad de generar importantes movimientos o fuerzas al ser sometido a una presión de proceso. Se utiliza como material para construcción de fuelles el cobre, el acero inoxidable y si es necesario materiales especiales.

**Instrumentos a pistón.** - El uso más frecuente de este elemento primario es como presóstato. Estos instrumentos poseen un pistón que se desplaza por un cilindro donde el cabezal separa herméticamente dos cámaras. En una se aplica la presión de proceso y en la otra vacío, presión atmosférica u otra presión de proceso, de acuerdo a la función que se le quiera dar.

#### **2.14.1. Transmisores de presión:**

Existen distintas formas de transformar la información que suministra el elemento primario en señal de 4 a 20 mA o digital:

**Strain Gage** (celda de cambio de resistencia por tracción): Si la presión se convierte en fuerza y se aplica esta como un esfuerzo de tracción axial sobre un conductor (que puede estar soportado por algún medio elástico) la longitud del mismo aumenta y la sección disminuye. Esto produce una variación en la resistencia

que se puede medir (por ejemplo, con un puente de Wheatstone) y transformar en una señal utilizable proporcional a la presión.

**a. Sistemas capacitivos.**

En este sistema se utiliza el hecho de que un capacitor modifica su capacitancia en función de la distancia entre sus dos placas. Si se incluye alguno de los elementos primarios entre las placas de un capacitor, los desplazamientos debidos a variaciones de presión en el fluido producirán cambios del valor de la capacidad, que podrán ser utilizados por circuitos eléctricos para producir la señal adecuada de salida.

**b. Tecnología Resonante.**

Cuando a un elemento flexible se somete a niveles variables de tensión mecánica, la frecuencia de resonancia de este elemento es directamente proporcional a la tensión aplicada. Este principio fue usado para el desarrollo de elementos sensores de presión que fueron denominados tipo “cuerda vibrante” o “alambre resonante”.

**c. Sistemas Piezoeléctricos.**

El fenómeno piezoeléctrico consiste en el cambio de las características eléctricas de ciertos elementos sometidos a deformación. Estos cambios pueden sensarse y transformarse en señales transmisibles. Los movimientos de los elementos primarios actúan sobre la pastilla piezoeléctrica, la que produce cambios eléctricos que son convertidos en señales normalizadas por medio de circuitos eléctricos.

**d. Reluctancia Variable.**

El arreglo constructivo consiste en montar dos núcleos magnéticos (típicamente de ferrito) solidarios a cada lado de un diafragma sensor. Estos núcleos se desplazan en el interior de dos bobinas produciendo un cambio de reluctancia (la reluctancia es el equivalente a la resistencia eléctrica, pero en un circuito magnético). Un circuito eléctrico, que excita a las bobinas con una corriente alterna de aproximadamente 5 KHz. mide la variación de las impedancias de las bobinas y la transforma en una señal de salida de 4-20 mA. (Sole, 2005).

## 2.15. Sensores de presión.

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada).



**Figura 22 Clases de presión.**

**Fuente: (Sole, 2005)**

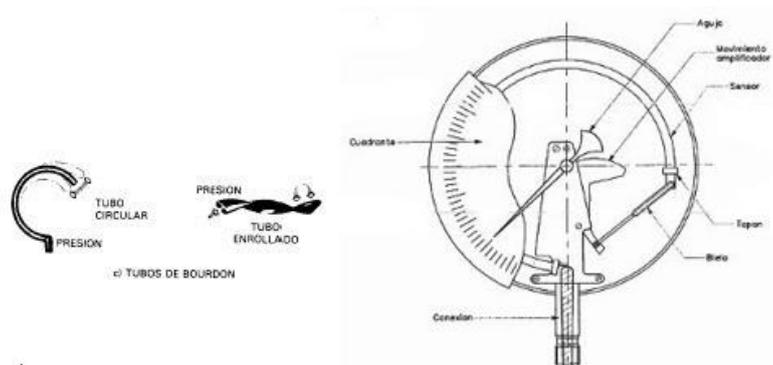
### Se clasifican en:

- Mecánicos.
- Neumáticos.
- Electromecánicos.
- Electrónicos.

#### 2.15.1. Mecánicos:

##### **Tubo de burdon:**

Tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por medio de un sistema de piñón y cremallera. Material del tubo: acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales de Hastelloy y Monel. (Sole, 2005).

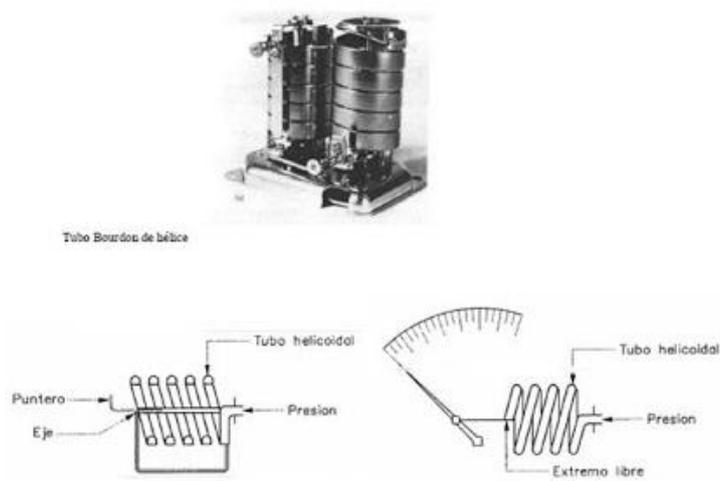


**Figura 23 Tubo Bourdon**

**Fuente: (Sole, 2005)**

### **Elemento en espiral:**

El elemento espiral cuenta con un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. Se enrolla el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal enrollando más de una espira en forma de hélice. (Sole, 2005).

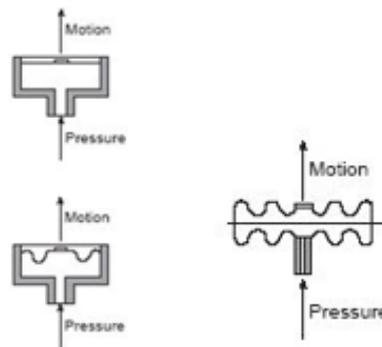


**Figura 24 Elemento espiral.**

**Fuente: (Sole, 2005).**

### **Diafragma:**

Consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que, al aplicar presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. En éstos, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis. Material del diafragma: aleación de níquel o inconel. Utilizado para pequeñas presiones (Sole, 2005).



**Figura 25 Tipos de sellos.**  
Fuente: (Sole, 2005).

### **2.15.2. Electromecánicos:**

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico (Inacap Valparaiso Máximo Araya Bugueño, 2009).

Los elementos electromecánicos se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

- Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerza.
- Resistivos.

- Magnéticos.
- Capacitivos.
- Extenso métricas.
- Piezoeléctricos.

## CAPÍTULO III

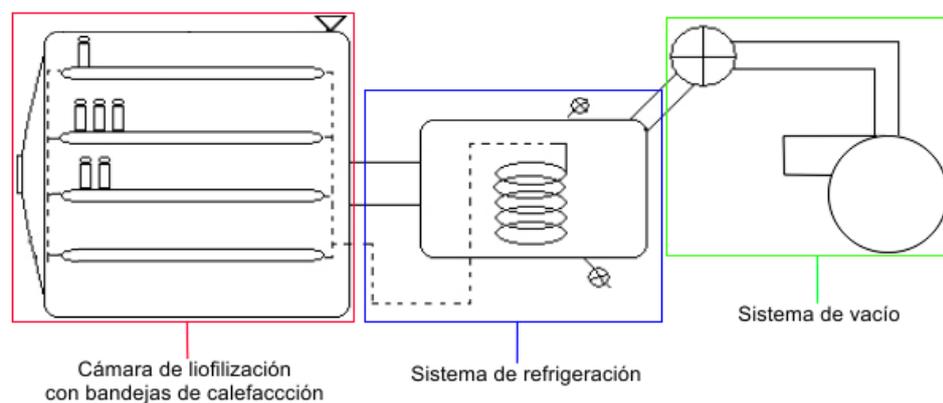
### 3. DISEÑO DEL LIOFILIZADOR PARA FRUTAS.

Se describe la metodología aplicada en el diseño de un liofilizador convencional para frutas, considerando las dimensiones, materiales y componentes más apropiados para su construcción, con el objetivo de cumplir con los requerimientos funcionales, asépticos y de seguridad, exigidos para este tipo de máquinas.

#### 3.1. Diseño de los componentes mecánicos.

El diseño integral de la máquina liofilizadora se fundamenta en los siguientes aspectos:

- Etapas y técnicas desarrolladas en el proceso de liofilización de frutas,
- Propiedades térmicas de las frutas a procesar, y
- Características técnicas de máquinas semejantes disponibles en el mercado.



**Figura 26 Esquema general de un equipo convencional de liofilización.**

Como se muestra en la figura 26, un equipo para realizar el proceso de liofilización comprende los siguientes sistemas básicos:

- **Cámara de secado con bandejas de calefacción.** Provee al proceso de un ambiente limpio y estéril, a la vez que da las condiciones de presión y

temperaturas exigidas para la congelación y posterior calentamiento del producto.

- **Sistema de refrigeración.** Permite realizar la congelación del producto a ser liofilizado para la formación de cristales de hielo
- **Sistema de vacío.** Permite mantener el producto a ser liofilizado en vacío durante todo el periodo de secado. La presión de vacío requerida depende de las características del producto y de la temperatura a la cual se debe mantener el producto congelado.

### 3.1.1. Parámetros de diseño.

En base a los requerimientos funcionales de la máquina, establecidos por el proceso de liofilización, se determina que es necesario que el equipo liofilizador se diseñe para poder trabajar a presiones de vapor inferiores a la del punto triple en el agua; esto implica que el producto a liofilizar debe colocarse en una cámara que pueda soportar el vacío durante todo el proceso de liofilización, se debe conservar condiciones de hermeticidad y resistencia a la presión atmosférica externa.

La temperatura de entrada del producto sin congelar a la cámara de liofilización puede oscilar entre 12°C a 18°C; mientras que, para asegurar la completa congelación del producto a liofilizar (temperatura máxima para completa solidificación), la temperatura máxima de enfriamiento debe ser aproximadamente -40°C (Dennis R. Heldman, 1998), debido a que esta temperatura garantiza que no existirá agua libre sin congelar en la fruta.

Con el fin de asegurar que el agua congelada a -40°C se sublime completamente a vapor, la presión de vacío dentro de la cámara de liofilización debe ser aproximada a la presión de saturación del hielo a dicha temperatura, es decir debe ser aproximada a 0,01285 kPa (Anexo H), por lo que se considera una presión constante de vacío de 0,014 Pa; y la temperatura se eleva lentamente hasta alcanzar los 20°C. Esto se denomina "secado primario"

Finalmente, se aumenta continuamente la temperatura a 60°C hasta que se elimina toda la humedad adsorbida, mientras que la presión dentro de la cámara de liofilización permanece constante. Esto se denomina "secado secundario."

Entonces, los parámetros que influyen directamente en el diseño del liofilizador son los siguientes:

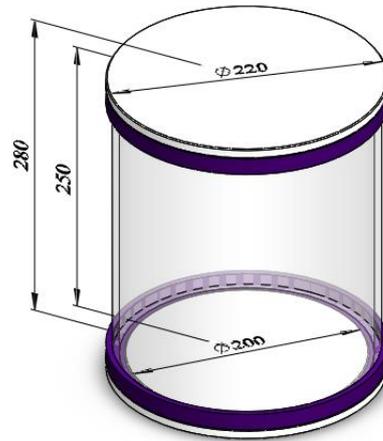
- Fruta en la que se basará el diseño Frutilla
- Capacidad máxima de carga del liofilizador ( $V_{fru}$ ) 500 cm<sup>3</sup>
- Capacidad de secado del liofilizador ( $\%_{sec}$ ) 80%
- Temperatura promedio del medio ambiente ( $T_{\infty 0}$ ) 15,0 °C
- Temperatura inicial promedio de la fruta ( $T_a$ ) 15,0 °C
- Temperatura para completa solidificación de la fruta ( $T_b$ ) -40,0 °C
- Presión de vacío en la cámara de liofilización ( $p_{vac}$ ) 14,0 Pa
- Temperatura para la completa sublimación del hielo ( $T_d$ ) 20,0 °C
- Temperatura máxima de las bandejas de calefacción ( $T_e$ ) 60,0 °C

### 3.1.2. Dimensionamiento de la cámara de liofilización.

En la cámara de trabajo se realiza el congelamiento y posterior calentamiento del producto a liofilizar. Dentro de ella se encuentran el sistema de bandejas, el sistema de calentamiento y el sistema de condensado del vapor. Por lo tanto, la cámara de secado debe tener las dimensiones suficientes para contener estos elementos, así como el 1,0 kg de frutilla para liofilizar.

Para lograr que el liofilizador sea lo más compacto posible y garantice un sello hermético de su interior con el fin de mantener la presión de vacío, la cámara de liofilización tendrá un cuerpo cilíndrico con las dimensiones mostradas en la figura 27.

- Altura interior: 250 mm
- Diámetro interior: 200 mm
- Altura exterior: 280 mm
- Diámetro exterior: 220 mm

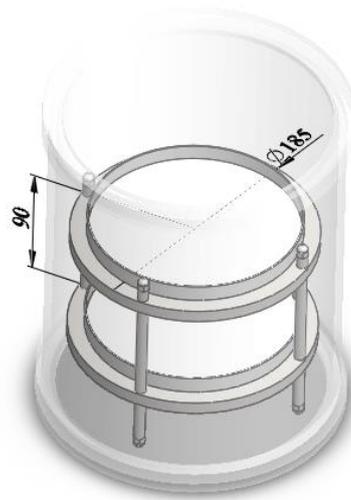


**Figura 27 Dimensiones de la cámara de liofilización.**

Con el fin de evitar los efectos perjudiciales de la corrosión y permitir visualizar el proceso de liofilizado que se produce en su interior, para la fabricación de la cámara de liofilización se utilizará acrílico transparente de 10 mm de espesor.

### **3.1.3. Dimensionamiento de las bandejas de secado.**

El sistema de bandejas es el compartimiento en el cual se colocan las frutas que van a ser sometidos al proceso de liofilización. Las bandejas se apoyan sobre placas calefactoras que calientan la fruta congelada con el objetivo de evaporar el contenido de agua.



**Figura 28 Dimensiones de las bandejas de secado**

Como se muestra en la figura 28, considerando que la cámara de liofilización contendrá en su interior dos bandejas circulares de 185 mm de diámetro, la altura mínima requerida en cada bandeja se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{fru}}{2} = \frac{\pi \cdot d_{ban}^2}{4} \cdot h_{ban} \quad \text{Ec. 4}$$

Despejando la altura de la bandeja  $h_{ban}$ :

$$h_{ban} = \frac{2 \cdot V_{fru}}{\pi \cdot d_{ban}^2}$$

$$h_{ban} = \frac{2 \cdot 500 \text{ cm}^3}{\pi \cdot 18,5^2 \text{ cm}^2}$$

$$h_{ban} = 0,93 \text{ cm} = 9,3 \text{ mm}$$

Donde:

$d_{ban}$  = Diámetro de la bandeja = 185 mm

$h_{ban}$  = Altura mínima requerida en cada bandeja

Para garantizar que la frutilla a secar no se desborde, se considera una altura de 12 mm. Por lo tanto, las bandejas de secado tendrán las siguientes dimensiones:

- Diámetro máximo: 185 mm
- Altura máxima: 12 mm
- Separación entre bandejas: 90 mm

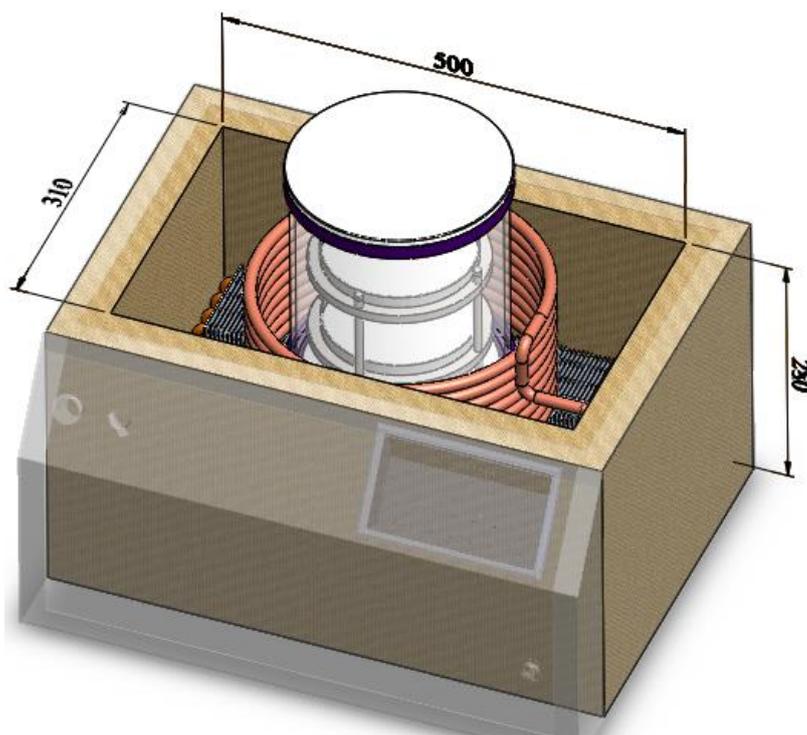
El documento International Recommended Code of Practice – General Principles of Food Hygiene (1997), establece que todo equipo y utensilios que entren en contacto con productos alimenticios, deben ser de un material que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores, resistente a la corrosión y capaz de resistir repetidas operaciones de limpieza y desinfección. Por lo tanto, el material más adecuado para fabricar las bandejas, es acero inoxidable 316L de 2 mm de espesor.

#### **3.1.4. Dimensionamiento de la cámara de refrigeración.**

En el interior de la cámara de refrigeración se produce la suficiente disminución de la temperatura con el objetivo de transmitir dicho frío a la cámara de liofilización, produciendo la congelación de la frutilla. Por lo tanto, los principales elementos que determinan las dimensiones de la cámara de refrigeración, son la cámara de liofilización y el evaporador del sistema de refrigeración.

En base a los parámetros anteriores, se determina las dimensiones interiores de la cámara de refrigeración (figura 29):

- Largo: 500 mm
- Ancho: 310 mm
- Altura: 250 mm



**Figura 29 Dimensiones de la cámara de refrigeración**

Debido a que el proceso de liofilización requiere que se alcancen bajas temperaturas en el interior la cámara de refrigeración, mientras que el exterior se mantiene a la temperatura ambiente, es necesario recubrir las paredes de la cámara con material aislante que garanticen una baja transferencia de calor.

Además, es imprescindible proteger al material aislante de los efectos perjudiciales del medio ambiente y de cargas o impactos externos, por lo tanto, se requiere un material para el recubrimiento de las paredes aisladas.

En base a estos requerimientos se determina que las paredes de la cámara de refrigeración se fabricaran con los siguientes materiales:

- **Material aislante:** Para las paredes de la cámara fría se empleará poliestireno expandido (EPS) de 50 mm de espesor (2,0 plg).

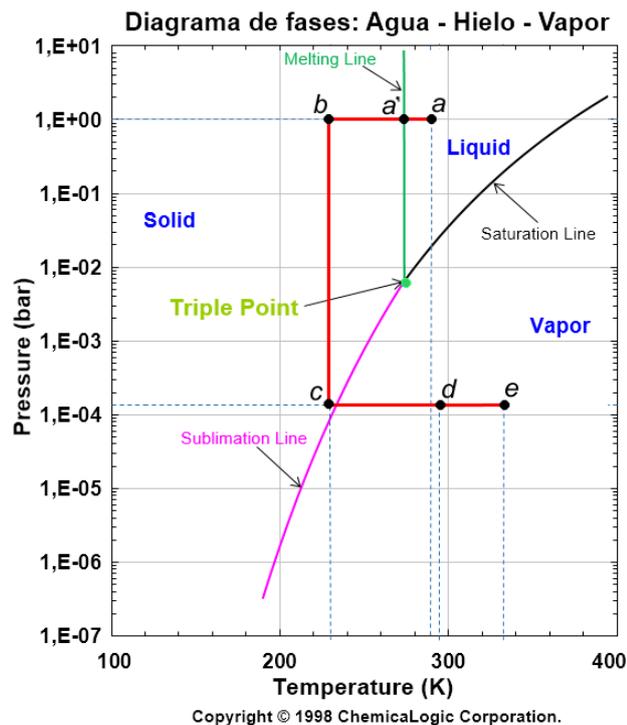
- **Revestimiento:** Como material para el recubrimiento exterior se utilizará chapa metálica de acero inoxidable 316L de 2,0 mm de espesor, con el fin de proteger el material aislante.

### 3.1.5. Análisis térmico del proceso de liofilización.

El principio de funcionamiento del equipo de liofilización, se basa en los procesos que se describen de forma esquemática en la figura 30, en el diagrama de fases del agua. Con el fin de evitar el estado líquido del agua, la secuencia de pasos orbita alrededor del punto triple.

Como se detalla en la figura 30, el proceso de liofilización se compone de los siguientes subprocesos:

- *a-b* Enfriamiento a presión atmosférica constante hasta alcanzar la  $t$  temperatura de congelamiento completo de la frutilla.
- *b-c* Disminución de la presión a temperatura constante hasta alcanzar la presión de vacío de requerida en la cámara de liofilización.
- *c-d* Calentamiento a presión constante de la frutilla hasta los 20°C para lograr la sublimación completa del hielo (secado primario).
- *d-e* Calentamiento a presión constante hasta los 60°C para eliminar la humedad adsorbida (secado secundario).



**Figura 30 Esquema paso a paso del proceso de liofilización**

Debido a que las frutillas se colocan en las bandejas de la cámara de liofilización bajo condiciones ambientales, la temperatura y la presión en el estado  $a$  de la figura 30, son:

$$T_a = 15\text{ }^{\circ}\text{C} = 288,2\text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$p_a = 1\text{ atm} = 1,013\text{ bar} = 101,325\text{ kPa}$$

A la presión de 1 atm, se produce el congelamiento inicial de las frutillas en el punto  $a'$ , a una temperatura de  $-0,8^{\circ}\text{C}$  (Heating, 2010).

En el punto  $b$ , gracias al sistema de refrigeración, se produce la congelación completa de la frutilla, por lo que, la temperatura y presión de la cámara de liofilización son:

$$T_b = -40^{\circ}\text{C} = 233,2^{\circ}\text{K}$$

$$p_b = p_a = 101325\text{ Pa} = 1,013\text{ bar}$$

Mediante la bomba de vacío, en el punto *c*, se alcanza una presión cercana a la presión de saturación del hielo a la temperatura de congelación completa de la frutilla, por lo tanto, la temperatura y presión son:

$$T_c = T_b = -40^\circ\text{C} = 233,2^\circ\text{K}$$

$$p_c = 14,0 \text{ Pa} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$$

Mediante la activación de las bandejas calefactoras, en el punto *d*, se produce el secado primario de las frutillas, gracias a la sublimación completa del hielo:

$$T_d = 20^\circ\text{C} = 293,2^\circ\text{K}$$

$$p_d = p_c = 14,0 \text{ Pa} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$$

Finalmente, gracias al calentamiento adicional generado por las bandejas calefactoras, en el punto *e*, finaliza el secado secundario de las frutillas, eliminando toda la humedad adsorbida:

$$T_e = 60^\circ\text{C} = 333,2^\circ\text{K}$$

$$p_e = p_c = 14,0 \text{ Pa} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$$

### 3.1.6. Cálculo de las cargas de enfriamiento.

Con el objetivo de determinar las propiedades térmicas de las frutillas, se extrae de la Tabla 3 de la (Heating, 2010), su composición en porcentajes:

- Contenido de agua ( $x_{wo}$ ) 91,57 %
- Contenido de proteínas ( $x_p$ ) 0,61 %
- Contenido de grasa ( $x_f$ ) 0,37 %
- Contenido de carbohidratos ( $x_c$ ) 7,02 %
- Contenido de fibra ( $x_{fb}$ ) 2,30 %
- Contenido de sólidos ( $x_a$ ) 0,43 %

El porcentaje de contenido de hielo ( $x_{ice}$ ), cuando las frutillas se congelan a  $-40^\circ\text{C}$ , se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$x_{ice} = (x_{wo} - x_b) \left( 1 - \left( \frac{T_f}{T} \right) \right) = (x_{wo} - 0,4x_p) \left( 1 - \left( \frac{T_f}{T} \right) \right) \quad \text{Ec. 5}$$

$$x_{ice} = (0,9157 - 0,4 \cdot 0,0061) \left( 1 - \left( \frac{-0,8}{-40} \right) \right)$$

$$x_{ice} = 0,895 = 89,5 \%$$

Donde:

$T_f$  = Temperatura del punto inicial de congelamiento de la frutilla (Tabla 3 (Heating, 2010)) =  $-0,8^\circ\text{C} = 272,4^\circ\text{K}$

$T$  = Temperatura más baja de enfriamiento de la frutilla =  $-40^\circ\text{C}$

El porcentaje de contenido de agua no congelada ( $x_w$ ), a la temperatura de  $-40^\circ\text{C}$ , viene dada por:

$$x_w = x_{wo} - x_{ice} \quad \text{Ec. 6}$$

$$x_w = 0,9157 - 0,8950$$

$$x_w = 0,0207 = 2,07 \%$$

#### a. Calculo de la densidad promedio de la frutilla.

A partir de las tablas 1 y 2 de la (Heating, 2010), se determina la densidad de la frutilla a  $-15^\circ\text{C}$ :

##### Densidad del agua

$$\rho_w = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 7}$$

$$\rho_w = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot (15)^2$$

$$\rho_w = 996,382 \text{ kg/m}^3$$

### Densidad del hielo

$$\rho_{ice} = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,3071 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 8}$$

$$\rho_{ice} = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,3071 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_{ice} = 914,93 \text{ kg/m}^3$$

### Densidad de las proteínas

$$\rho_p = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,1840 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 9}$$

$$\rho_p = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,1840 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_p = 1322,12 \text{ kg/m}^3$$

### Densidad de la grasa

$$\rho_f = 9,2559 \cdot 10^2 - 4,1757 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 10}$$

$$\rho_f = 9,2559 \cdot 10^2 - 4,1757 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_f = 919,33 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de los carbohidratos**

$$\rho_c = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 11}$$

$$\rho_c = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_c = 1594,44 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de las fibras**

$$\rho_{fb} = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 12}$$

$$\rho_{fb} = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_{fb} = 1306,01 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de los sólidos**

$$\rho_a = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1} \cdot T \quad \text{Ec. 13}$$

$$\rho_a = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1} \cdot (15)$$

$$\rho_a = 2419,59 \text{ kg/m}^3$$

La densidad de la frutilla a 15°C, viene dado por:

$$\rho_{15} = \frac{(1 - \epsilon)}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} = \frac{(1 - \epsilon)}{\frac{x_{ice}}{\rho_{ice}} + \frac{x_w}{\rho_w} + \frac{x_p}{\rho_p} + \frac{x_f}{\rho_f} + \frac{x_c}{\rho_c} + \frac{x_{fb}}{\rho_{fb}} + \frac{x_a}{\rho_a}} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\rho_{15} = \frac{1 - 0}{\frac{0,895}{914,93} + \frac{0,0207}{996,38} + \frac{0,0061}{1322,12} + \frac{0,0037}{919,33} + \frac{0,0702}{1594,44} + \frac{0,023}{1306,01} + \frac{0,0043}{2419,59}}$$

$$\rho_{15} = 933,66 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

$\epsilon$  = Porosidad = 0 (solo existe en alimentos en granos)

Aplicando las mismas ecuaciones se procede a calcular la densidad de la frutilla a  $-40^\circ\text{C}$ :

#### Densidad del agua

$$\rho_w = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot (-40)^2$$

$$\rho_w = 991,04 \text{ kg/m}^3$$

#### Densidad del hielo

$$\rho_{ice} = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,3071 \cdot 10^{-1} \cdot (-40)$$

$$\rho_{ice} = 922,12 \text{ kg/m}^3$$

#### Densidad de las proteínas

$$\rho_p = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,1840 \cdot 10^{-1} \cdot (-40)$$

$$\rho_p = 1350,64 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de la grasa**

$$\rho_f = 9,2559 \cdot 10^2 - 4,1757 \cdot 10^{-1} \cdot (-405)$$

$$\rho_f = 942,29 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de los carbohidratos**

$$\rho_c = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1} \cdot (-40)$$

$$\rho_c = 1611,52 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de las fibras**

$$\rho_{fb} = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1} \cdot (-40)$$

$$\rho_{fb} = 1326,14 \text{ kg/m}^3$$

**Densidad de los sólidos**

$$\rho_a = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1} \cdot (-40)$$

$$\rho_a = 2435,03 \text{ kg/m}^3$$

La densidad de la frutilla a  $-40^\circ\text{C}$ , viene dado por:

$$\rho_{40} = \frac{1 - 0}{\frac{0,895}{922,12} + \frac{0,0207}{991,04} + \frac{0,0061}{1350,64} + \frac{0,0037}{942,29} + \frac{0,0702}{1611,52} + \frac{0,023}{1326,14} + \frac{0,0043}{2435,03}}$$

$$\rho_{40} = 941,09 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, la densidad promedio de la frutilla durante la etapa de congelamiento es:

$$\rho_{fru} = \frac{\rho_{15} + \rho_{40}}{2} = \frac{933,66 + 941,09}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\rho_{fru} = 937,38 \text{ kg/m}^3$$

#### **b. Calor específico promedio de la frutilla húmeda.**

Mediante las ecuaciones de las tablas 1 y 2 de la (Heating, 2010), se calcula el calor específico de la frutilla a 15°C:

##### **Calor específico del agua**

$$c_{p_w} = 4,1289 - 5,3062 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,9516 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 16}$$

$$c_{p_w} = 4,1289 - 5,3062 \cdot 10^{-3} \cdot (15) + 9,9516 \cdot 10^{-4} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_w} = 4,2732 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

##### **Calor específico del hielo**

$$c_{p_{ice}} = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad \text{Ec. 17}$$

$$c_{p_{ice}} = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3} \cdot (15)$$

$$c_{p_{ice}} = 2,1535 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

### Calor específico de las proteínas

$$c_{p_p} = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 18}$$

$$c_{p_p} = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_p} = 2,0260 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

### Calor específico de la grasa

$$c_{p_f} = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 19}$$

$$c_{p_f} = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_f} = 2,0052 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

### Calor específico de los carbohidratos

$$c_{p_c} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 20}$$

$$c_{p_c} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_c} = 1,5769 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

### Calor específico de las fibras

$$c_{p_{fb}} = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot T - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 21}$$

$$c_{p_{fb}} = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_{fb}} = 1,8723 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### Calor específico de los sólidos

$$c_{p_a} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad \text{Ec. 22}$$

$$c_{p_a} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot (15) - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot (15)^2$$

$$c_{p_a} = 1,1201 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

El calor específico de la frutilla a 15°C, es:

$$\begin{aligned} c_{p_{15}} &= \sum x_i \cdot c_{p_i} \\ &= x_{ice} \cdot c_{p_{ice}} + x_w \cdot c_{p_w} + x_p \cdot c_{p_p} + x_f \cdot c_{p_f} + x_c \cdot c_{p_c} \\ &\quad + x_{fb} \cdot c_{p_{fb}} + x_a \cdot c_{p_a} \end{aligned} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\begin{aligned} c_{p_{15}} &= 0,895 \cdot 2,1535 + 0,0207 \cdot 4,2732 + 0,0061 \cdot 2,0260 + 0,0037 \cdot 2,0052 \\ &\quad + 0,0702 \cdot 1,5769 + 0,023 \cdot 1,8723 + 0,0043 \cdot 1,1201 \end{aligned}$$

$$c_{p_{15}} = 2,1942 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

El calor específico promedio de la frutilla antes de que inicie su congelamiento  $c_{p_l}$ , viene dado por:

$$c_{p_l} = \frac{c_{p_{15}} + c_{p_{\uparrow 0}}}{2} = \frac{2,1942 + 4,00}{2} \quad \text{Ec. 24}$$

$$c_{p_l} = 3,0971 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

Donde:

$$c_{p_{\uparrow 0}} = \text{Calor específico arriba del punto de congelamiento ( (Heating, 2010))} = 4,00 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

Mediante las mismas ecuaciones se calcula el calor específico de la frutilla a -40°C:

#### Calor específico del agua

$$c_{p_w} = 4,1289 - 5,3062 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) + 9,9516 \cdot 10^{-4} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_w} = 5,9334 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

#### Calor específico del hielo

$$c_{p_{ice}} = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3} \cdot (-40)$$

$$c_{p_{ice}} = 1,8192 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

#### Calor específico de las proteínas

$$c_{p_p} = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_p} = 1,95774 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

**Calor específico de la grasa**

$$c_{p_f} = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_f} = 1,91759 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

**Calor específico de los carbohidratos**

$$c_{p_c} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_c} = 1,53145 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

**Calor específico de las fibras**

$$c_{p_{fb}} = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_{fb}} = 1,76523 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

**Calor específico de los sólidos**

$$c_{p_a} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot (-40) - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot (-40)^2$$

$$c_{p_a} = 1,01113 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

El calor específico de la frutilla a  $-40^\circ\text{C}$ , viene dado por:

$$\begin{aligned}
 c_{p_{40}} &= \sum x_i \cdot c_{p_i} \\
 &= x_{ice} \cdot c_{p_{ice}} + x_w \cdot c_{p_w} + x_p \cdot c_{p_p} + x_f \cdot c_{p_f} + x_c \cdot c_{p_c} + x_{fb} \cdot c_{p_{fb}} \\
 &\quad + x_a \cdot c_{p_a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{p_{40}} &= 0,895 \cdot 1,8192 + 0,0207 \cdot 5,9334 + 0,0061 \cdot 1,9577 + 0,0037 \cdot 1,9176 \\
 &\quad + 0,0702 \cdot 1,5315 + 0,023 \cdot 1,7652 + 0,0043 \cdot 1,0111
 \end{aligned}$$

$$c_{p_{40}} = 1,9225 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

El calor específico promedio de la frutilla abajo de su punto de congelamiento  $c_{p_s}$ , viene dado por:

$$\begin{aligned}
 c_{p_s} &= \frac{c_{p_{\downarrow 0}} + c_{p_{40}}}{2} = \frac{1,840 + 1,9225}{2} && \text{Ec. 25} \\
 c_{p_s} &= 1,8813 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K
 \end{aligned}$$

Donde:

$c_{p_{\downarrow 0}}$  = Calor específico abajo del punto de congelamiento (Heating, 2010) =  $1,84 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$ .

### c. Calor cedido por la frutilla.

En base a la capacidad máxima del liofilizador y la densidad de la frutilla, se calcula la masa de frutilla con contenido de agua, es decir, de la frutilla humedad ( $m_{f-h}$ ):

$$m_{f-h} = \rho_{fru} \cdot V_{fru} \quad \text{Ec. 26}$$

$$m_{f-h} = 937,38 \frac{kg}{m^3} \cdot 500 \text{ cm}^3 \cdot \left( \frac{1 \text{ m}^3}{1 \cdot 10^6 \text{ cm}^3} \right)$$

$$m_{f-h} = 0,4687 \text{ kg}$$

El calor requerido para enfriar la frutilla desde la temperatura ambiente hasta su punto inicial de congelamiento, viene dado por la ecuación:

$$q_l = m_{f-h} \cdot c_{p_l} \cdot (T_a - T_{a'}) \quad \text{Ec. 27}$$

$$q_l = 0,4687 \text{ kg} \cdot 3,0971 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} \cdot (288,2 - 272,4) \text{ } ^\circ K$$

$$q_l = 22,94 \text{ kJ}$$

Donde:

$T_{a'}$  = Temperatura del punto inicial de congelamiento de la frutilla (Heating, 2010) =  $-0,8^\circ\text{C} = 272,4^\circ\text{K}$

El calor requerido para congelar la frutilla desde la temperatura inicial de congelamiento hasta  $-40^\circ\text{C}$ , se obtiene a partir de la ecuación:

$$q_s = m_{f-h} \cdot c_{p_s} \cdot (T_{a'} - T_b) \quad \text{Ec. 28}$$

$$q_s = 0,4687 \text{ kg} \cdot 1,8813 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} \cdot (272,4 - 233,2) \text{ } ^\circ K$$

$$q_s = 34,57 \text{ kJ}$$

La cantidad de calor requerida para el cambio de fase de líquido a sólido del agua cuando se congela, se calcula a partir de la ecuación:

$$q_{lat} = m_{f-h} \cdot q_{cl} \quad \text{Ec. 29}$$

$$q_{lat} = 0,4687 \text{ kg} \cdot 306 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{lat} = 143,42 \text{ kJ}$$

Donde:

$$q_{cl} = \text{Calor latente por fusión de la frutilla (Heating, 2010)} = 306 \text{ kJ/kg}$$

#### d. Calor cedido por la cámara de liofilización

A partir de la figura 27, se determina el volumen deacrílico de la cámara de liofilización:

$$V_{acr} = 2 \cdot 0,015 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,22^2}{4} \right) + \left( \frac{\pi \cdot (0,22^2 - 0,20^2)}{4} \right) \cdot 0,25$$

$$V_{acr} = 0,0028 \text{ m}^3$$

Del (Anexo I) se obtienen las propiedades delacrílico:

$$\rho_{acr} = 1190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{p_{acr}} = 1544 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

La masa deacrílico en la cámara de liofilización, es:

$$m_{acr} = \rho_{acr} \cdot V_{acr} \quad \text{Ec. 30}$$

$$m_{acr} = 1190 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0028 m^3 \cdot$$

$$m_{acr} = 3,332 kg$$

El calor requerido para enfriar la cámara de liofilización desde la temperatura ambiente hasta  $-40^{\circ}\text{C}$ , viene dado por:

$$q_{acr} = m_{acr} \cdot c_{p_{acr}} \cdot (T_a - T_b) \quad \text{Ec. 31}$$

$$q_{acr} = 3,332 kg \cdot 1,544 \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}\text{K}} \cdot (288,2 - 233,2) ^{\circ}\text{K}$$

$$q_{acr} = 282,95 kJ$$

#### e. Calor cedido por las bandejas de secado

En base a la figura 28, y el modelado 3D de las bandejas y porta bandejas de secado, se determina el volumen de acero inoxidable 316L:

$$V_{ban} = (2 \cdot 0,00005 + 0,00015) m^3$$

$$V_{ban} = 0,00025 m^3$$

Del (Anexo J) se obtienen las propiedades del acero inoxidable a la temperatura promedio:

$$\rho_{ban} = 8238 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{p_{ban}} = 468 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$$

La masa de acero inoxidable de las bandejas y porta bandejas, es:

$$m_{ban} = \rho_{ban} \cdot V_{ban} \quad \text{Ec. 32}$$

$$m_{ban} = 8238 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,00025 m^3 \cdot$$

$$m_{ban} = 2,059 kg$$

El calor requerido para enfriar el acero inoxidable desde la temperatura ambiente hasta  $-40^\circ C$ , viene dado por:

$$q_{e-b} = m_{ban} \cdot c_{p_{ban}} \cdot (T_a - T_b) \quad \text{Ec. 33}$$

$$q_{e-b} = 2,059 kg \cdot 0,468 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} \cdot (288,2 - 233,2) ^\circ K$$

$$q_{e-b} = 53,02 kJ$$

#### f. Calor cedido por el aire.

En base a la figura 29, se determina el volumen interno de la cámara de refrigeración:

$$V_{cam} = (0,50 \cdot 0,31 \cdot 0,25)m^3$$

$$V_{cam} = 0,0388 m^3$$

La temperatura promedio durante el proceso de refrigeración es:

$$T_{med} = \frac{T_a + T_b}{2} \quad \text{Ec. 34}$$

$$T_{med} = \frac{15\text{ }^\circ\text{C} + (-40\text{ }^\circ\text{C})}{2}$$

$$T_{med} = -12,5\text{ }^\circ\text{C} = 260,7\text{ }^\circ\text{K}$$

De la tabla A-15 del (Anexo I) se obtienen las propiedades del aire a la temperatura promedio:

$$\rho_{air} = 1,3542 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{p\ air} = 1005,75 \frac{J}{kg\text{ }^\circ\text{K}}$$

La masa de aire presente en la cámara de liofilización, es:

$$m_{air} = \rho_{air} \cdot V_{cam} \quad \text{Ec. 35}$$

$$m_{air} = 1,3542 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0388\text{ }m^3 \cdot$$

$$m_{air} = 0,0525\text{ }kg$$

El calor requerido para enfriar el aire desde la temperatura ambiente hasta  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , viene dado por:

$$q_{e-a} = m_{air} \cdot c_{p\ air} \cdot (T_a - T_b) \quad \text{Ec. 36}$$

$$q_{e-a} = 0,0588 \text{ kg} \cdot 1,0058 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot (288,2 - 233,2) \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$q_{e-a} = 2,91 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, la carga térmica total de enfriamiento es igual a la suma de cada una de las cargas térmicas parciales calculadas:

$$q_{T-e} = q_l + q_s + q_{lat} + q_{acr} + q_{e-b} + q_{e-a} \quad \text{Ec. 37}$$

$$q_{T-e} = (22,94 + 34,57 + 143,422 + 282,95 + 53,02 + 2,91) \text{ kJ}$$

$$q_{T-e} = 539,81 \text{ kJ}$$

Considerando que el enfriamiento de la frutilla desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de  $-40^\circ\text{C}$ , se pueda realizar en un tiempo de 2 horas, la potencia requerida para congelar las frutillas viene dado por:

$$Q_{enf} = \frac{q_{T-e}}{t_e} \quad \text{Ec. 38}$$

$$Q_{enf} = \frac{539,81 \text{ kJ}}{2 \text{ h}} \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right)$$

$$Q_{enf} = 0,075 \text{ kW} = 75,0 \text{ W}$$

Donde:

$t_e$  = Tiempo requerido para la congelación completa de la frutilla

### 3.1.7. Ganancia de calor a través de las paredes.

El principal mecanismo de ganancia de calor en la cámara de refrigeración es la transferencia de calor por convección natural y por conducción a través de sus paredes compuestas.

#### a) Coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes verticales exteriores de la cámara de refrigeración.

Considerando que la diferencia entre la temperatura de la pared exterior de la cámara de refrigeración ( $T_3$ ) y la del aire ambiente ( $T_{\infty o}$ ), es aproximadamente  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $5\text{ }^{\circ}\text{K}$ ), la temperatura de la película ( $T_{fo}$ ) en la capa límite exterior de la cámara de refrigeración, se obtiene de la ecuación:

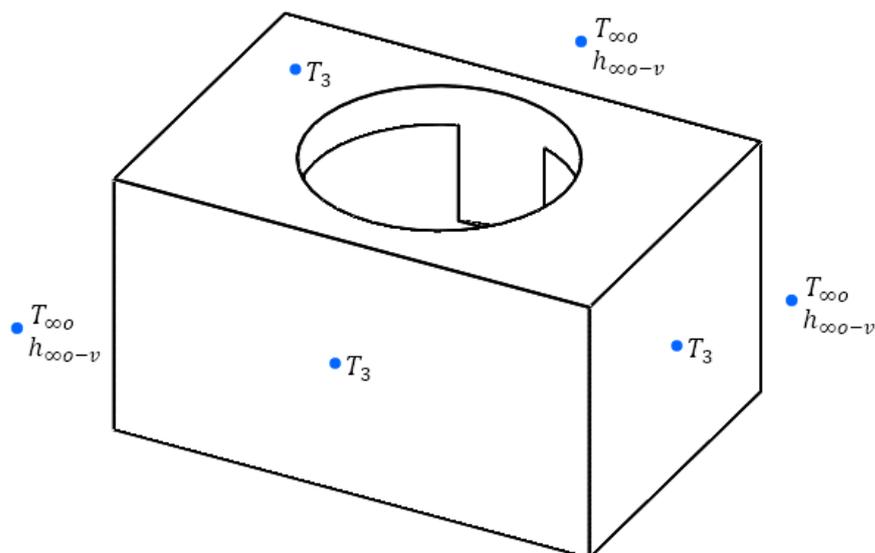
$$T_{fo} = T_{\infty o} - \frac{1}{2} \Delta T \quad \text{Ec. 39}$$

$$T_{fo} = 15\text{ }^{\circ}\text{C} - \frac{1}{2} \cdot 5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fo} = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C} = 285,7\text{ }^{\circ}\text{K}$$

Donde:

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre la pared y el aire ambiente =  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$



**Figura 31 Distribución de temperaturas en el exterior de la cámara.**

A la temperatura de la película se obtiene, del (Anexo K), las propiedades del aire exterior:

- Conductividad térmica del aire ( $k_o$ ) = 0,0245 W/m °K
- Viscosidad cinemática ( $\nu_o$ ) =  $1,4443 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s
- Número de Prandtl ( $Pr_o$ ) = 0,7331

El coeficiente de expansión volumétrica  $\beta$  para el aire en el exterior, es:

$$\beta_o = \frac{1}{T_{fo}} \quad \text{Ec. 40}$$

$$\beta_o = \frac{1}{285,7 \text{ °K}}$$

La altura de la pared vertical exterior de la cámara de refrigeración es:

$$L_{c-ov} = 0,25 + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \quad \text{Ec. 41}$$

$$L_{c-ov} = (0,25 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)m$$

$$L_{c-ov} = 0,354 m$$

Donde:

$L_1$  = Espesor de la pared de poliestireno expandido (EPS) = 50 mm

$L_2$  = Espesor de la chapa de acero inoxidable = 2 mm

El régimen de flujo en la convección natural se determina mediante el número de Grashof:

$$Gr_{L-ov} = \frac{g \cdot \beta_o \cdot \Delta T \cdot L_{c-ov}^3}{\nu_o^2} \quad \text{Ec. 42}$$

$$Gr_{L-ov} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{285,7^\circ K} \cdot 5^\circ K \cdot 0,354^3 m^3}{(1,4443 \cdot 10^{-5})^2 \frac{m^4}{s^2}}$$

$$Gr_{L-ov} = 3,651 \cdot 10^7$$

Donde:

$g$  = Aceleración de la gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>

La relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica, viene dado por el número de Rayleigh.

$$Ra_{L-ov} = Gr_{L-ov} \cdot Pr_o \quad \text{Ec. 43}$$

$$Ra_{L-ov} = 3,651 \cdot 10^7 \cdot 0,7331$$

$$Ra_{L-ov} = 2,677 \cdot 10^7$$

De acuerdo con la tabla del (Anexo L), la correlación empírica del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies verticales, se obtiene de la ecuación:

$$Nu_{ov} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{L-ov}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr_o} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 44}$$

$$Nu_{ov} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot 2,677 \cdot 10^{7^{1/6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,7331} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_{ov} = 41,594$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes verticales exteriores de la cámara fría ( $h_{\infty o-v}$ ), viene dado por:

$$h_{\infty o-v} = \frac{k_o \cdot Nu_{ov}}{L_{c-ov}} \quad \text{Ec. 45}$$

$$h_{\infty o-v} = \frac{0,0245 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 41,594}{0,354 m}$$

$$h_{\infty o-v} = 2,879 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**b) Coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes horizontales exteriores de la cámara fría.**

De acuerdo con la figura 29, el área exterior de la superficie horizontal de transferencia de calor ( $A_{so}$ ), es:

$$A_{so} = (0,31 + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) \cdot (0,50 + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) \quad \text{Ec. 46}$$

$$A_{so} = (0,31 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002) \cdot (0,50 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)$$

$$A_{so} = 0,414 \cdot 0,604$$

$$A_{so} = 0,250 \text{ m}^2$$

El perímetro de la superficie horizontal exterior de transferencia de calor ( $p_o$ ), es:

$$p_o = 2 \cdot (0,31 + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) + 2 \cdot (0,50 + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) \quad \text{Ec. 47}$$

$$p_o = 2 \cdot 0,414 + 2 \cdot 0,604$$

$$p_o = 2,036 \text{ m}$$

De acuerdo con el (Anexo L), la longitud característica de la pared horizontal viene dado por:

$$L_{c-oh} = \frac{A_{so}}{p_o} \quad \text{Ec. 48}$$

$$L_{c-oh} = \frac{0,250 \text{ m}^2}{2,036 \text{ m}}$$

$$L_{c-oh} = 0,1228 \text{ m}$$

De forma semejante a las paredes verticales, el número de Grashof para las paredes horizontales exteriores vienen dado por:

$$Gr_{L-oh} = \frac{g \cdot \beta_o \cdot \Delta T \cdot L_{c-oh}^3}{\nu_o^2} \quad \text{Ec. 49}$$

$$Gr_{L-oh} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{285,7 \text{ }^\circ\text{K}} \cdot 5 \text{ }^\circ\text{K} \cdot 0,1228^3 \text{ m}^3}{(1,4443 \cdot 10^{-5})^2 \frac{\text{m}^4}{\text{s}^2}}$$

$$Gr_{L-oh} = 1,524 \cdot 10^6$$

El número de Rayleigh, viene dado por:

$$Ra_{L-oh} = Gr_{L-oh} \cdot Pr_o \quad \text{Ec. 50}$$

$$Ra_{L-oh} = 1,524 \cdot 10^6 \cdot 0,7331$$

$$Ra_{L-oh} = 1,117 \cdot 10^6$$

De acuerdo con el (Anexo L), el número de Nusselt para la convección natural en las superficies horizontales exteriores, se obtiene de la ecuación:

$$Nu_{oh} = 0,54 \cdot Ra_{L-oh}^{1/4} \quad \text{Ec. 51}$$

$$Nu_{oh} = 0,54 \cdot 1,117 \cdot 10^{6^{1/4}}$$

$$Nu_{oh} = 17,557$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes horizontales exteriores de la cámara ( $h_{\infty o-h}$ ), es:

$$h_{\infty o-h} = \frac{k_o \cdot Nu_{oh}}{L_{c-h}} \quad \text{Ec. 52}$$

$$h_{\infty o-h} = \frac{0,0245 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 17,557}{0,1228 m}$$

$$h_{\infty o-h} = 3,503 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**c) Coeficiente de transferencia de calor convección en las paredes verticales interiores de la cámara fría.**

La temperatura de la película ( $T_{fi}$ ) en la capa límite interior de la cámara de refrigeración, es:

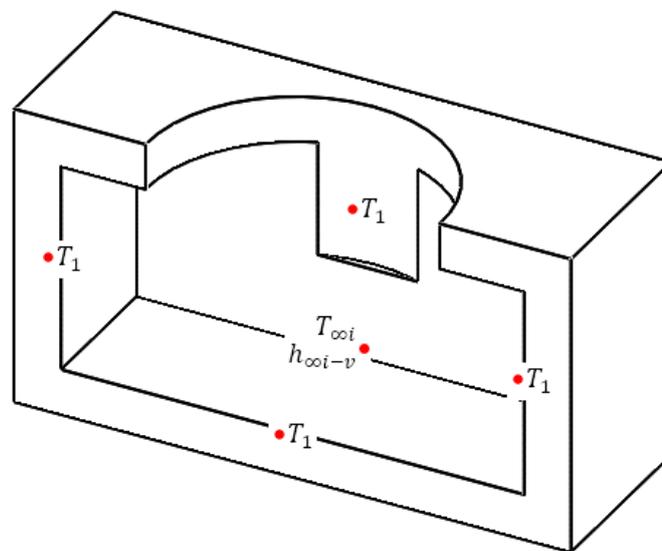
$$T_{fi} = T_{\infty i} + \frac{1}{2} \Delta T \quad \text{Ec. 53}$$

$$T_{fi} = -40^{\circ}\text{C} + \frac{1}{2} \cdot 5,0^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fi} = -37,5^{\circ}\text{C} = 235,7^{\circ}\text{K}$$

Donde:

$T_{\infty i}$  = Temperatura mínima requerida en el interior de la cámara de secado = -40°C (figura 32).



**Figura 32 Distribución de temperaturas en el interior de la cámara.**

Con la temperatura de la película, en el (Anexo K), se determina las propiedades del aire en el interior de la cámara de refrigeración:

- Conductividad térmica del aire ( $k_i$ ) =  $0,0208 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
- Viscosidad cinemática ( $\nu_i$ ) =  $1,0277 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Número de Prandtl ( $Pr_i$ ) =  $0,7434$

El coeficiente de expansión volumétrica  $\beta_i$  del aire interior, viene dado por:

$$\beta_i = \frac{1}{T_{fi}} \quad \text{Ec. 54}$$

$$\beta_i = \frac{1}{235,7 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

El número de Grashof en el interior de la cámara de refrigeración es:

$$Gr_{L-iv} = \frac{g \cdot \beta_i \cdot \Delta T \cdot L_{c-iv}^3}{\nu_i^2} \quad \text{Ec. 55}$$

$$Gr_{L-iv} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{235,7 \text{ } ^\circ\text{K}} \cdot 5 \text{ } ^\circ\text{K} \cdot 0,25^3 m^3}{(1,0277 \cdot 10^{-5})^2 \frac{m^4}{s^2}}$$

$$Gr_{L-iv} = 3,079 \cdot 10^7$$

Donde:

$L_{c-iv}$  = Altura de la pared vertical interior de la cámara = 250 mm (figura 29)

El número de Rayleigh, viene dado por:

$$Ra_{L-iv} = Gr_{L-iv} \cdot Pr_i \quad \text{Ec. 56}$$

$$Ra_{L-iv} = 3,079 \cdot 10^7 \cdot 0,7434$$

$$Ra_{L-iv} = 2,289 \cdot 10^7$$

El número de Nusselt en las superficies verticales internas de la cámara, se obtiene de la ecuación:

$$Nu_{iv} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{L-iv}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr_i} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 57}$$

$$Nu_{iv} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot 2,289 \cdot 10^{7^{1/6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,7434} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_{iv} = 39,818$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes verticales interiores de la cámara de refrigeración ( $h_{\infty i-v}$ ), viene dado por:

$$h_{\infty i-v} = \frac{k_i \cdot Nu_{iv}}{L_{c-iv}} \quad \text{Ec. 58}$$

$$h_{\infty i-v} = \frac{0,0208 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 39,818}{0,25 m}$$

$$h_{\infty i-v} = 3,313 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**d) Coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes horizontales interiores de la cámara.**

A partir de la figura 29, se determina el área interior de la superficie horizontal de transferencia de calor ( $A_{si}$ ), es:

$$A_{si} = (0,31 \cdot 0,50)m^2$$

$$A_{si} = 0,155 m^2$$

El perímetro de la superficie horizontal interior de transferencia de calor ( $p_i$ ), es:

$$p_i = 2 \cdot 0,31 + 2 \cdot 0,50$$

$$p_i = 1,62 m$$

La longitud característica de la pared horizontal interior, viene dada por:

$$L_{c-ih} = \frac{A_{si}}{p_i} \quad \text{Ec. 59}$$

$$L_{c-ih} = \frac{0,155 m^2}{1,62 m}$$

$$L_{c-ih} = 0,096 m$$

El número de Grashof para las paredes horizontales interiores es:

$$Gr_{L-ih} = \frac{g \cdot \beta_i \cdot \Delta T \cdot L_{c-ih}^3}{\nu_i^2} \quad \text{Ec. 60}$$

$$Gr_{L-ih} = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{235,7^\circ K} \cdot 5^\circ K \cdot 0,096^3 m^3}{(1,0277 \cdot 10^{-5})^2 \frac{m^4}{s^2}}$$

$$Gr_{L-ih} = 1,743 \cdot 10^6$$

El número de Rayleigh, se obtiene de la ecuación:

$$Ra_{L-ih} = Gr_{L-ih} \cdot Pr_i \quad \text{Ec. 61}$$

$$Ra_{L-ih} = 1,743 \cdot 10^6 \cdot 0,7434$$

$$Ra_{L-ih} = 1,296 \cdot 10^6$$

El número promedio de Nusselt, se obtiene de la ecuación:

$$Nu_{ih} = 0,54 \cdot Ra_{L-ih}^{1/4} \quad \text{Ec. 62}$$

$$Nu_{ih} = 0,54 \cdot 1,296 \cdot 10^{6^{1/4}}$$

$$Nu_{ih} = 18,220$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes horizontales interiores de la cámara de refrigeración ( $h_{\infty i-h}$ ), es:

$$h_{\infty i-h} = \frac{k_i \cdot Nu_{ih}}{L_{c-ih}} \quad \text{Ec. 63}$$

$$h_{\infty i-h} = \frac{0,0208 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 18,220}{0,096 m}$$

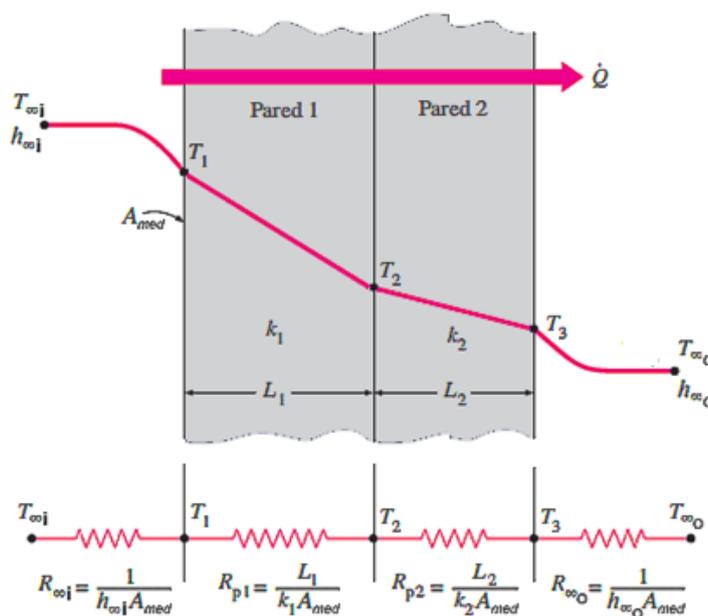
$$h_{\infty i-h} = 3,961 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

e) **Flujo de calor a través de las paredes.**

De acuerdo con la figura 29, el área exterior de las paredes verticales frontal y posterior de la cámara de refrigeración, es:

$$A_1 = (0,25 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)m \cdot (0,50 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)m$$

$$A_1 = 0,214 \text{ m}^2$$



**Figura 33 Resistencias térmicas en las paredes de la cámara de refrigeración.**

Como se muestra en la figura 33, el flujo de calor a través de las paredes verticales frontal y posterior de la cámara de refrigeración, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{L1} = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty o}}{\frac{1}{h_{\infty i-v} \cdot A_1} + \frac{L_1}{k_1 \cdot A_1} + \frac{L_2}{k_2 \cdot A_1} + \frac{1}{h_{\infty o-v} \cdot A_1}} \quad \text{Ec. 64}$$

$$\dot{Q}_{L1} = \frac{(15 - (-40))^{\circ}\text{C}}{\left( \frac{1}{3,313 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,050\text{m}}{0,04628 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,002 \text{ m}}{13,4 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{1}{2,879 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}} \right)} \cdot \frac{1}{0,214 \text{ m}^2}$$

$$\dot{Q}_{L1} = 6,805 \text{ W}$$

Donde:

$k_1$  = Conductividad térmica de poliestireno expandido (Anexo M)

$k_2$  = Conductividad térmica del acero inoxidable (Anexo J)

El área exterior de las paredes verticales laterales de la cámara de refrigeración, es:

$$A_2 = (0,25 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)\text{m} \cdot (0,31 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)\text{m}$$

$$A_2 = 0,147 \text{ m}^2$$

El flujo de calor a través de las paredes laterales de la cámara de refrigeración, viene dado por:

$$\dot{Q}_{L2} = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty o}}{\frac{1}{h_{\infty i-v} \cdot A_2} + \frac{L_1}{k_1 \cdot A_2} + \frac{L_2}{k_2 \cdot A_2} + \frac{1}{h_{\infty o-v} \cdot A_2}} \quad \text{Ec. 65}$$

$$\dot{Q}_{L2} = \frac{(15 - (-40))^{\circ}\text{C}}{\left( \frac{1}{3,313 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,050\text{m}}{0,04628 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,002 \text{ m}}{13,4 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ }^{\circ}\text{C}}} + \frac{1}{2,879 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}} \right)} \cdot \frac{1}{0,147 \text{ m}^2}$$

$$\dot{Q}_{L2} = 4,675 \text{ W}$$

El área de las paredes horizontales de la cámara, viene dado por:

$$A_3 = (0,50 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)m \cdot (0,31 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,002)m$$

$$A_3 = 0,250 \text{ m}^2$$

La rapidez de transferencia de calor a través de la pared superior y la pared inferior, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{L3} = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty o}}{\frac{1}{h_{\infty i-h} \cdot A_3} + \frac{L_1}{k_1 \cdot A_3} + \frac{L_2}{k_2 \cdot A_3} + \frac{1}{h_{\infty o-h} \cdot A_3}} \quad \text{Ec. 66}$$

$$\dot{Q}_{L3} = \frac{(15 - (-40))^{\circ}\text{C}}{\left( \frac{1}{3,961 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,050\text{m}}{0,04628 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}} + \frac{0,002 \text{ m}}{13,4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}} + \frac{1}{3,503 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}} \right)} \cdot \frac{1}{0,25 \text{ m}^2}$$

$$\dot{Q}_{L3} = 8,510 \text{ W}$$

Por lo tanto, la ganancia de calor total ( $\dot{Q}_{LT}$ ), a través de las seis paredes de la cámara de refrigeración es:

$$\dot{Q}_{LT} = 2 \cdot \dot{Q}_{L1} + 2 \cdot \dot{Q}_{L2} + 2 \cdot \dot{Q}_{L3} \quad \text{Ec. 67}$$

$$\dot{Q}_{LT} = (2 \cdot 6,805 + 2 \cdot 4,675 + 2 \cdot 8,510)\text{W}$$

$$\dot{Q}_{LT} = 39,98 \text{ W}$$

### 3.1.8. Potencia de refrigeración total requerida.

La energía térmica de refrigeración ( $Q_{Ref}$ ) requerida para el proceso de congelación de la frutilla, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{Ref} = Q_{enf} + \dot{Q}_{LT} \quad \text{Ec. 68}$$

$$Q_{Ref} = (75,0 + 39,98) W$$

$$Q_{Ref} = 114,98 W$$

Con el objetivo de contemplar situaciones particulares adversas, así como el rendimiento de los diferentes elementos del sistema de refrigeración, se estima una eficiencia total del sistema ( $\eta_T$ ) de 60%. Por lo tanto, la potencia total ( $P_{Ref}$ ) requerida en la unidad condensadora es:

$$P_{Ref} = \frac{Q_{Ref}}{\eta_T} \quad \text{Ec. 69}$$

$$P_{Ref} = \frac{114,98 W}{0,60}$$

$$P_{Ref} = 191,63 W = 0,256 hp$$

Entonces, se selecciona una unidad condensadora de 1/4 hp.

### 3.1.9. Potencia de calentamiento requerida.

Con el fin de calcular la energía térmica de calentamiento requerida para el proceso de secado, es necesario determinar el calor específico y la masa de la frutilla cuando se elimina el 80% de humedad.

Luego de proceso de secado primario y secundario de la frutilla, su contenido máximo de humedad es:

$$\%_{hum} = 1 - \%_{sec}$$

$$\%_{hum} = 1 - 0,8$$

$$\%_{hum} = 0,2 = 20\%$$

#### a. Calor específico promedio de la frutilla seca.

Debido a que, para lograr el secado completo de la frutilla, se la calienta hasta los 60°C, se calcula su calor específico a dicha temperatura:

#### Calor específico del agua

$$c_{p_w} = 4,1289 - 5,3062 \cdot 10^{-3} \cdot (60) + 9,9516 \cdot 10^{-4} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_w} = 7,3931 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ K$$

#### Calor específico del hielo

$$c_{p_{ice}} = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3} \cdot (60)$$

$$c_{p_{ice}} = 2,4269 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### **Calor específico de las proteínas**

$$c_{p_p} = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3} \cdot (60) - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_p} = 2,0760 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### **Calor específico de la grasa**

$$c_{p_f} = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot (60) - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_f} = 2,0553 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### **Calor específico de los carbohidratos**

$$c_{p_c} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot (60) - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_c} = 1,6452 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### **Calor específico de las fibras**

$$c_{p_{fb}} = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot (60) - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_{fb}} = 1,9390 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

### **Calor específico de los sólidos**

$$c_{p_a} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot (60) - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot (60)^2$$

$$c_{p_a} = 1,1927 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

Entonces, el calor específico de la frutilla a 60°C y con el 20% de humedad, viene dado por:

$$c_{p_{60}} = \sum x_i \cdot c_{p_i} \quad \text{Ec. 70}$$

$$= \%_{hum} \cdot x_{ice} \cdot c_{p_{ice}} + \%_{hum} \cdot x_w \cdot c_{p_w} + x_p \cdot c_{p_p} + x_f \cdot c_{p_f} + x_c \cdot c_{p_c} + x_{fb} \cdot c_{p_{fb}} + x_a \cdot c_{p_a}$$

$$c_{p_{60}} = 0,2 \cdot 0,895 \cdot 2,4269 + 0,2 \cdot 0,0207 \cdot 7,3931 + 0,0061 \cdot 2,076 + 0,0037 \cdot 2,0553 + 0,0702 \cdot 1,6452 + 0,023 \cdot 1,939 + 0,0043 \cdot 1,1927$$

$$c_{p_{60}} = 0,651 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

El calor específico promedio de la frutilla durante el calentamiento es:

$$c_{p_c} = \frac{c_{p_{40}} + c_{p_{60}}}{2} \quad \text{Ec. 71}$$

$$c_{p_c} = \frac{1,9225 + 0,651}{2}$$

$$c_{p_c} = 1,2865 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

**b. Calor absorbido por la frutilla.**

La masa de la frutilla seca ( $m_{f-s}$ ), es decir, solo con el 20% de humedad, viene dado por:

$$m_{f-s} = \%_{hum} \cdot m_{f-h} \quad \text{Ec. 72}$$

$$m_{f-s} = 0,2 \cdot 0,4687 \text{ kg}$$

$$m_{f-s} = 0,094 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la masa promedio de la frutilla durante la etapa de calentamiento, es:

$$m_{fru} = \frac{m_{f-h} + m_{f-s}}{2} \quad \text{Ec. 73}$$

$$m_{fru} = \frac{0,4687 \text{ kg} + 0,094 \text{ kg}}{2}$$

$$m_{fru} = 0,2814 \text{ kg}$$

El calor requerido para calentar la frutilla desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta los  $60^{\circ}\text{C}$ , viene dado por:

$$q_c = m_{fru} \cdot c_{p_c} \cdot (T_e - T_b) \quad \text{Ec. 74}$$

$$q_c = 0,2814 \text{ kg} \cdot 1,2865 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{K}} \cdot (333,2 - 233,2) ^{\circ}\text{K}$$

$$q_c = 36,20 \text{ kJ}$$

**c. Calor absorbido por las bandejas de secado.**

El calor requerido para calentar las bandejas y la porta bandejas de acero inoxidable desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $60^{\circ}\text{C}$ , viene dado por:

$$q_{c-b} = m_{ban} \cdot c_{p_{ban}} \cdot (T_e - T_b) \quad \text{Ec. 75}$$

$$q_{c-b} = 2,059 \text{ kg} \cdot 0,468 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{K}} \cdot (333,2 - 233,2) ^{\circ}\text{K}$$

$$q_{c-b} = 96,36 \text{ kJ}$$

**d. Calor absorbido por el aire.**

El calor requerido para calentar el aire dentro de la cámara es:

$$q_{c-a} = m_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot (T_a - T_b) \quad \text{Ec. 76}$$

$$q_{c-a} = 0,0588 \text{ kg} \cdot 1,0058 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{K}} \cdot (333,2 - 233,2) ^{\circ}\text{K}$$

$$q_{c-a} = 5,92 \text{ kJ}$$

La carga térmica total de calentamiento viene dada por la suma de las cargas térmicas parciales calculadas:

$$q_{T-c} = q_c + q_{c-b} + q_{c-a} \quad \text{Ec. 77}$$

$$q_{T-c} = (36,20 + 96,36 + 5,92) \text{ kJ}$$

$$q_{T-c} = 138,48 \text{ kJ}$$

Considerando que el calentamiento de la frutilla se realiza en un tiempo de 30 minutos, la potencia de calentamiento requerida, viene dado por:

$$Q_{cal} = \frac{q_{T-c}}{t_c} \quad \text{Ec. 78}$$

$$Q_{cal} = \frac{138,48 \text{ kJ}}{30 \text{ min}} \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right)$$

$$Q_{cal} = 0,0769 \text{ kW} = 76,9 \text{ W}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo requerido para la congelación completa de la frutilla

## CAPÍTULO IV

### 4. SELECCIÓN DE EQUIPOS.

La implementación del Liofilizador está constituida por un sistema mecánica y un sistema de control, para el sistema mecánico se utilizaron los siguientes equipos:

- Bomba de vacío.
- Compresor.
- Cámara de secado.
- Condensador tipo radiador.
- Evaporador.
- Válvula de expansión.
- Filtro.
- Refrigerante.

Para el sistema de control, se utilizó los siguientes elementos:

- PLC.
- Panel Touch.
- Interfaz eléctrica.
- RTD.
- Transductor de presión.
- Conversor RTD a voltaje.
- Válvula de Paso

#### 4.1. Bomba de vacío.

La bomba SuperEvac™ tiene un diseño de bomba de paletas de 2 etapas (a la derecha) que aumenta la eficacia y acelera el bombeo hasta los 15 micrones. La bomba disminuye la presión interna de un sistema de refrigeración hasta que la humedad se convierte en vapor. Cuando se vaporiza la humedad, la bomba la evacua; esto contribuye a deshidratar el sistema. La mayoría de los técnicos intentan alcanzar entre 250 y 1000 micrones. Bomba de vacío ver figura 34.



**Figura 34 Bomba de vacío Yellow Jacket.**

**Tabla 1**

**Especificaciones técnicas bomba de vacío.**

No.	Modelo	93560
1	Desplazamiento de aire libre	6.0 CFM
2	Vacío final	15 micrones.
3	Peso	32.0 lb
4	Voltaje	115VAC
5	Frecuencia	60 Hz.
7	Desplazamiento CFM	11.1 cfm
8	Motor	1/2 HP
9	Tamaño de puerto de entrada	¼" & ½"
10	Capacidad de aceite	44 oz
11	Dimensiones	17x11x6
12	A de cc	10.0
13	Capacidad de L/M	142

#### 4.2. Compresor – LBP R132a SIKELAN.

Compresor serie R132a, adecuado para refrigeradores grandes como: congeladores armarios de cocina, refrigeración displays de cerveza. Es apropiado para la aplicación en el sistema de refrigeración para la construcción del Liofilizador. Ver figura 35.



**Figura 35 Compresor.**

**Tabla 2**

#### Especificaciones técnicas del compresor.

No.	Modelo	ADW91T6
1	Desplazamiento (cm <sup>3</sup> )	9.1
2	Capacidad (W)	260
3	Potencia de entrada	200
4	C.O.P	1.30
5	Corriente (A)	3.30
6	Capacidad de aceite	250
7	Tipo de refrigeración	ST
8	Tipo de motor	RSIR
9	HP	3/8
10	Alimentación	110V -120 V .60 Hz.

### 4.3. Cámara de secado.

La Cámara de secado está diseñada con una placa base de acero inoxidable AISI 304. Tiene capacidad para un estante con capuchón acrílico transparente, un anillo de sellado. Posee una plataforma de bandeja hecha de acero inoxidable y plataformas para acomodar bandejas con solapa de 15 mm Ø con espacio intermedio regulable, con pulido sanitario de espejo. Ver figura 36.



**Figura 36 Cámara de secado.**

**Tabla 3**

#### Especificaciones técnicas de la cámara de secado.

No.	Modelo	ENTERPRISE II
1	Capacidad de Condensador	1,200 a 2,000 kg de hielo 24/h.
2	Bandejas	Ø 250 mm.
3	Cámara de secado	Ø 300 mm.

### 4.4. Condensador tipo radiador.

El condensador es similar a un radiador de refrigeración del motor tiene la forma de “tubos de ida y vuelta” o tipo serpentín, revestidos por una serie de aletas onduladas en bloque. La finalidad del condensador es producir el cambio de estado

del refrigerante de gas a líquido por condensación. Para el Liofilizador se utiliza un condensador de  $\frac{3}{4}$  hp. Ver figura 37.



**Figura 37 Condensador tipo radiador  $\frac{3}{4}$  hp.**

#### **4.5. Evaporador.**

Es un intercambiador de calor, similar al condensador, pero que absorbe calor en vez de disiparlo. Normalmente, el evaporador va instalado en el mismo calefactor, o bien, detrás de la guantera, e incorpora un electro ventilador para introducir el aire al habitáculo. Debido al efecto de condensación que se produce en las superficies de las aletas del evaporador, generando unas condensaciones de humedad que se convierten en gotas de agua a evacuar al exterior. Ver figura 38.



**Figura 38 Evaporador de  $\frac{1}{5}$  hp.**

#### **4.6. Válvula de expansión.**

Instalada a la entrada del refrigerante al evaporador, su finalidad es reducir la alta presión del refrigerante a un valor predeterminado del sistema. En general, el tipo de válvula más utilizada es la TERMOSTÁTICA con regulación de la sección de paso del refrigerante. Un orificio calibrado en el interior de la válvula produce una diferencia de presión y regulación del caudal o sección de paso del refrigerante, en función de la temperatura y presión de evaporación. De esta forma, en la entrada de la válvula, la refrigerante pasa en estado líquido y a la salida en estado líquido-vapor, generando en el refrigerante un efecto de rociado para favorecer su evaporación, y a su vez, garantiza la cantidad necesaria de refrigerante para evacuar el calor existente en el habitáculo. La válvula se puede



**Figura 39 Válvula de expansión.**

ver en la figura 39.

#### **4.7. Filtro.**

La finalidad del filtro decantador-deshidratador es, por una parte, limpiar las posibles impurezas sólidas que puedan existir en el interior del circuito y, por otra parte, eliminar la humedad existente en el circuito. El filtro se localiza instalado entre el condensador y la válvula de expansión.

El refrigerante entra por el filtro en estado líquido a alta presión y temperatura. Al atravesar el filtro, el refrigerante es sometido a un primer filtrado donde quedan retenidas las posibles partículas, en un segundo filtrado se absorbe la humedad existente y en un tercer filtrado se retiene cualquier partícula que haya podido

introducirse, de esta forma el refrigerante filtrado sale hacia la válvula de expansión. Por su propia constitución, el filtro puede llegar a saturarse con el tiempo, se recomienda su cambio cada 3 años de uso, aproximadamente. Filtro ver figura 40.



**Figura 40 Filtro.**

#### 4.8. Refrigerante.

El R-134a es un refrigerante HFC de cero potenciales de destrucción del ozono y con propiedades muy similares al R-12. Es utilizado como un refrigerante puro en las aplicaciones que tradicionalmente usaban R-12 y como componente en mezclas de refrigerantes diseñadas para sustituir R-502 y R-22. Ver figura 41.

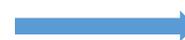


**Figura 41 Refrigerante 134a.**

**Tabla 4**

#### Información técnica – R 134a

No.	Formula	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>
1	Peso molecular	102 g/mol
2	Temperatura Ebullición a 1 b	-26.5% °C



Continúa

3	Densidad Liquido	1206 (kg/m <sup>3</sup> )
4	Presión ebullición a 25°C	6.7 bar
5	Temperatura Critica	101.2° C
6	Presión Crítica	40.6 b
7	Calor latente de vaporización a bp	205.5 kJ /kg
8	ODP	0
9	PCA (GWP)	1300
10	Punto de Inflamabilidad	No

#### 4.9. PLC SIEMENS LOGO!8.

El PLC LOGO! 8 de marca Siemens, es un nuevo módulo que se adapta prácticamente a todas las demandas de los clientes con un manejo simplificado, una nueva pantalla y opciones de comunicación completos a través de Ethernet, y la aplicación de un servidor web hace aún más sencilla su aplicación. Posee un módulo de comunicaciones que ofrece comunicación remota a través de la red telefónica celular, completando así la gama de nuevas formas de utilizar LOGO!8.



**Figura 42 PLC LOGO! 8 MARCA – SIEMENS.**

**Tabla 5****Especificaciones Técnicas del PLC LOGO! 8 Basic.**

No.	Marca	Siemens
1	Comunicación	Ethernet.
2	Alimentación	12 V, 24 V RCE
3	Módulos digitales	7
4	Módulos Análogos	3
5	Salidas digitales	20
6	Salidas Análogas	8
7	Conexiones	CPUs S7, SIMATIC HMI
8	Display	Integrado
9	Frecuencia de conmutación	10Hz
10	Corriente	0.3 <sup>a</sup>
11	Temperatura	-40° C a +70°C

**4.10. Panel Touch.**

Paneles táctiles 4 pulgadas con teclas de función y monocroma o pantalla a color. El color KTP400 Basic es el HMI - componente ideal para la pequeña y mediana sistema de controlador S7-1200 equipado con una pantalla TFT de 4,3 pulgadas que ofrece 256 colores.



**Figura 43 HMI KTP 400-SIEMENS.**

**Tabla 6**

**Especificaciones técnicas del KTP 400.**

No.	Display	4.3
1	Resolución	480x272 px
2	Elementos de control	Toque/4 teclas de función de pantalla
3	Memoria	512 KB
4	Interfaces	1x RJ 45 Ethernet para PROFINET.
5	Grado de protección	IP 65, NEMA 4x /IP 20 rear
6	Panel frontal	140 x116 mm (WxH).
7	Configuración de software	WinCC Basic (TIA Portal).

#### **4.11. RTD.**

El detector de temperatura resistivo, es un sensor basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.



**Figura 44 RTD.**

#### **4.12. Transductor de presión.**

Transmisor de presión industrial con voltaje o corriente de salida, La sonda de presión de la serie DRTR convertir los valores medidos en el partir del calibrado y la temperatura compensada señal estándar de 0-10 V o 4-20 mA. El espectro de entrega cubre una amplia gama de presiones. Aunque se logra una calibración precisa a los 7 puntos de medición, una precisión excepcional y un error muy bajo en temperatura residual. La conexión eléctrica se realiza con un enchufe industrial según DIN 43650. El modelo con señal de corriente se conecta a través de un bucle de corriente.



**Figura 45 Transmisor de presión.**

**Tabla 7****Especificaciones técnicas del transmisor de presión.**

No.	Modelo	
1	Rango de medición	0..+ 100bar,
2	Error de linealidad / Histéresis.	<±0,2% FS
3	Rango de temperatura de funcionamiento.	-20° C A + 80° C.
4	Material del sensor	Cerámica, Al2O3
5	Material de la carcasa	Aluminio.
6	Conexión de presión	1/4" Rosca hembra
7	Dimensiones	30 x 30 x 89 mm.
8	Conexiones	4 polos de conexión industrial.
9	Protección	IP65
10	Señal de salida	4 – 20 mA

**4.13. Conversor de RTD a Voltaje**

La posibilidad de obtener un sensor que me convierta la medición de resistencia en voltaje o corriente, facilita el trabajo en los acondicionamientos ya que nos permite obtener un transmisor inteligente con la posibilidad del cambio automático del sensor o del campo de medida.

**Figura 46 Convertidor de temperatura de sonda de resistencia.**

#### 4.14. Contactor.

Es un dispositivo que tiene como objetivo cortar la corriente de un receptor o instalación. Se utilizan como interruptores electromagnéticos en la conexión y desconexión de circuitos de iluminación y fuerza motriz de elevada tensión y potencia.



**Figura 47 Contactor eléctrico.**

**Tabla 8**

#### **Especificaciones Técnicas Contactor.**

No.	Modelo	MC -12b
1	Voltaje	110 V
2	Corriente	12 A
3	Contactos incorporados	1 NA – 1NC
4	Diseño	Carril DIM

## CAPÍTULO V

### 5. IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL LIOFILIZADOR.

Para el desarrollo de Liofilizador, se debe tener en cuenta el tipo de material que se va a utilizar para la construcción, puesto que el Liofilizador es un equipo que requiere un grado de Asepsia, el objetivo de liofilizar alimentos es que al deshidratar, estos conserven todos los nutrientes y vitaminas, para así garantizar un producto de calidad y apto para el consumo humano.

Para ello la construcción del Liofilizador está distribuida en dos sistemas, el mecánico y el de control.

#### 5.1. Sistema Mecánico.

El sistema mecánico está conformado por todos los equipos que son parte del sistema de liofilización; tenemos:

Subsistema de refrigeración cuya función es enfriar, para ello absorbe el aire del medio ambiente, por transferencia de calor este genera aire frío. En el subsistema tenemos los siguientes equipos, condensador, ventilador, filtro, válvula de expansión, compresor, evaporador y accesorios.

Subsistema de vacío, este extraerá la presión contenida en la cámara de secado expuesta a temperaturas bajo cero, para lograr la sublimación en la fruta. Se tiene una caja metálica de acero inoxidable, cámara de secado y cañerías, un filtro de agua.

##### 5.1.1. Construcción de la estructura metálica para el liofilizador.

Para la estructura del liofilizador se realizó el siguiente procedimiento:

**Paso 1.-** construcción de la estructura metálica se puede visualizar en la figura 48.



**Figura 48 Construcción de la estructura metálica.**

Se monta todos los equipos: el condensador, el ventilador, compresor, bomba de vacío. Ver figura 49.



**Figura 49 Montaje de los equipos.**

El diseño de la caja metálica es de acero inoxidable 304, esta tiene amplios usos en la industria en los procesos donde se trata alimentos por sus leves químicos corrosivos. Las dimensiones de la caja son: 60x43x70. Ver figura 50.



**Figura 50 Caja de acero inoxidable para el sistema de liofilización.**

La estructura metálica es el soporte para la caja de liofilización como se muestra en la figura 51.



**Figura 51 Montaje de quipos.**

### 5.1.1. Sistema de refrigeración.

El sistema de refrigeración, se implementó en una estructura rectangular de acero inoxidable, dentro de ella se coloca el evaporador y 10 vueltas del serpentín de cobre que recubrirá a la cámara de secado y así obtener una temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  se muestra en la figura 52.



**Figura 52 Sistema de refrigeración, parte superior.**

En la parte inferior de la estructura de acero inoxidable se coloca al motor el condensador, la válvula de expansión y el filtro. Todos estos equipos están interconectados formando un circuito cerrado. Como se puede ver en la figura 53.



**Figura 53 Sistema de refrigeración parte inferior.**

### 5.1.2. Sistema de vacío

El proceso de vacío entra en funcionamiento después que el sistema de refrigeración alcanza la temperatura adecuada para poder realizar el proceso de

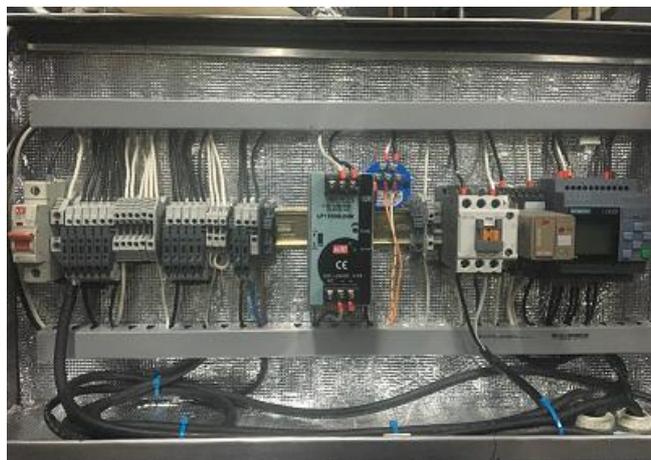
liofilización, esta es una de las condiciones a cumplir para que se encienda la bomba de vacío. En el sistema de vacío se tiene la cámara de secado donde están contenidas las frutas congeladas, la bomba de vacío y la trampa de vapor sublimado. Como se muestra en la figura 54.



**Figura 54 Sistema de vacío.**

## **5.2. Sistema de control.**

El sistema de control integra un PLC, un selector de posición on-off, switch, Pantalla Touch (HMI) una fuente de 24Vdc, 2 relés de estado sólido, un convertor RTD a voltaje (0 a 10Vdc) y un interruptor termo-magnético unipolar, borneras de paso y bornera porta fusible. El PLC, recepta las señales, las procesa de acuerdo a la programación efectuada y luego envía las señales al actuador. Ver figura 55.



**Figura 55 Sistema de control.**

### 5.3. Liofilizador.

A continuación, se identifica las partes por las que están compuesta la máquina de Liofilización. Se detalla en la figura 56.

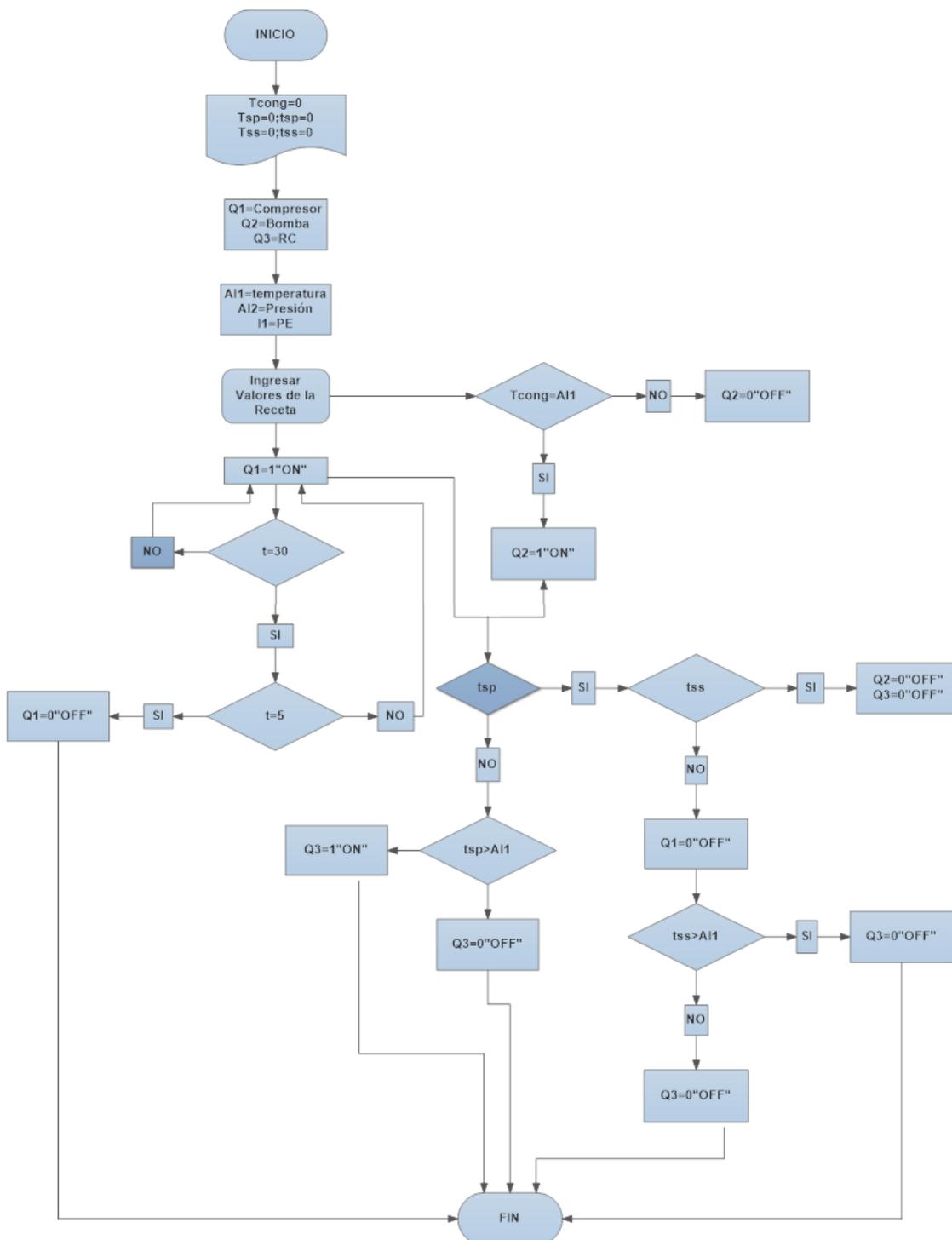


**Figura 56 Máquina Liofilizadora.**

1. Pantalla Táctil.
2. Selector ON-OFF.
3. Switch Paro de Emergencia.
4. Bomba de vacío
5. Compresor.
6. Condensador.
7. Ventilador.
8. Filtro.
9. Válvula de expansión.

**5.4.Programación.**

Para la automatización del Liofilizador se realiza el siguiente diagrama de flujo y el programa se encuentra en el Anexo N:



6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

LIOFILIZACIÓN FRUTILLA

	Temperatura °C	Tiempo min	Presión Kpa
Congelación	20	0	0
	18	4	0
	15	9	0
	13	15	0
	10	22	0
	5	29	0
	0	37	0
	-5	50	0
	-10	80	0
	-15	120	0
	-20	150	0
	-25	190	0
	-30	240	0
	-35	300	0
-40	360	0	
Secado Primario	-22	370	-70
	-20	500	-69
	-19	610	-68
	-20	720	-70
	-21	850	-68
	-20	1010	-69
	-21	1220	-68
	-19	1330	-70
Secado Secundario	-20	1560	-68
	0	1570	-69
	10	1571	-70
	20	1575	-69
	21	1576	-69
	22	1640	-68
	21	1720	-70
	19	1780	-68
	20	1820	-69
	21	1890	-70
21	1936	-69	

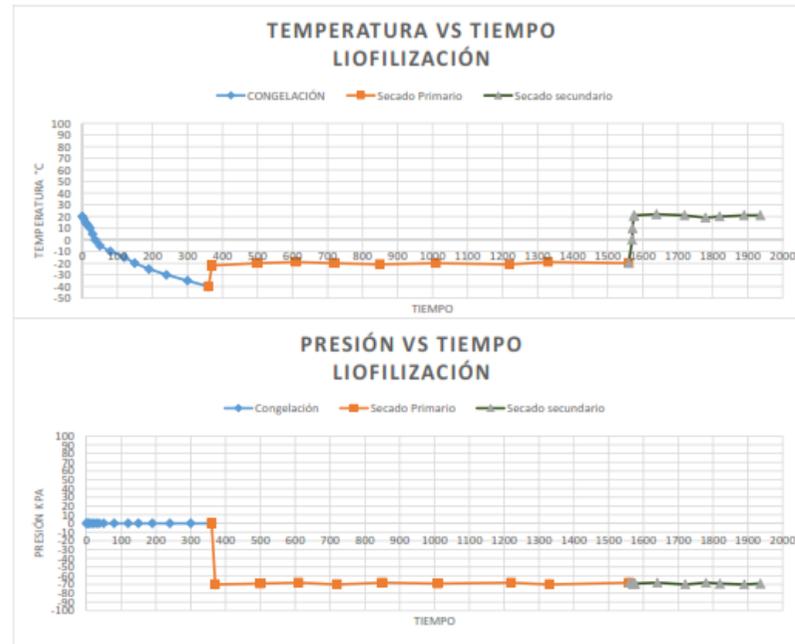


Figura 57 Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo.

### **Grafica Temperatura Vs. tiempo**

En la figura 57 tal se muestra la tabla del proceso de congelación de color azul con las variables de temperatura vs tiempo, esta se tarda 6 horas en lograr la temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  que es valor nominal de congelación de la frutilla. Las variables fueron escogidas en distintos tiempos. Alcanzando a la temperatura antes descrita comienza la fase de secado primario que en la tabla esta de color tomate, donde se enciende las resistencias calefactoras llegando en 15 minutos a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  la cual se tratará de mantener constante, realizando la sublimación del agua de la frutilla, el tiempo de secado primario es de 20 horas los cuales son ingresados en el HMI.

Terminado el proceso de secado primario se apaga el compresor (sistema de congelamiento), la temperatura asciende hasta  $20^{\circ}\text{C}$  durante 6 horas esto es el secado secundario, que en la tabla se identifica de color plomo.

### **Gráfica Presión Vs. Tiempo**

En la gráfica se muestra que en la fase de congelación la bomba de vacío se encuentra apagada hasta llegar a los  $-40^{\circ}\text{C}$ , llegando a esta temperatura se enciende y doy una presión de vacío de  $-68\text{kPa}$  a  $71\text{kPa}$  la cual se mantiene en el proceso de secado primario y secundario.

### **Datos de Deshidratación**

Se colocó 200gramos de frutilla en el equipo indicado en la figura 58, es necesario realizar cortes a la fruta no debe ser colocada entera, esta técnica mejora el resultado final del proceso.



**Figura 58 Frutilla en rodajas.**

En cada bandeja se colocó 100gramos, el proceso tarda 32horas, de acuerdo a datos usados de pruebas ya realizadas en procesos similares. El peso obtenido al final de la prueba es de 25gramos con la instrumentación usada, dándonos un valor de deshidratación aproximado al 80,12%.

El análisis realizado se tiene una deshidratación de la frutilla equivalente al 87,49%. En la figura 59 se puede observar la frutilla liofilizada.



**Figura 59 Frutilla liofilizada.**

## LIOFILIZACIÓN MASHUA

	Temperatura °C	Tiempo min	Presión Kpa
Congelación	18	0	0
	16	4	0
	14	9	0
	11	15	0
	8	22	0
	4	29	0
	0	37	0
	-5	50	0
	-10	80	0
	-15	120	0
-20	150	0	
-25	190	0	
-30	240	0	
Secado Primario	-35	260	0
	-30	370	-70
	-20	500	-69
	-15	610	-68
	-14	720	-70
	-16	850	-68
Secado Secundario	-15	1010	-69
	-14	1220	-68
	-14	1330	-70
	-16	1560	-68
	0	1570	-69
	10	1571	-70
	20	1575	-69
	21	1576	-69
	22	1640	-68
	21	1720	-70
19	1780	-68	
20	1820	-69	
21	1890	-70	
21	1936	-69	

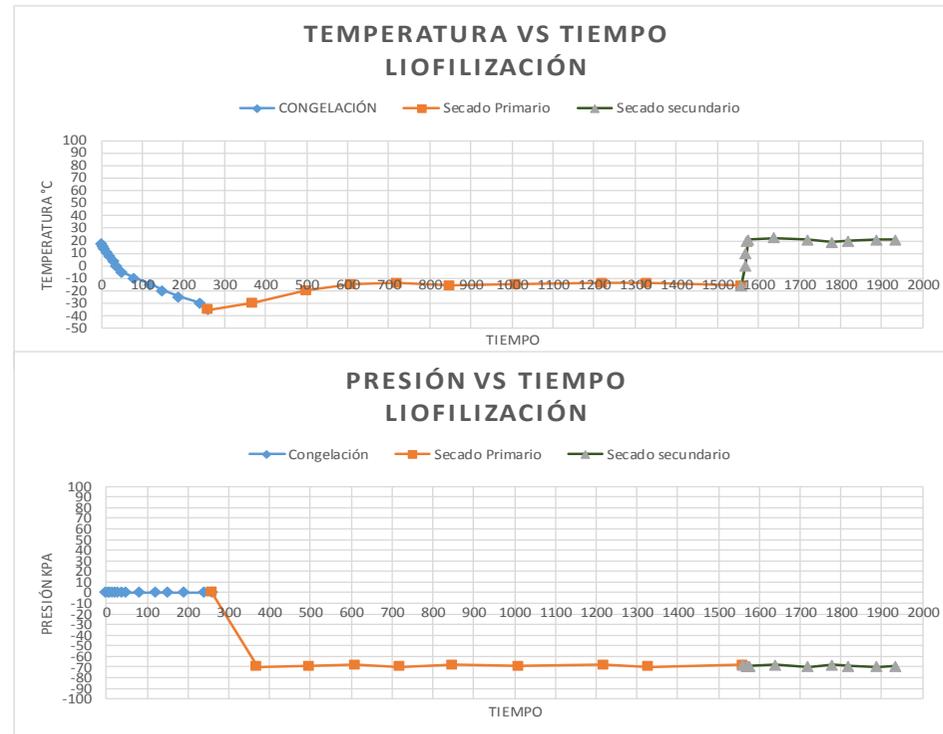


Figura 60 Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo.

### **Grafica Temperatura Vs. tiempo**

En la figura 60 tal se muestra la tabla del proceso de congelación de color azul con las variables de temperatura vs tiempo, esta se tarda 7 horas en lograr la temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$  que es valor nominal de congelación de la mashua.

Las variables fueron escogidas en distintos tiempos. Alcanzando a la temperatura antes descrita comienza la fase de secado primario que en la tabla esta de color tomate, donde se enciende las resistencias calefactoras llegando en 15 minutos a una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  la cual se tratará de mantener constante, realizando la sublimación del agua de la mashua, el tiempo de secado primario es de 10 horas los cuales son ingresados en el HMI.

Terminado el proceso de secado primario se apaga el compresor (sistema de congelamiento), la temperatura asciende hasta  $20^{\circ}\text{C}$  durante 8 horas esto es el secado secundario, que en la tabla se identifica de color plomo.

### **Gráfica Presión Vs. Tiempo**

En la gráfica se muestra que en la fase de congelación la bomba de vacío se encuentra apagada hasta llegar a los  $-35^{\circ}\text{C}$ , llegando a esta temperatura se enciende y doy una presión de vacío de  $-68\text{kPa}$  a  $72\text{kPa}$  la cual se mantiene en el proceso de secado primario y secundario.

### **Datos de Deshidratación**

Se colocó 200gramos de mashua en el equipo indicado en la figura, en cada bandeja se colocó 100gramos, el proceso tardo 25horas, no se tiene pruebas experimentales de la mashua.



**Figura 61 Mashua a trocos.**

El peso obtenido al final de la prueba es de 25gramos con la instrumentación usada. En la figura se muestra como quedo la mashua después del proceso de liofilización, visualmente se puede ver completamente seca y la estructura interna porosa.



**Figura 62 Mashua liofilizada.**

### LIOFILIZACIÓN DEL POLEN

	Temperatura °C	Tiempo min	Presión Kpa
Congelación	18	0	0
	15	9	0
	13	15	0
	9	30	0
	6	35	0
	3	45	0
	0	70	0
	-5	100	0
	-8	120	0
	-10	140	0
	-17	160	0
	-22	230	0
	-25	330	0
Secado Primario	-30	410	0
	-25	412	-40
	-15	415	-60
	-10	417	-72
	-11	500	-72
	-9	800	-72
	-10	900	-72
Secado Secundario	-10	950	-71
	-11	1000	-72
	-10	1010	-71
	0	1025	-72
	10	1028	-72
	20	1033	-71
	21	1080	-69
	22	1110	-70
	21	1150	-69
	19	1200	-68
20	1250	-69	
21	1280	-70	
21	1310	-69	

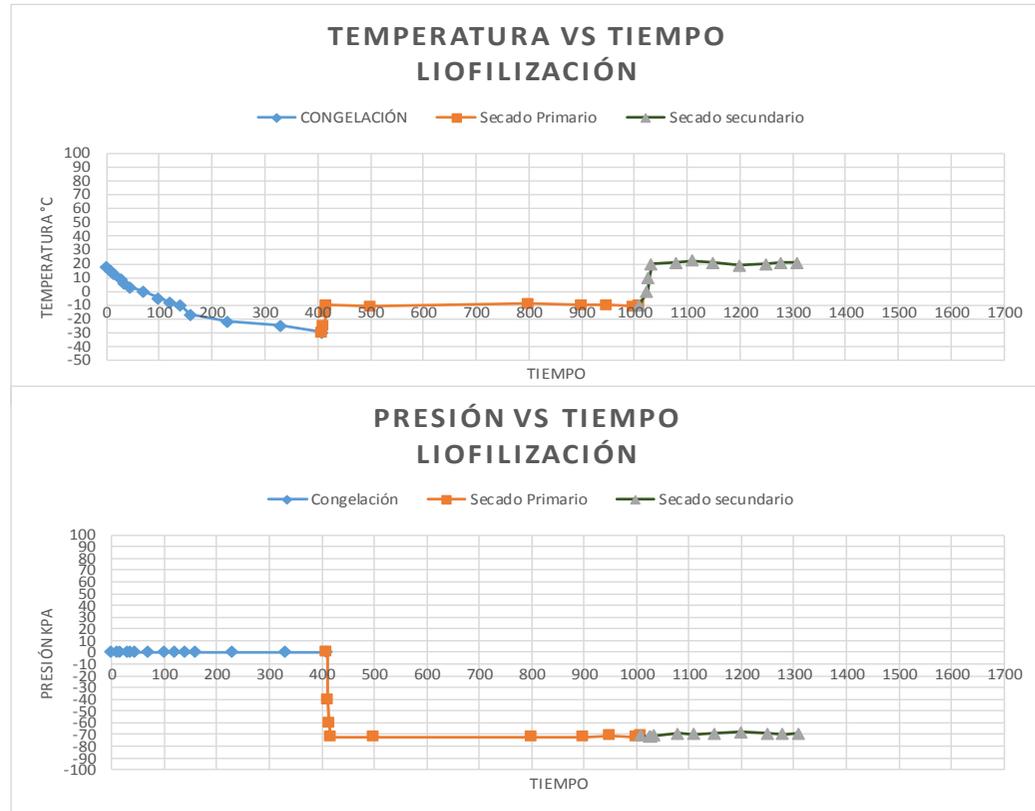


Figura 63 Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo

### **Grafica Temperatura Vs. tiempo**

En la figura 63 tal se muestra la tabla del proceso de congelación de color azul con las variables de temperatura vs tiempo, aproximadamente 7 horas se tarda en lograr la temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  que es valor nominal de congelación del polen.

Las variables fueron escogidas en distintos tiempos. Alcanzando a la temperatura antes descrita comienza la fase de secado primario que en la tabla esta de color tomate, donde se enciende las resistencias calefactoras llegando en 7 minutos a una temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  la cual se tratará de mantener constante, realizando la sublimación del agua del polen, el tiempo de secado primario es de 10 horas los cuales son ingresados en el HMI.

Terminado el proceso de secado primario se apaga el compresor (sistema de congelamiento), la temperatura asciende hasta  $20^{\circ}\text{C}$  durante 5 horas esto es el secado secundario, que en la tabla se identifica de color plomo.

### **Gráfica Presión Vs. Tiempo.**

En la figura 64 se muestra que en la fase de congelación la bomba de vacío se encuentra apagada hasta llegar a los  $-30^{\circ}\text{C}$ , llegando a esta temperatura se enciende y doy una presión de vacío de  $-68\text{kPa}$  a  $72\text{kPa}$  la cual se mantiene en el proceso de secado primario y secundario.



**Figura 64 Higo en trozos.**

### **Datos de Deshidratación**

Se colocó 200gramos de higo en el equipo indicado en la figura 65, en cada bandeja se colocó 100gramos, el proceso tardo 22horas, no se tiene pruebas experimentales del higo.



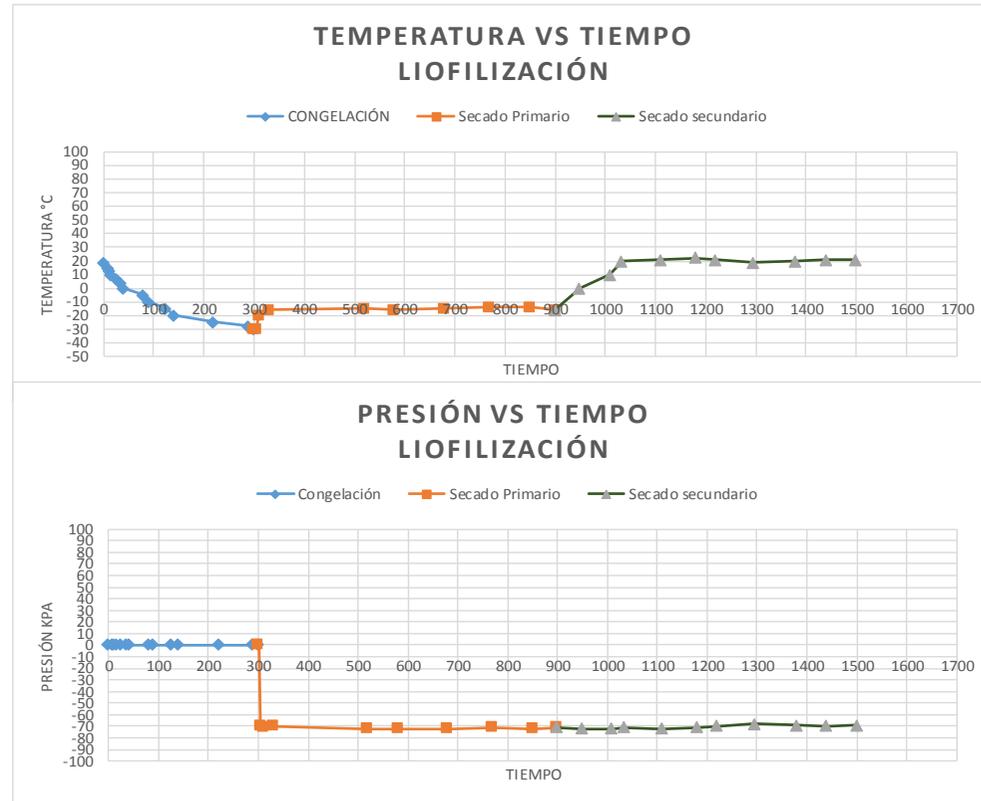
**Figura 65 Higo liofilizado.**

El peso obtenido al final de la prueba es de 50gramos con la instrumentación usada. En la figura se muestra como quedo el higo después del proceso de liofilización.

Al no tener datos experimentales se creó una curva usando la experiencia de la mashua, se puede notar en la contextura del higo aun contiene un porcentaje de agua.

### GRÁFICA DE LIOFILIZACIÓN DEL HIGO

	Temperatura °C	Tiempo min	Presión Kpa
Congelación	19	0	0
	15	8	0
	13	11	0
	10	15	0
	7	25	0
	4	35	0
	0	40	0
	-5	80	0
	-10	90	0
	-15	125	0
	-20	140	0
	-25	220	0
Secado Primario	-28	290	0
	-30	300	0
	-30	305	-70
	-20	310	-71
	-16	330	-70
	-15	520	-72
Secado Secundario	-16	580	-72
	-15	680	-72
	-14	770	-71
	-14	850	-72
	-16	900	-71
	0	950	-72
	10	1010	-72
	20	1033	-71
	21	1110	-72
	22	1180	-71
	21	1220	-70
	19	1295	-68
20	1380	-69	
21	1440	-70	
21	1500	-69	



**Figura 66 Proceso de liofilización temperatura, presión vs tiempo.**

### **Gráfica Temperatura Vs. tiempo**

En la figura 66 tal se muestra la tabla del proceso de congelación de color azul con las variables de temperatura vs tiempo, aproximadamente 5 horas se tarda en lograr la temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  que es valor nominal de congelación del higo.

Las variables fueron escogidas en distintos tiempos. Alcanzando a la temperatura antes descrita comienza la fase de secado primario que en la tabla esta de color tomate, donde se enciende las resistencias calefactoras llegando en 15 minutos a una temperatura de  $-15^{\circ}\text{C}$  la cual se tratará de mantener constante, realizando la sublimación del agua del higo, el tiempo de secado primario es de 10 horas los cuales son ingresados en el HMI.

Terminado el proceso de secado primario se apaga el compresor (sistema de congelamiento), la temperatura asciende hasta  $20^{\circ}\text{C}$  durante 6 horas esto es el secado secundario, que en la tabla se identifica de color plomo.

### **Gráfica Presión Vs. Tiempo**

En la figura 66 se muestra que en la fase de congelación la bomba de vacío se encuentra apagada hasta llegar a los  $-30^{\circ}\text{C}$ , llegando a esta temperatura se enciende y doy una presión de vacío de  $-68\text{kPa}$  a  $72\text{kPa}$  la cual se mantiene en el proceso de secado primario y secundario.

### **Datos de Deshidratación**

Se colocó 200gramos de polen en el equipo indicado en la figura 68, en cada bandeja se colocó 100gramos, el proceso tardo 21horas, no se tiene pruebas experimentales del polen.



**Figura 67 Polen.**

El peso obtenido al final de la prueba es de 50gramos con la instrumentación usada. En la figura 67 se muestra como quedo el polen después del proceso de liofilización.

Al no tener datos experimentales se creó una curva usando la experiencia de la mashua, se puede observar que el polen un color menos claro al y una estructura más sólida que cuando estaba húmedo. Se puede observar el polen liofilizado en la figura 68.



**Figura 68 Polen liofilizado.**

## 7. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó el equipo liofilizador produciendo las condiciones necesarias para realizar el efecto Liofilizador, situándose por debajo del punto triple, separando el agua del producto por sublimación.
- El proceso de liofilización es controlado por el PLC dando el automatismo del mismo, donde se controla la presión y temperatura para poder deshidratar los productos.
- La máquina fue dimensionada para deshidratar un litro de producto, por motivos experimentales en los procesos de liofilización ejecutados, se ocupa 200gr repartidos en las dos bandejas.
- La construcción del liofilizador fue realizado tomando en cuenta los cálculos y dimensiones del diseño propuesto.
- En la prueba realizada de las fresas se la realizó con datos físico-químicos de estudios previamente realizados, como resultado se obtuvo un porcentaje de 91,56% de secado, esto se debe a diferentes factores, de preparación (corte de la fruta, madurez de la fruta, etc.) y procesamiento (temperatura, presión y tiempo).
- En la liofilización de las mashuas al no tener datos de liofilización del proceso de esta, se realizó un análisis visual, donde se puede observar seca, esta perdió un 75% de su peso.
- En la liofilización de los higos al no tener datos de liofilización del proceso de esta, se realizó un análisis visual, donde se puede observar que la fruta aun contiene agua, esta perdió un 50% de su peso.
- En la liofilización del polen al no tener datos de liofilización del proceso de este, se realizó un análisis visual, donde se puede observar seco totalmente, esta perdió un 75% de su peso.

## 8. RECOMENDACIONES

- En la preparación de las frutas se debe realizar cortes uniformes y pequeños, para poder tener el enfriamiento que necesita el producto.
- Se debe realizar cambios en las variables de secado primario y secado secundario y ejecutar ensayos, para mejorar el producto deshidratado.
- Después de cada proceso de liofilización es necesario realizar el cambio de aceite en la bomba de vacío, ya que esta recolecta agua que es perjudicial para su funcionamiento.
- Se debe implementar una trampa de vapor sublimado continuo para protección de la bomba de vacío.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHRIS LANGLEY, M. C. (2009). *REFRIGERACION* . Madrid - España: COPYRIGHT.

Dahi-Shog, R. (Enero de 2012). *CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES*. Recuperado el 4 de Febrero del 2016. Obtenido de [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Programacion\\_de\\_controladores\\_logicos\\_\(PLC\).pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Programacion_de_controladores_logicos_(PLC).pdf)

Dennis R. Heldman, R. W. (1998). En *PRINCIPLES OF FOOD PROCESSING*. New York : Ruth Bloom.

Heating, A. S. (2010). Refrigerating and Air-Conditioning Engineer. *American Society of Heating*.

Heinz. (2012). *Designed by Elegant Themes*. Recuperado el 12 de enero del 2016. Obtenido de <http://www.imchef.org/que-es-la-liofilizacion/>

Inacap Valparaiso Máximo Araya Bugueño. (2009). *Sensores de presión*. Recuperado 10 de Marzo del 2016. Obtenido de <http://snsoresdepresion.blogspot.com/>

*Interfaz Gráfica Humano Máquina*. (s.f.). Recuperado el 26 de Abril del 2016. Obtenido de <http://iaci.unq.edu.ar/materias/laboratorio2/HMI%5CIntroduccion%20HMI.pdf>

Requena, A. C. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid: A. Madrid Vicente.

Sole, A. C. (2005). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: MARCOMBO.

**Anekos**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

## CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores:

**ANDRÉS PATRICIO YUPANGUI SEGOVIA Y BOLÍVAR MESÍAS SUAREZ  
ESPINOSA.**

En la ciudad de Latacunga, a los **22 días del mes de Julio del 2016.**

Ing. Washington Freire

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Aprobado por:**

Ing. Katya Torres

**DIRECTORA DE CARRERA**

Dr. Rodrigo Vaca

**SECRETARIO ACADÉMICO**