



Diseño y construcción de un prototipo de sistema de deshidratación automático de frutas y verduras mediante liofilización para conservación de sus propiedades organolépticas.

Coronel Mendoza, Erick Armando

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de Titulación, Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. López Ortega, Jessenia Estefanía

Latacunga, 26 de agosto de 2021



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN AUTOMÁTICO DE FRUTAS Y VERDURAS MEDIANTE LIOFILIZACIÓN PARA CONSERVACIÓN DE SUS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS.**” fue realizado por el señor **Coronel Mendoza, Erick Armando** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 26 de agosto de 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**JESSENIA
ESTEFANIA LOPEZ
ORTEGA**

.....
Ing. López Ortega, Jessenia Estefanía

C.C.: 1804377347

REPORTE DE VERIFICACIÓN



Document Information

Analyzed document	TesisCoronel Mendoza Erick.pdf (D111712880)
Submitted	8/26/2021 4:37:00 PM
Submitted by	Lorena Ibarra
Submitter email	loretaibarra@yahoo.es
Similarity	7%
Analysis address	lorenadibarra.uta@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://docplayer.es/65637186-Departamento-de-electrica-y-electronica.html Fetched: 11/29/2019 7:31:27 AM	2
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11934/1/T-ESPEL-EMI-0316.pdf Fetched: 12/22/2020 9:34:57 AM	1
W	URL: https://docplayer.es/36960183-Rodolfo-renato-martinez-medina-oscar-andres-prada-rodriguez.html Fetched: 1/10/2020 7:19:10 AM	12
SA	tesis-completa Liofilizador.pdf Document tesis-completa Liofilizador.pdf (D21104199)	3
W	URL: https://idoc.pub/documents/liofilizacion-termodinamica-od4pe69p56np Fetched: 1/23/2021 12:02:55 PM	2
W	URL: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_03_Liofilizados.pdf Fetched: 11/16/2020 10:36:45 PM	1
SA	Informe Proyecto Final.docx Document Informe Proyecto Final.docx (D14953741)	1

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**JESSENIA
 ESTEFANIA LOPEZ
 ORTEGA**

Ing. López Ortega, Jessenia Estefanía

C.C.: 1804377347



**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Coronel Mendoza, Erick Armando**, con cédula de ciudadanía n° 060451166-7, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN AUTOMÁTICO DE FRUTAS Y VERDURAS MEDIANTE LIOFILIZACIÓN PARA CONSERVACIÓN DE SUS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS.”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 26 de agosto de 2021

Firma

.....

Coronel Mendoza, Erick Armando

C.C.: 060451166-7



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Coronel Mendoza, Erick Armando**, con cédula de ciudadanía n° 0604511667-7, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN AUTOMÁTICO DE FRUTAS Y VERDURAS MEDIANTE LIOFILIZACIÓN PARA CONSERVACIÓN DE SUS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS."** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 26 de agosto del 2021

Firma

.....

Coronel Mendoza, Erick Armando

C.C.: 060451166-7

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mi familia especialmente a mis padres, quienes con esfuerzo, sacrificio y amor me supieron dar su apoyo incondicional para salir adelante en cada una mis metas y proyectos. A mi hermana por estar siempre pendiente en cada alegría, tristeza y necesidad, gracias a ustedes este sueño se hace realidad.

Erick Armando, Coronel Mendoza

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento eterno a mis padres por el apoyo incondicional, guiarme y educarme para ser un hombre de bien, humilde y trabajador valores que me han ayudado para cumplir cada una de mis metas, agradezco también a todas aquellas personas que me han impartido sus conocimientos durante toda mi vida estudiantil y fuera de ella también en cada uno de mis proyectos y de manera especial a los ingenieros que me han ayudado en la realización de este trabajo de titulación.

Erick Armando, Coronel Mendoza

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenido.....	8
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	13
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Generalidades.....	17
Antecedentes.....	17
Planteamiento del problema.....	18
Descripción resumida del proyecto.....	19
Justificación e importancia.....	20
Objetivos.....	21
<i>Objetivo general</i>	21
<i>Objetivos específicos</i>	21
Hipótesis.....	21
Variables de la investigación.....	21
<i>Variable dependiente</i>	21
<i>Variable independiente</i>	21
Fundamentación teórica.....	22
Fundamentos de la liofilización.....	22
<i>Descripción del proceso de liofilización</i>	22
<i>Etapas de la liofilización</i>	23
Termodinámica del proceso de liofilización.....	27
Instalaciones.....	28
<i>Instalaciones industriales</i>	28
Subsistemas del liofilizador.....	29

Cámara de trabajo.....	30
<i>Según configuraciones geométricas</i>	30
<i>Según ubicación del sistema de condensación</i>	32
Sistema de bandejas	34
<i>Sistema de calentamiento de la fruta</i>	34
Sistema de vacío.....	35
<i>Elementos de presión</i>	36
Sistema de refrigeración	37
<i>Compresor</i>	37
<i>Evaporador</i>	37
<i>Condensador</i>	38
Sistema de control.....	38
<i>Controlador</i>	39
<i>Sensores</i>	39
Propiedades organolépticas y los sentidos del ser humano.....	40
<i>El sabor y el sentido del gusto</i>	41
<i>El olor y el sentido del olfato</i>	42
<i>El color y el sentido de la vista</i>	43
Análisis sensorial	43
Tipos de pruebas sensoriales.....	44
<i>Pruebas afectivas</i>	44
<i>Pruebas analíticas</i>	44
Diseño del sistema	46
Diseño de concepto.....	46
<i>Ubicación geográfica</i>	46
<i>Dimensiones de trabajo</i>	46
<i>Material</i>	47
Especificaciones técnicas.....	48
Análisis estructural.....	49
Dimensionamiento del sistema de congelación	54
<i>Diseño térmico</i>	54
<i>Determinación de temperaturas</i>	54
<i>Cálculo de cargas del sistema</i>	56
Selección del sistema de vacío.....	67

Selección del sistema de calentamiento	69
<i>Selección de resistencias caloríficas.....</i>	<i>69</i>
Selección del sistema de control y de potencia	70
<i>Control del sistema de refrigeración.....</i>	<i>70</i>
<i>Control del sistema de calentamiento y de vacío</i>	<i>74</i>
<i>Dimensionamiento del sistema de control y diagramas.....</i>	<i>74</i>
Diagrama P&ID	80
Programación.....	80
Construcción y montaje del sistema.....	83
Estructura y cámara de Liofilización	83
Montaje del sistema de refrigeración	87
Ensamblaje del sistema de calentamiento.....	87
Acoplamiento del sistema de vacío.....	88
Montaje del circuito de control y de potencia.....	90
Ajustes y correcciones.....	90
Pruebas y resultados	92
Pruebas del sistema eléctrico y calibración de equipos.....	92
Pruebas de funcionamiento del sistema de refrigeración	92
Prueba del funcionamiento del sistema en conjunto	93
Liofilización de frutas	94
Pruebas organolépticas de las frutas y vegetales.....	96
Tabulación de resultados.....	97
<i>Prueba con remolacha.....</i>	<i>97</i>
<i>Prueba con pimiento.....</i>	<i>102</i>
<i>Prueba con uvilla.....</i>	<i>108</i>
<i>Prueba con Aguacate.....</i>	<i>113</i>
Conclusiones.....	120
Recomendaciones.....	122
Bibliografía.....	123

Índice de tablas

Tabla 1 Calores específicos y propiedades de congelación	24
Tabla 2 Especificaciones técnicas de diseño	48
Tabla 3 Propiedades del modelo.....	50
Tabla 4 Cargas y sujeciones.....	50
Tabla 5 Tensiones de Von Mises	52
Tabla 6 Desplazamientos.....	52
Tabla 7 Deformaciones unitarias.....	53
Tabla 8 Cálculo de área de las superficies internas de la cámara de liofilización	58
Tabla 9 Tabla de datos y cálculo de factor de transmisión de calor.....	59
Tabla 10 Carga a través de las superficies de la cámara	59
Tabla 11 Punto de congelación y calor latente posibles productos a liofilizar	61
Tabla 12 Datos necesarios para el cálculo de calores por producto.....	62
Tabla 13 Sumatoria de cargas del sistema	66
Tabla 14 Tabla de características de la bomba de vacío.....	68
Tabla 15 Especificaciones técnicas de la bomba de vacío.....	72
Tabla 16 Prueba de sabor remolacha	97
Tabla 17 Análisis de varianza de un factor (sabor).....	97
Tabla 18 Prueba de olor remolacha	98
Tabla 19 Análisis de varianza datos olor (remolacha)	99
Tabla 20 Prueba de color (remolacha)	100
Tabla 21 Análisis de varianza de un factor color (remolacha)	100
Tabla 22 Prueba de textura remolacha	101
Tabla 23 Análisis de varianza de un factor textura remolacha.....	101
Tabla 24 Prueba de sabor Pimiento.....	102
Tabla 25 Análisis de varianza de un factor (sabor).....	103
Tabla 26 Prueba de olor pimiento	104
Tabla 27 Análisis de varianza datos olor (pimiento)	104
Tabla 28 Prueba de color (pimiento)	105

Tabla 29 <i>Análisis de varianza de un factor color (pimiento)</i>	105
Tabla 30 <i>Prueba de textura en pimientos</i>	107
Tabla 31 <i>Análisis de varianza de un factor textura pimiento</i>	107
Tabla 32 <i>Prueba de sabor Uvilla</i>	108
Tabla 33 <i>Análisis de varianza de un factor (sabor)</i>	109
Tabla 34 <i>Prueba de olor Uvilla</i>	110
Tabla 35 <i>Análisis de varianza datos olor (Uvilla)</i>	110
Tabla 36 <i>Prueba de color (Uvilla)</i>	111
Tabla 37 <i>Análisis de varianza de un factor color (Uvilla)</i>	111
Tabla 38 <i>Prueba de textura en Uvilla</i>	112
Tabla 39 <i>Análisis de varianza de un factor textura Uvilla</i>	113
Tabla 40 <i>Prueba de sabor Aguacate</i>	114
Tabla 41 <i>Análisis de varianza de un factor (sabor)</i>	114
Tabla 42 <i>Prueba de olor Aguacate</i>	115
Tabla 43 <i>Análisis de varianza datos olor (Aguacate)</i>	115
Tabla 44 <i>Prueba de color (Aguacate)</i>	116
Tabla 45 <i>Análisis de varianza de un factor color (Aguacate)</i>	117
Tabla 46 <i>Prueba de textura en Aguacate</i>	118
Tabla 47 <i>Análisis de varianza de un factor textura Aguacate</i>	118

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diagrama presión vs temperatura del agua</i>	23
Figura 2 <i>Diagrama de estados del agua</i>	27
Figura 3 <i>Esquema general de un sistema de liofilización industrial</i>	28
Figura 4 <i>Liofilizador industrial cámara cilíndrica marca KEMOLO</i>	31
Figura 5 <i>Liofilizadores GMP para gran pequeña y mediana escala</i>	31
Figura 6 <i>Liofilizador de laboratorio Laboao</i>	32
Figura 7 <i>Sistema de liofilizador de simple cámara</i>	33
Figura 8 <i>Sistema de liofilización de doble cámara</i>	34
Figura 9 <i>Sistema de bandejas en el liofilizador</i>	34
Figura 10 <i>Bomba de vacío</i>	36
Figura 11 <i>Vacuómetro</i>	36
Figura 12 <i>Compresor de gas refrigerante Danfoss</i>	37
Figura 13 <i>Evaporador</i>	38
Figura 14 <i>Condensador</i>	38
Figura 15 <i>Microcontrolador Arduino</i>	39
Figura 16 <i>Manómetro</i>	40
Figura 17 <i>Tipos de sensores de temperatura</i>	40
Figura 18 <i>Morfología de la lengua y zonas de detección de sabores</i>	42
Figura 19 <i>Diseño CAD propuesto</i>	49
Figura 20 <i>Mallado del prototipo</i>	51
Figura 21 <i>Climograma anual de Riobamba</i>	55
Figura 22 <i>Bomba de vacío QE Quality High Efficiency</i>	68
Figura 23 <i>Controlador de refrigeración TC-900E de marca Full Gauge</i>	71
Figura 24 <i>Indicaciones y teclas de operación</i>	73
Figura 25 <i>Esquema del controlador de refrigeración</i>	73
Figura 26 <i>Placa comercial microcontrolador Arduino UNO</i>	74
Figura 27 <i>Diagrama del circuito de potencia</i>	77
Figura 28 <i>Diagrama del circuito de control</i>	78

Figura 29 <i>Placa del módulo Relay de 4 canales</i>	79
Figura 30 <i>Contactador usado para la activación del sistema de refrigeración</i>	79
Figura 31 <i>Diagrama de tuberías e instrumentación P&ID por sus siglas en ingles</i>	80
Figura 32 <i>Estructura de la cámara de refrigeración sin poliuretano</i>	84
Figura 33 <i>Fundición del poliuretano</i>	85
Figura 34 <i>Poliuretano en proceso de expansión</i>	85
Figura 35 <i>Construcción de la cámara de refrigeración</i>	85
Figura 36 <i>Construcción de la estructura del liofilizador</i>	86
Figura 37 <i>Estructura y cámara de liofilización ensambladas</i>	86
Figura 38 <i>Unidad de refrigeración</i>	87
Figura 39 <i>Resistencia calorífica</i>	88
Figura 40 <i>Bomba de vacío acoplada al sistema de liofilización</i>	88
Figura 41 <i>Válvula solenoide instalada en la cámara de liofilización</i>	89
Figura 42 <i>Manómetro y vacuómetro</i>	89
Figura 43 <i>Construcción del tablero de control</i>	90
Figura 44 <i>Manzana congelada a -35 ° C</i>	92
Figura 45 <i>Prueba de funcionamiento del sistema de refrigeración</i>	93
Figura 46 <i>Pruebas de funcionamiento de la programación</i>	94
Figura 47 <i>Curva Temperatura vs tiempo real de proceso</i>	94
Figura 48 <i>Curva Presión vs tiempo real del proceso</i>	95
Figura 49 <i>Medición del nivel de vacío en funcionamiento</i>	95
Figura 50 <i>Fruta liofilizada</i>	96
Figura 51 <i>Pimiento liofilizado</i>	106

Resumen

El presente proyecto diseñó, construyó y controló un liofilizador en base a los parámetros de temperatura de congelación, temperatura de calentamiento y presión de vacío para la conservación de las propiedades organolépticas de frutas y verduras de la región Sierra. El prototipo consta de una cámara rectangular aislada con 10 cm de poliuretano expandido y con cierre hermético que tiene una capacidad aproximada de 10 lbm de producto fresco distribuido en 3 bandejas de acero inoxidable mate 304 de 1mm con los siguientes subsistemas: congelación, calentamiento y vacío. En el subsistema de congelación se reduce la temperatura del producto desde los 15 ° C hasta -35 ° C. La etapa de calentamiento consta de una disecación primaria y secundaria, la primera se eleva la temperatura aproximadamente a -20 ° C en 15 minutos y la segunda a 51 ° C en 50 minutos, en el subsistema de vacío se genera una presión de -24 in Hg. Para el subsistema de refrigeración se utilizó un controlador full Gauge TC-900E, el resto de los subsistemas están controlados por un microcontrolador Arduino UNO. En el circuito de potencia se usó relés y contactores que activan bombas, resistencias y motores. Una vez que se ensambló y controló los subsistemas se realizó pruebas de funcionamiento garantizando el proceso de liofilización. Finalmente, se evaluó las propiedades organolépticas por pruebas sensoriales analíticas dúo-trío y estimación de magnitud, concluyendo que el color, sabor y olor no se modificaron; sin embargo, se evidenció la alteración de la textura de las frutas y verduras liofilizadas comparadas con las frescas.

Palabras clave

- **LIOFILIZACIÓN**
- **REFRIGERACIÓN**
- **AGUA - SUBLIMACIÓN**

Abstract

This project designed, built and controlled a freeze dryer based on the parameters of freezing temperature, heating temperature and vacuum pressure for the preservation of the organoleptic properties of fruits and vegetables from the Sierra region. The prototype consists of a rectangular chamber insulated with 10 cm of expanded polyurethane and hermetically sealed with an approximate capacity of 10 lbm of fresh product distributed in 3 trays of 1mm 304 stainless steel with the following subsystems: freezing, heating and vacuum. In the freezing subsystem, the product temperature is reduced from 15°C to -35°C. The heating stage consists of a primary and secondary dissection, the first one raises the temperature to approximately -20°C in 15 minutes and the second one to 51°C in 50 minutes, in the vacuum subsystem a pressure of -24 in Hg is generated. For the refrigeration subsystem a TC-900E full Gauge controller was used, the rest of the subsystems are controlled by an Arduino UNO microcontroller. The power circuit used relays and contactors that activate pumps, resistors and motors. Once the subsystems were assembled and controlled, functional tests were carried out to guarantee the freeze-drying process. Finally, the organoleptic properties were evaluated by duo-trio analytical sensory tests and magnitude estimation, concluding that the color, flavor and odor were not modified; however, it was evidenced the alteration of the texture of freeze-dried fruits and vegetables compared to fresh ones.

Key words

- **LYOPHILIZATION**
- **REFRIGERATION**
- **WATER - SUBLIMATION**

CAPÍTULO I

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

En la antigüedad los Incas descubrieron el proceso de liofilización al llevar sus alimentos como papas, ocas entre otros tubérculos hasta las cimas de las montañas y aprovechando las bajas temperaturas y baja presión atmosférica realizan el secado que en la actualidad conocemos como liofilizado.

La conservación de alimentos ha sido una de las principales actividades del hombre para garantizar su supervivencia, una de las técnicas utilizadas para la preservación de alimentos es la remoción de agua siendo considerado como procesado mínimo de alimentos, estos procesos de deshidratación están direccionados a mantener las propiedades organolépticas, como son sabor, aroma, color para que sean lo más cercanas posible a la de los alimentos frescos.

La liofilización es un proceso de secado mediante sublimación que se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos, los cuales se afectan en gran medida durante los procesos convencionales de secado. (Orrego, 2003)

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 conserva su forma y el volumen, pero con un peso reducido, logrando preservar las características nutritivas y organolépticas del mismo. Realizando el proceso de rehidratación se recuperará la textura, el aroma y el sabor original. (Bolívar Suarez, 2016)

Actualmente en el país se está utilizando la liofilización para el procesamiento de alimentos destinados a la exportación como frutas, café, cereales y harinas.

El presente proyecto busca diseñar y construir un prototipo deshidratador de frutas y verduras con capacidad de hasta 3 bandejas de 1250 cm² de área para fruta picada por medio del proceso de liofilización para la conservación de las propiedades organolépticas de frutas y verduras, el prototipo busca aumentar la capacidad y mejorar la eficiencia de otros prototipos propuestos en tesis anteriores con la perspectiva de que sea escalable y pueda ser utilizado en pequeños lotes de prueba de mercado, productos de prueba y muestras de nuevos productos.

1.2. Planteamiento del problema

La producción de frutas, vegetales y tubérculos en el país es muy variada y de calidad, pero uno de los más grandes problemas para la distribución y transporte de estos es la preservación ya que necesitan de ciertas condiciones de tratamiento, buenas prácticas de manipulación y conservación.

Debido a su rápido deterioro se dificulta el almacenamiento y reserva de algunas frutas, vegetales y demás productos de temporada para épocas del año en que no son producidas, uno de los métodos usados para resolver parcialmente este problema es la congelación, pero según (Louis, 1960) la congelación puede deteriorar algunos alimentos debido a que la formación de cristales de hielo rompe las membranas celulares. Este hecho no tiene efectos negativos en términos de inocuidad, ya que también mueren células bacterianas, sin embargo, el alimento pierde textura y cambia su sabor.

La principal causa de la descomposición de alimentos con alto contenido de humedad son los microorganismos, estos son la causa de pérdida del 20% de la producción mundial de alimentos. La mayoría de los métodos de conservación utilizados en el país no abarcan en su totalidad las exigencias de exportación requeridas, por eso dicho problema causa pérdida de tiempo y dinero. (Lobos, 1960)

Otro de los principales problemas para el uso de nuevas tecnologías de conservación como lo es la liofilización es que en el país los costos de adquisición de este tipo de máquinas son muy elevados, por motivos como estos además de la falta de

apoyo para usar tecnología de punta en los procesos agroindustriales la mayoría de los tratamientos se los hacen fuera del país

1.3. Descripción resumida del proyecto

El presente proyecto pretende buscar un prototipo deshidratador de frutas y verduras con capacidad de hasta 3 bandejas de 1250 cm² de área para fruta picada por medio del proceso de liofilización para la conservación de las propiedades organolépticas de frutas y verduras. Otros sistemas de deshidratación a base de calor y energía solar dañan las propiedades organolépticas de las frutas y verduras cambiando su sabor, olor y textura además de reducir sus nutrientes lo que se convierte en un problema para el consumidor.

El proceso de deshidratación por medio de liofilización involucra varias etapas como son:

- Congelación (y acondicionamiento en algunos casos) a bajas temperaturas
 - Secado por sublimación del hielo (o del solvente congelado) del producto congelado, generalmente a muy baja presión.
 - Almacenamiento del producto seco en condiciones controladas.
- (Orrego, 2003)

El sistema estará adaptado para que realice el proceso de liofilización por medio del control de variables como la temperatura y presión, la temperatura será controlada mediante la implementación de un sistema de refrigeración con sus componentes principales como son compresor, evaporador, condensador entre los principales el mismo que permitirá obtener temperaturas bajo cero, también se utilizarán resistencias caloríficas para las fases en las que se utilizan temperaturas superiores a los 18°C, el control de la variable presión se lo realizará mediante la implementación de una bomba de vacío seguida de una trampa de vapor sublimado para recolección del agua extraída de los alimentos que estarán en la cámara de secado. La automatización de este proceso se realizará mediante la utilización de un controlador lógico programable tipo Logo al cual se le realizará la programación para el control de las variables en cada una de las etapas del proceso.

Luego se procederá a realizar pruebas del funcionamiento y la eficiencia del sistema de deshidratación con diferentes tipos de frutas, vegetales y tubérculos,

realizándose pruebas fisicoquímicas para comparar sus características organolépticas en estado de hidratación normal y posteriores al proceso verificando así la conservación de sus nutrientes y propiedades.

1.4. Justificación e importancia

La liofilización utiliza la sublimación en su proceso para la conservación y reducción de pérdidas de componentes volátiles o termosensibles. Es de los procesos de deshidratación y conservación uno de los más nobles porque une los dos mejores métodos de conservación los cuales son la congelación y la deshidratación. La liofilización no utiliza conservantes o productos químicos además de que es uno de los procesos que permiten la rehidratación por lo cual es el proceso más adecuado para conservar frutas, vegetales, carnes, peces y alimentos en general.

Mediante el presente proyecto se pretende buscar un prototipo deshidratador de frutas y verduras con capacidad de hasta 3 bandejas de 1250 cm² de área para fruta picada y que pueda ser escalable, que pueda obtener resultados de deshidratación por medio del proceso de liofilización con buena calidad y bajos costos en comparación de lo que ofrecen las industrias que manejan la distribución de liofilizadores en el mercado nacional e internacional.

Se pretende obtener un prototipo que pueda ser introducido al mercado nacional al alcance de pequeños productores para que puedan darles un valor agregado a sus cosechas y que genere una mejoría a la economía familiar y local.

Se busca dar una solución innovadora a la necesidad actual de preservar y almacenar alimentos sin perder sus valores nutritivos ni sus propiedades organolépticas, que son necesarios en épocas de escasez o de crisis como la que está atravesando el mundo debido a una pandemia.

El sistema de deshidratación propuesto ofrece varias ventajas en comparación con otros métodos como es el fácil transporte y almacenaje, la ausencia de cadenas de frío en vehículos, bodega, etc. disminuyen considerablemente sus costos además de la inhibición de la proliferación de microorganismos y la recuperación de propiedades al ser rehidratadas.

1.5. Objetivos

1.5.1. *Objetivo general*

Diseñar y construir un sistema de deshidratación avanzado de frutas y verduras mediante liofilización para conservación de sus propiedades organolépticas.

1.5.2. *Objetivos específicos*

- Realizar una investigación y dimensionamiento de requerimientos termodinámicos del sistema de deshidratación para el correcto funcionamiento del sistema de liofilización de frutas y verduras.
- Dimensionar el sistema eléctrico y de control de las variables de temperatura, presión y tiempo para que el sistema cumpla con la curva de temperatura de congelamiento sublimación y calentamiento para su correcta deshidratación.
- Diseñar el sistema mecánico del deshidratador compuesto por la estructura, cámara de vacío y deshidratación que almacena la fruta o verdura para obtener condiciones idóneas en el proceso de sublimación.
- Ensamblar el sistema mecánico, eléctrico y de control previamente diseñados.
- Realizar pruebas de funcionamiento del liofilizador.

1.6. Hipótesis

¿El sistema de deshidratación avanzado de frutas y verduras mediante proceso de liofilización, permite la conservación de sus propiedades organolépticas?

1.7. Variables de la investigación

1.7.1. *Variable dependiente*

Sistema de deshidratación por liofilización

1.7.2. *Variable independiente*

Conservación de propiedades organolépticas

CAPÍTULO II

2. Fundamentación teórica

2.1. Fundamentos de la liofilización

Desde hace cientos de años se buscaba remover el agua de los alimentos en búsqueda de su preservación, la diferente combinación de técnicas de deshidratación son el camino para el procesamiento mínimo de alimentos, estas técnicas se utilizan en tecnologías que buscan la preservación de alimentos en las que se conserven las características como el sabor y el color tratando de no afectar en su composición. Los alimentos deshidratados son útiles cuando la posibilidad de conseguir alimentos frescos es limitada o nula, la deshidratación por métodos tradicionales como la aplicación de calor que no supere niveles de cocción generan efectos irreversibles en el color y sabor de los alimentos mientras que los productos liofilizados pueden llegar a rehidratar rápidamente y pueden alcanzar niveles de humedad y propiedades organolépticas similares a las del alimento original. (Grajales-Agudelo, Cardona-Perdomo, & Orrego-Álzate, 2005)

La liofilización es un proceso de secado que se ha desarrollado mediante sublimación que se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos, los cuales se afectan en gran medida durante los procesos convencionales de secado (Orrego-Álzate, 2003)

Este método llamado en inglés frese - ring es el proceso por el cual el agua es eliminada de un producto congelado pasando directamente del estado sólido (hielo) al estado de vapor. Estas transformaciones entre el estado sólido y el vapor reciben el nombre de sublimación, y son producidas a bajas temperaturas y presiones. (- PRODAO-)

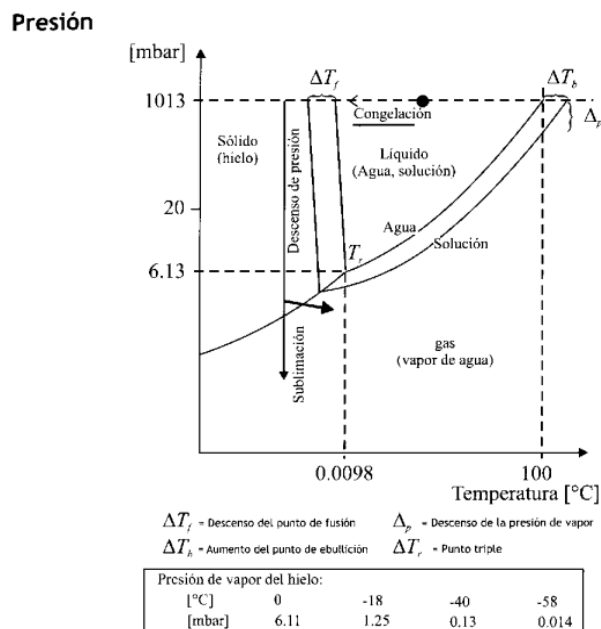
2.1.1. Descripción del proceso de liofilización

El proceso de liofilización involucra el congelamiento del alimento a temperaturas en las cuales toda el agua contenida llegue a congelarse luego por medio de vacío y agregándole temperatura al alimento empieza a sublimarse de manera que llegará a por lo menos el 20 % de su contenido inicial de humedad para que finalmente

elevando la temperatura y manteniendo el nivel de vacío retirar el agua sobrante en el todo el alimento.

Figura 1

Diagrama presión vs temperatura del agua.



Nota: Imagen en la que se aprecia los estados del agua y los pasos para la sublimación del hielo. Tomado de (Orrego-Alzate, 2003)

El proceso de liofilización permite que el material constituido por agua alojado en el exterior y en el interior del alimento en una etapa inicial se convierta totalmente en hielo y a medida que el proceso avanza el hielo empieza a sublimar primero desde el exterior del alimento y posteriormente hasta el núcleo lo que va formando un alimento de material poroso. (García, 2018)

2.1.2. Etapas de la liofilización

El proceso de liofilización involucra tres etapas importantes:

- Congelación del alimento a bajas temperaturas
- Sublimación del hielo o desecación primaria
- Remoción límite de agua o desecación secundaria

Si el proceso de liofilización se lleva a cabo correctamente el alimento se podrá almacenar por periodos muy largos por lo cual algunos autores toman en cuenta como el almacenamiento como una etapa más del proceso.

- **Congelación del alimento a bajas temperaturas**

El alimento deberá congelarse de tal forma que en los procesos de la liofilización no sufra alteraciones en sus propiedades como el color o sabor, se debe conocer:

- Temperatura del alimento a la que ocurre su máxima solidificación
- Velocidad óptima de congelamiento

Con una buena congelación se busca que el alimento tenga una estructura en la cual no exista líquido intersticial para que en la fase de sublimación se retire la mayor cantidad de líquido. En los alimentos se pueden obtener distintas mezclas de estructuras luego de la congelación como son cristales de hielo, eutécticos, zonas vítreas amorfas las cuales son propiciadas por la presencia de azúcares, alcoholes etc. (Orrego-Alzate, 2003)

Los valores de temperatura y de constantes utilizadas para cálculos de varios de los posibles alimentos que se suelen liofilizar se pueden obtener de autores como los siguientes:

Tabla 1

Calores específicos y propiedades de congelación

Alimento	% agua	Punto de congelación	calor específico		Calor latente de fusión
			Arriba del punto de congelación	Abajo del punto de congelación	
zanahoria	88	-1,4	3,79	1,95	2,94
apio	94	-0,5	3,99	2,02	314
pepinos	96	-0,5	4,06	2,05	321
cebolla fresca	89	-0,9	3,82	1,96	297

Alimento	% agua	Punto de congelación	calor específico		Calor latente de fusión
			Arriba del punto de congelación	Abajo del punto de congelación	
pimiento	92	-0,7	3,92	2	307
manzana	84	-1,1	3,65	1,9	281
mora	82	-1,6	3,59	1,87	274
plátano	75	-0,8	3,35	1,78	251
cereza	80	-1,8	3,52	1,85	267
durazno	89	-0,9	3,82	1,96	297
peras	83	-1,6	3,62	1,89	297
pina	85	-1	3,69	1,91	284
fresa	90	-0,8	3,86	1,97	301
pollo	74	-2,8	3,32	1,77	247
Salmón	64	-2,2	2,98	1,65	214
queso suizo	39	-10	2,15	1,33	130

*Nota:*Tabla de calores específicos y puntos de congelación de varios alimentos que se podrían liofilizar. Tomado de (A.cengel & Ghajar, 2011)

- **Sublimación del hielo o desecación primaria**

En la desecación primaria el hielo se retira de la muestra mediante sublimación pasando de la fase sólida (hielo) a la fase gaseosa. Mientras se disponga de un sistema que constantemente retire este vapor, el proceso de secado por sublimación continuará hasta que se agote el hielo presente. La fuerza impulsora que mantiene la sublimación es el gradiente de presión de vapor entre la superficie congelada del producto y el condensador. (Orrego, 2008)

El proceso como tal puede ocurrir o no a bajas presiones, pero en tales condiciones es mucho más eficiente el proceso difusivo. El paso de hielo a vapor requiere de gran cantidad de energía que suministrada en alto vacío pues la interfase

de secado se mueve hacia el interior del alimento y el calor tiene que atravesar capas congeladas (sistemas liofilizados en bandeja, sin granular) o secas (en gránulos), generando un considerable riesgo de fusión del material intersticial o quemar la superficie del producto ya que este seco. (Orrego-Alzate, 2003)

Es la etapa en la que se libera la mayor cantidad de agua del proceso, si la presión se mantiene por debajo de 610 Pa o 0.006 atm y el agua dentro del alimento está congelada al aplicar calor el hielo se sublima convirtiéndose en vapor sin pasar por el estado líquido debido a la baja presión en la cámara. La fuerza que impulsa la sublimación es la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en la interfase del hielo y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado. La energía que se requiere para la sublimación es suministrada por radiación o conducción a través del producto congelado.

Luego de esta fase el contenido de agua en el alimento deberá sublimarse hasta alcanzar un 15 % aproximadamente sobre su peso húmedo.

Se deberán controlar los parámetros de presión, temperatura y tiempo de forma conjunta ya que están íntimamente relacionados, no se podrá modificar uno de ellos sin que algún otro se vea afectado. (Molina & Rodriguez, 2008)

- **Remoción límite de agua o desecación secundaria**

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

Manteniendo la presión en el liofilizador por debajo de la presión de vapor en la superficie del hielo (mediante una bomba de vacío) y condensando el vapor mediante un condensador de serpentín (a baja temperatura) se consigue que la liofilización prosiga y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento y el calor latente para la sublimación se conduce hasta allí por conducción. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo.

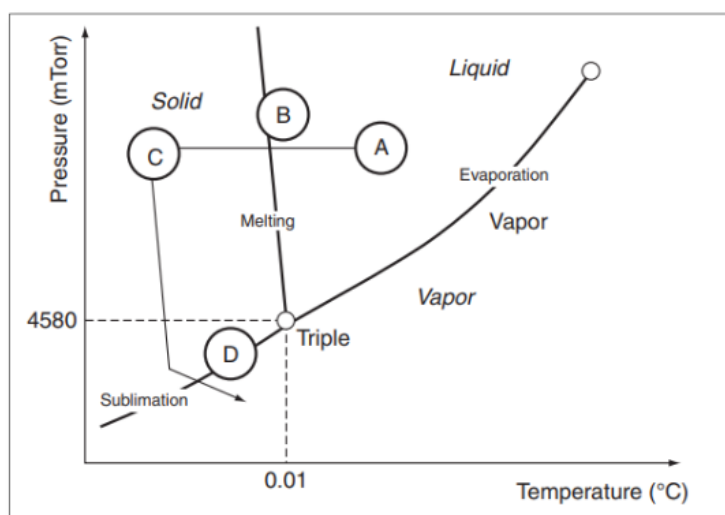
En esta etapa del proceso en la que se evapora el hielo restante se busca llegar a reducir el contenido de agua hasta un 2 % (sobre su peso húmedo). (Molina & Rodriguez, 2008)

2.2. Termodinámica del proceso de liofilización

Cada fruta o verdura debe congelarse a tal forma que no sufra mayor alteración en el proceso de sublimación, se debe conocer la temperatura en la que ocurre la máxima solidificación, la velocidad óptima de enfriamiento y la temperatura mínima de fusión incipiente. Se busca que el alimento tenga una estructura sin intersticios en los que se concentre líquido para que la mayoría del secado ocurra por sublimación. (Molina & Rodriguez, 2008)

Figura 2

Diagrama de estados del agua



Nota: Se muestra el diagrama de estados del agua y los pasos para la sublimación. Tomado de García, C. R. (2018).

Las fases del proceso tendrán que seguir con la gráfica propuesta en base al diagrama de estados del agua como en la figura, estando en el punto A con temperatura ambiente y presión atmosférica se busca llegar al punto C el cual indica la misma presión atmosférica pero ya con una temperatura bajo 0 C es decir con el alimento

congelado, el punto B representa el paso de líquido a sólido, una vez congelado el alimento iremos del punto C a la sublimación pasando por el punto D, esto se logra disminuyendo la presión por debajo del punto triple del agua es decir una presión menor a 610 Pa O 4580 mTorr, una vez en este punto se deberá mantener el vacío generado y tendremos que elevar la temperatura del alimento aportando la energía necesaria para que se sublime la mayor cantidad de agua.

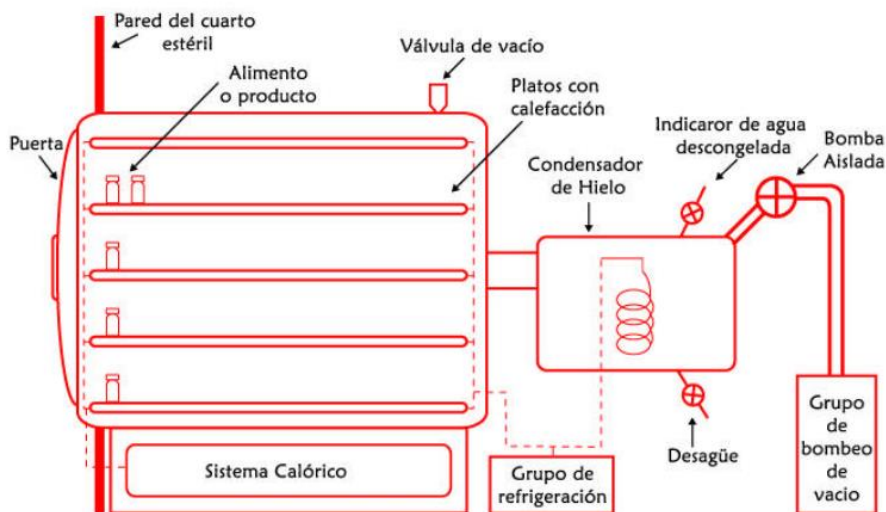
2.3. Instalaciones

Los liofilizadores están compuestos por una cámara en la que se genera el vacío, en la que se insertan bandejas que contienen el alimento que se desea liofilizar y en el espacio intermedio entre bandejas se ubican bandejas calefactoras las cuales aportarán el calor necesario para la sublimación.

Para la condensación del vapor extraído de los alimentos se utiliza generalmente una trampa de vapor que son serpentines refrigerantes dotados de un sistema automático de descongelación con objeto de mantenerlos libre de hielo

Figura 3

Esquema general de un sistema de liofilización industrial



Nota: Se muestra el esquema general de los componentes de un liofilizador compuesto por la cámara de trabajo, sistema de bandejas, sistema calorífico, grupo de refrigeración y grupo de bombeo de vacío. Tomado de García, C. R. (2018)

2.3.1. Instalaciones industriales

Existen instalaciones de liofilización de forma continua y discontinua, en los procesos de forma continua el proceso se lleva a cabo de forma secuencial y diferenciada de forma que el proceso se puede alimentar de productos continuamente, de manera opuesta en el proceso de liofilización de forma discontinua se ingresa el producto a liofilizar una sola vez al iniciar el proceso y se retira cuando el proceso haya terminado.

Recientes avances en la práctica industrial se enfocan en métodos continuos de secado ya que son menos laboriosos y costosos que los procesos discontinuos. Existen dos tipos de procesos continuos el primero donde el producto se coloca en bandejas que se mueven a lo largo del deshidratador de forma continua, y dinámicos o secadores sin bandejas, donde el producto se mueve a través de bandas o cintas, placas circulantes, placas vibratorias, lecho fluidizado y pulverizado.

La mayoría de las instalaciones industriales tienen una cámara de congelación separada de la del secado, para acelerar la etapa inicial. La congelación se realiza mediante bandas utilizando el enfriamiento de contacto en bandejas usando enfriamiento convectivo por circulación de aire frío. Entonces el producto pre congelado se carga al secadero y se procesa. (Molina & Rodriguez, 2008)

2.4. Subsistemas del liofilizador

La mayoría de los equipos convencionales de liofilización se caracterizan por una construcción compacta formada por varios sistemas con diversas funciones para que el proceso de liofilización se lleve a cabo los cuales son:

- Cámara de trabajo
- Sistema de bandejas
- Sistema de calentamiento
- Sistema de vacío
- Sistema de refrigeración
- Sistema de control

2.5. Cámara de trabajo

Es aquí donde se lleva a cabo el enfriamiento y el vaciado del producto a liofilizar, dentro encontramos el sistema de bandejas, el sistema de calentamiento y donde se debe generar el vacío.

Estas cámaras de trabajo se clasifican según su configuración geométrica y según la ubicación del sistema de condensación:

Según su configuración geométrica:

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

Según la ubicación de su sistema de condensación:

- Sistema de simple cámara
- Sistema de doble cámara

2.5.1. *Según configuraciones geométricas*

- **Sistema de cámara redonda**

Este tipo de cámaras es el más utilizado a nivel industrial por su sellado hermético, su fabricación es mucho más costosa en comparación con el diseño rectangular, es diseñado generalmente de forma horizontal y en liofilizadores piloto o de laboratorio de forma horizontal. (Molina & Rodriguez, 2008)

Figura 4

Liofilizador industrial cámara cilíndrica marca KEMOLO



Nota: Imagen referencial de un liofilizador comercial de tamaño industrial de cabina cilíndrica. Imagen tomada de la página de www.kemolo.com

- **Sistema de cámara rectangular**

Este tipo de cámaras son menos utilizadas en liofilizadores industriales, pero son mayormente usadas en liofilizadores pilotos por la facilidad del diseño y fabricación menos costosa.

Figura 5

Liofilizadores GMP para gran pequeña y mediana escala



Nota: imagen referencial de liofilizadores pilotos comerciales. Imagen tomada de www.coolvacuum.com

- **Sistema de cámara especial para laboratorio**

Como su nombre lo indica este tipo de cámaras son usadas en laboratorios por lo que son construidas en acrílico con la finalidad de que se pueda apreciar el proceso de sublimación, contienen recipientes o frascos para el secado de productos líquidos o congelados en bandejas.

Figura 6

Liofilizador de laboratorio Laboao



Nota: Imagen de un liofilizador de laboratorio comercial. Imagen tomada de es.laboao.com

2.5.2. Según ubicación del sistema de condensación

- **Sistema de simple cámara**

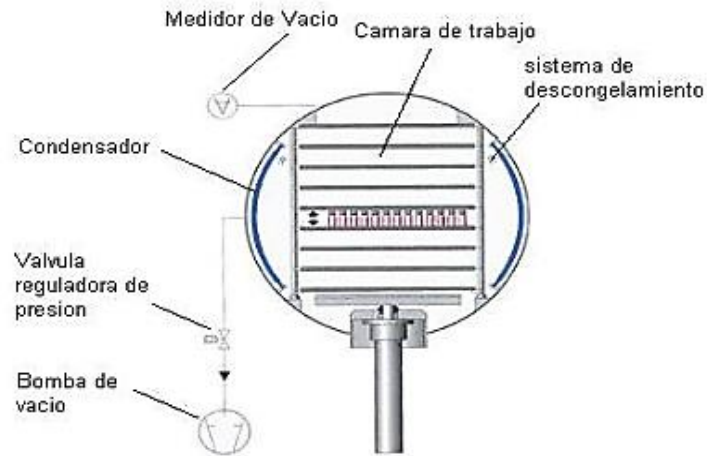
En el sistema de cámara simple el condensador se encuentra en las paredes de la cámara de trabajo, haciendo el liofilizador un poco más compacto, tiene un sistema de descongelamiento por agua caliente para derretir la capa de hielo que se forma en las paredes del condensador finalizado el proceso de secado del producto, el vapor extraído por el vacío es llevado hacia las paredes de la cámara ya que el ducto de vacío está conectado al lado del condensador.

El sistema de simple cámara tiene alta capacidad de secado y bajo costo energético, puede ser utilizado tanto en liofilizadores grandes como pequeños.

El tiempo de liofilización es más corto debido a que el condensador rodea la cámara de vaciado. (Molina & Rodriguez, 2008)

Figura 7

Sistema de liofilizador de simple cámara



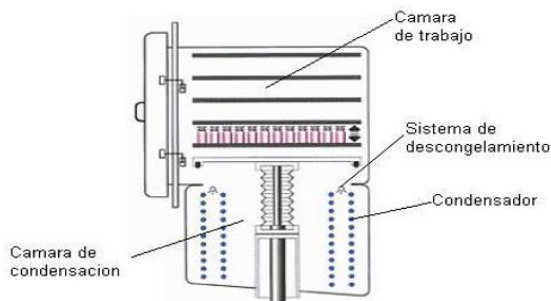
Nota: Figura que representa el esquema de un sistema liofilizador de simple cámara. Imagen tomada de [www. Freezedriers.com](http://www.Freezedriers.com)

- **Sistema de doble cámara**

En este sistema la cámara de condensación está separada de la cámara de secado haciendo más grande el liofilizador y por lo general se encuentra debajo de esta, pero debe tener una sección grande de comunicación entre estas para evitar grandes diferencias de presión, este sistema es mucho más eficiente y económico; en la parte de debajo de la cámara de condensado tiene un ducto de descarga de condensado o drenaje y en la parte superior tiene un sistema de descongelamiento y la cámara de condensado puede ser supervisada. (Molina & Rodriguez, 2008)

Figura 8

Sistema de liofilización de doble cámara



Nota: Figura que representa el esquema de un sistema liofilizador de doble cámara. Tomado de [www. Freezedriers.com](http://www.Freezedriers.com)

2.6. Sistema de bandejas

El sistema de bandejas contiene el alimento que van a ser sometidos al proceso de liofilización y son ubicadas dentro de la cámara de secado, en los equipos liofilizadores continuos la entrada y salida de las bandejas se efectúan a través de compuestas de seguridad. Las bandejas circulan, colocadas entre placas calefactoras sobre unas guías en la cámara de trabajo. (Molina & Rodriguez, 2008)

Figura 9

Sistema de bandejas en el liofilizador



Nota: Imagen que muestra el sistema de bandejas utilizado en liofilizadores industriales. Tomado de vikumer.com

2.6.1. Sistema de calentamiento de la fruta

El alimento que está siendo liofilizado necesita energía que es suministrada en forma de calor en la deshidratación primaria para que se lleve a cabo la sublimación,

existen diferentes tipos de sistemas de calentamiento como son resistencias caloríficas, bandejas calefactoras y actualmente se están desarrollando calentamiento por microondas.

- **Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas**

En este sistema el alimento es calentado mediante resistencias eléctricas por radiación , en estas instalaciones el alimento distribuido en bandejas en capas de poco grosor se calienta, este sistema brinda un calentamiento más uniforme que otros métodos que utilizan conducción ya que las irregularidades de la superficie del alimento influyen aquí menos sobre la velocidad de transferencia calórica, además no se produce una caída de presión en la masa del alimento por lo que las condiciones de liofilización se mantienen constantes. Por otra parte, no es preciso que exista un contacto íntimo entre el alimento y la superficie calefactora, por lo que pueden utilizarse bandejas planas que son baratas y de fácil limpieza. (Molina & Rodriguez, 2008)

2.7. Sistema de vacío

El sistema de vacío es el encargado primero de generar las condiciones de presión necesarias para que se lleve a cabo el cambio de fase de líquido a gas y como otra actividad busca extraer el vapor contenido en el producto a liofilizar, el sistema integra una bomba de vacío en algunos de los casos de dos etapas y en liofilizadores pilotos suelen utilizarse bombas de vacío de una sola etapa.

Figura 10

Bomba de vacío



Nota: Imagen referencial de una bomba de vacío comercial. Tomado de blogquimobasicos.com

La bomba de vacío se activa al llegar a una temperatura de cámara de trabajo seteada como puede ser $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la presión que se debe alcanzar debe ser inferior a 610 Pa o menor a la presión del punto triple del agua.

2.7.1. Elementos de presión

Los elementos de presión que se utilizan en liofilizadores pilotos suelen ser medidores de vacío o vacuómetros los cuales existen tanto análogos o de reloj como en la figura 11. O digitales o transductores de presión, pero estos últimos representan costos elevados y mayor dificultad de manipulación y control

Figura 11

Vacuómetro



Nota: Imagen referencial de un medidor de vacío o vacuómetro análogo. Tomado de directindustry.es

2.8. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración es un sistema convencional el cual está integrado por el compresor, condensador, evaporador y válvula de estrangulamiento.

En los liofilizadores industriales utilizan sistemas de refrigeración de dos etapas para lograr las temperaturas deseadas en cámaras de gran tamaño por lo que usan componentes que aseguren un proceso de mayor precisión, capacidad e higiene.

El sistema de refrigeración de un liofilizador piloto debe ser capaz de llevar el producto a liofilizar hasta una temperatura de aproximadamente -35 a -40 ° C y mantener esa temperatura en la cámara mientras dura la extracción del vapor por medio de la bomba de vacío. (Molina & Rodriguez, 2008)

2.8.1. Compresor

Es el encargado como su nombre lo indica de comprimir el gas refrigerante para que circule por todo el sistema pasando por el condensador, válvula y evaporador.

Figura 12

Compresor de gas refrigerante Danfoss



Nota: Imagen de un compresor comercial usado para un sistema de refrigeración común. Tomado de danfoss.com

2.8.2. Evaporador

Utilizado para la etapa de extracción del calor del interior de la cámara como su nombre lo indica su función es evaporar el líquido refrigerante y al mismo tiempo absorber el calor para llevarlo fuera del sistema.

Figura 13

Evaporador



Nota: Imagen en que se aprecia un evaporador de refrigerante conjuntamente con un filtro. Tomado de alan-refrigeración.blogspot.com

2.8.3. Condensador

Está ubicado en el exterior del cámara justo después del compresor su función es obvia y consta de condensar el gas refrigerante que extrae el calor en el evaporador y luego fue sometido a presiones en el compresor, es aquí donde expulsa el calor de la cámara de secado en el exterior.

Figura 14

Condensador



Nota: Imagen de un condensador de gas refrigerante de una unidad de 3/8 Hp enfriado por aire. Fuente propia

2.9. Sistema de control

En cualquier sistema lo más importante para un funcionamiento eficiente es tener un control preciso y obtener resultados que se puedan documentar y replicar. Sin un control adecuado de actuadores y medición de sensores preciso se puede echar a perder el producto a liofilizar representando pérdidas de un valor elevado, por estos motivos es necesario utilizar diferentes elementos de control tales como controladores

lógicos programables (PLC) por sus siglas en inglés, algunos sistemas industriales disponen también de interfaz Humano – Máquina HMI para el ingreso de set points o la elección de recetas, sin embargo no hay que olvidar que esto eleva los costos para liofilizadores piloto.

2.9.1. Controlador

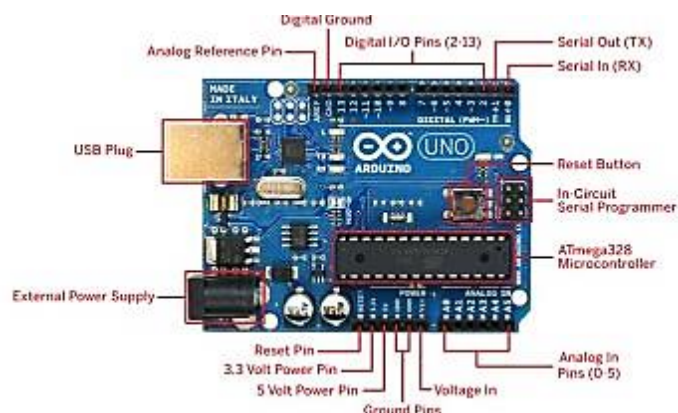
La instrumentación asociada con los liofilizadores es de gran importancia. El logro de un óptimo producto requiere un sistema de control que reproduzca el proceso de liofilización, siempre que esté dentro de los límites del equipamiento y de un sistema de recolección de datos que verifique la consistencia del proceso. (Ramirez-Navas, 2006)

- **Microcontroladores Arduino**

El microcontrolador usa entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos.

Figura 15

Microcontrolador Arduino



Nota: Imagen que muestra las partes de un microcontrolador Arduino UNO. Tomado de aprendiendoarduino.wordpress.com

2.9.2. Sensores

Todo controlador necesita de datos precisos de las variables que controla por lo que se utilizan sensores o medidores, existen diferentes formas de transformar la información que suministra el elemento primario en una señal digital que pueda ser interpretada por un controlador. (Suarez & Yupangui, 2016).

Figura 16

Manómetro



Nota: Imagen referencial de un manómetro industrial análogo. Tomado de jinsa.com.mx

Figura 17

Tipos de sensores de temperatura



Nota: Imagen de los diferentes tipos de sensores de temperatura industriales. Tomado de www.srcsl.com

2.10. Propiedades organolépticas y los sentidos del ser humano

Los sentidos que un ser humano posee son el olfato, vista, gusto y tacto, entre los más importantes, son diversos los criterios reportados en la literatura con relación al peso e importancia de cada una de las propiedades sensoriales en la calidad y aceptación de un producto alimenticio, en este enfoque tenemos que destacar que la evaluación sensorial está dada por la integración de los valores particulares de cada uno de los atributos sensoriales de cada uno de los alimentos, por lo tanto no debe absolutizar que una propiedad en particular es la que define la calidad de un producto dado, sino que existe una interrelación entre ellas que no permite menospreciar a ninguno de estos sentidos. (Espinosa, 2007)

2.10.1. El sabor y el sentido del gusto

El sabor se percibe mediante el sentido del gusto, su función es identificar las diferentes sustancias químicas que se encuentran en los alimentos, el gusto nos permite percibir las diferentes sustancias químicas conocidas como sabores.

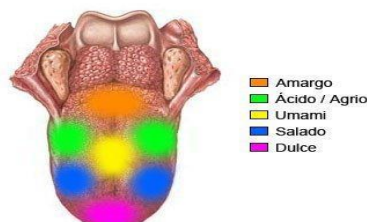
El gusto se define como las sensaciones percibidas por los receptores de la boca específicamente concentrados en la lengua, velo del paladar, mucosa de la epiglotis, faringe, laringe y garganta.

A partir de estudios fisiológicos se piensa que existen cuatro sensaciones sápidas primarias como son dulce, salado, ácido y amargo; siendo, estos los cuatro sabores básicos, el sabor dulce se percibe con mayor intensidad en la punta de la lengua, zona donde se encuentran las células receptoras que detectan la glucosa, glicoles, aldehídos, cetonas, etc. Sustancias de naturaleza orgánica que están presentes en los alimentos; el sabor salado o ácido se percibe en los bordes anteriores y posteriores respectivamente, donde los receptores son estimulados por sales ionizadas o por los hidrogeniones de las sustancias ácidas, el sabor amargo se detecta fundamentalmente en la parte posterior o base de la lengua donde se encuentran los receptores de las sustancias orgánicas de cadena larga que contienen nitrógeno en su molécula y alcaloides como la quinina.

Se ha demostrado que existen diversos factores que inciden en la detección de sabores, entre los que se encuentran la edad debido a la asociación con los gustos y preferencias de ciertos alimentos y a que las papilas gustativas se generan y degeneran con el tiempo, por lo que el umbral de detección e identificación de sabores puede variar. (Espinosa, 2007)

Figura 18

Morfología de la lengua y zonas de detección de sabores



Nota: Imagen que muestra las zonas de la lengua que se utilizan para apreciar los diferentes sabores. Tomado de www.xatakaciencia.com

2.10.2. El olor y el sentido del olfato

El olor de los alimentos se origina por las sustancias volátiles que cuando se desprenden de ellos pasan por las ventanas de la nariz y son percibidos por los receptores olfatorios.

Los seres humanos disponen de unos 1000 receptores conocidos que parece ser que distinguen unos 10000 olores distintos; sin embargo, a veces el mecanismo olfatorio no funciona adecuadamente y se produce una significativa pérdida de la capacidad olfativa o ausencia total de la facultad de oler, debido a varios factores como son: edad, infecciones virales, alergias, consumos de ciertos fármacos, entre otros. Dicha anomalía se la conoce como anosmia.

Un aspecto importante que señala la literatura es la diferencia que existe entre olor y aroma, pues el primero es la percepción de las sustancias volátiles por medio de la nariz, en cambio el aroma es la detección que se origina después de haberse puesto en contacto el alimento en la boca, o sea que el aire en el caso del aroma no es el medio de transmisión de la sustancia, sino la membrana mucosa del paladar. (Espinosa, 2007)

Hasta el momento luego de muchos esfuerzos realizados no se ha logrado identificar los olores primarios, como se ha logrado con los sabores, sin embargo, los analizadores del olfato están más desarrollados que los del gusto y presentan mayor percepción, siendo capaces de percibir olores a una concentración hasta de 10-18 molar.

Los valores de umbral de este analizador en general dependen de una serie de factores como son: volumen y duración del flujo de aire que llega a la mucosa olfativa, la humedad del medio ambiente, así como el efecto de hambre; se ha demostrado que existe una relación inversa entre este y la relación del olfato (Espinosa, 2007).

2.10.3. El color y el sentido de la vista

La importancia del color en la evaluación sensorial se debe fundamentalmente a la asociación que el consumidor realiza entre este y otras propiedades de los alimentos, por ejemplo, el color rojo se asocia al sabor fresa y el verde a la menta, etc. Demostrándose además que en ocasiones solo por la apariencia y color del alimento un consumidor puede aceptarlo o rechazarlo. El mecanismo de percepción sensorial del color tiene su origen en el ojo humano.

La evaluación de color en los alimentos es de vital importancia, tan es así que, en la mayoría de las evaluaciones de un producto, el consumidor asocia el sabor de este con un color determinado. Al igual que en el resto de las características organolépticas existen una serie de factores que inciden en la percepción de los colores como la edad de los observadores, y las alteraciones fisiológicas que afectan la retina del ojo humano (Espinosa, 2007).

2.11. Análisis sensorial

El análisis sensorial tiene un impacto muy importante dentro del campo industrial y a continuación se muestran algunas de ellas:

- Ayuda a medir el grado de influencia en un producto al cambiar la materia prima o el proceso
- Colabora en la búsqueda de nuevos productos
- Mide cuánto dura un producto al pasar el tiempo
- Mide las características del alimento (Perfiles sensoriales)
- Compara muestras y estudia la aceptación de las personas

De manera general el análisis sensorial tiene como primera función encontrar lo que prefieren los consumidores rescatando sus propiedades positivas y negativas y las adapta de manera que sea del agrado de los consumidores.

2.12. Tipos de pruebas sensoriales

2.12.1. Pruebas afectivas

Para esta prueba no se necesita de personas entrenadas ni seleccionadas, se los denomina como “jueces afectivos”, casi siempre son los mismos consumidores reales o potenciales del producto, influyendo en la prueba otros aspectos como la economía o el lugar de consumo del producto.

Los resultados de estas pruebas nos permiten conocer si los consumidores aceptan o no el producto, la preferencia o rechazo, el nivel de agrado de los productos por lo que se les recuerda siempre a los jueces responder de la manera más real posible. (Espinosa, 2007)

2.12.2. Pruebas analíticas

Estas pruebas son llevadas a cabo en laboratorios o lugares con una atmosfera controlada y lo realizan personas que fueron seleccionadas y luego entrenadas las cuales se los denomino “jueces analíticos”. Estas pruebas se subdividen en pruebas discriminatorias, escalares y descriptivas.

- **Pruebas discriminatorias**

Estas pruebas permiten la comparación de dos o más productos y algunos casos hallar el tamaño de la diferencia, son sencillas de realizar y con resultados muy útiles, estas pruebas son de diferenciación o sensibilidad. (Congote, 2010)

- a) Prueba de diferenciación**

- Esta prueba se lleva a cabo entre dos muestras buscando saber si hay diferencia o no entre las dos.

- b) Prueba Dúo-Trio**

- En esta prueba el juez prueba primero una muestra establecida como de referencia y dos muestras codificadas de las cuales una de ellas es igual a la referencia. Este tipo de pruebas es de mayor esfuerzo para el juez y mayor tiempo de entrenamiento. (Congote, 2010)

- **Métodos escalares**

En este método el juez responde a las propiedades organolépticas midiendo la intensidad de cada una de estas, según una escala a valores numéricos.

- a) Escala de estimación de magnitud**

Es una técnica que le permite medir al juez libremente diferencias proporcionales que indican intensidad de un estímulo específico de las muestras, se utiliza una muestra de referencia para fijar respecto a esta un valor comparativo de magnitud. Como partes de la prueba se incluye en la serie de muestras a evaluar una igual a la de referencia que puede ser una de una concentración intermedia entre las demás de la serie.

Análisis de varianza aplicado a pruebas de estimación de magnitud.

1. Hallar la media geométrica a la respuesta de los jueces.

$$MG = \sqrt[n]{(X_1)(X_2)(X_3) \dots (X_n)}$$

2. Calcular la constante (K) para cada juez (valor fijo máximo /MG).
3. Normalizar los datos (respuesta del juez * K).
4. Obtener el logaritmo de los datos normalizados.
5. Realizar el análisis de la varianza ANOVA.

CAPÍTULO III

3. Diseño del sistema

3.1. Diseño de concepto

Este trabajo aplica un proceso de deshidratación de frutas y verduras de la región por liofilización, en la necesidad de obtener y desarrollar nuevos productos agroindustriales que son de difícil adquisición actualmente en el país.

Se lleva a la cámara de liofilización el producto picado en finas capas de 2 mm aproximadamente donde iniciara el primer proceso en el que los alimentos estén por debajo de su temperatura de congelación hasta alcanzar una temperatura de cámara de -40°C , cuando se alcanza esa temperatura con el uso de una bomba de vacío se disminuye la presión interna de la cámara por debajo de los 610 Pa que representa el punto triple del agua, una vez generado el vacío y con la temperatura de cámara de alrededor de los -35 a -40°C se agrega calor al alimento por medio de resistencias caloríficas ubicadas entre las bandejas del alimento (energía suficiente al proceso de sublimación del hielo de la fruta o verdura), la segunda y última etapa de secado se mantiene la presión baja dentro de la cámara y se eleva la temperatura del alimento hasta por lo menos unos 40°C para retirar toda el agua parcialmente ligada en el material.

3.1.1. Ubicación geográfica

El presente proyecto se lleva a cabo en la zona centro del país específicamente en la ciudad de Riobamba a una altura de 2754 metros sobre el nivel del mar con frutas y verduras cultivadas en la zona como zanahoria, cebolla blanca, cebolla paiteña, remolacha, papas, ocas, mashuas, habas, uvilla, mora, claudia, duraznos y diferentes tipos de manzanas que se dan únicamente en esta parte del mundo y que por medio de la liofilización permite conservar el alimento a tiempos largos de almacenamiento y fácil transporte hacia todo el país y hasta el exterior.

3.1.2. Dimensiones de trabajo

Se dimensiono la cámara para una capacidad de 10 lbm de producto picado en 3 bandejas, entre bandejas es necesario dejar un espacio de entre 8 y 10 cm para que se puedan introducir las resistencias caloríficas sobre el producto cuidando que no calienten la bandeja superior, en la parte posterior debe existir el espacio necesario

para la instalación del ventilador, evaporador y debe existir espacio suficiente para que circule el aire movido por el ventilador, en la parte inferior de la cámara está el tubo para la extracción del aire y también necesita un espacio para que actúe como condensador del vapor sublimado en las bandejas, usando el software CAD se verifico todos estos requerimientos y se obtuvieron las siguientes dimensiones.

Dimensiones de la cámara

Alto: 50 cm = 1.54 ft

Ancho: 60 cm = 1.96 ft

Fondo: 50 cm = 1.54 ft

Dimensiones de las bandejas

Número de bandejas: 3

Alto: 1 cm

Ancho: 59.5 cm

Fondo: 30 cm

3.1.3. Material

Al trabajar con alimentos es necesario mantener un estándar de salubridad e higiene en el entorno del proceso de liofilización seleccionando materiales que garanticen no desprendan partículas ni sufran oxidaciones que puedan ser perjudiciales para la calidad de los alimentos.

El material usado para el prototipo debe resistir la acción de cargas externas dentro de las deformaciones admisibles sin alterar su capacidad de trabajo o de la máquina, se selecciona el acero inoxidable MATE 304 de 1mm de espesor para la construcción de la cámara que con su posterior análisis se comprueba que el diseño sea seguro.

El acero inoxidable se forma al añadir un poco más del 10 % de cromo en su composición, el oxígeno actúa sobre el metal, oxidándolo y formando una película transparente llamada capa pasiva, la cual mantiene el acero intacto sin modificar su

apariencia original. El acero inoxidable es un material resistente debido a su bajo nivel de carbono y su contenido de por lo menos 10.5 % de cromo.

Los aceros inoxidables austeníticos se forman incluyendo níquel, manganeso o nitrógeno en el material, el contenido de cromo está entre el rango de 16 al 26 % y su contenido de carbono es del rango de 0.03 a 0.08 %, el acero 304 se recomienda en construcciones ligeras soldadas que requieran buena resistencia a la corrosión, tiene buena asepsia, es maleable, no es magnético y trabaja a temperaturas extremas por lo cual fue elegido para las paredes de la cámara de liofilización tanto internas como externas. (López & Padilla, 2012)

3.2. Especificaciones técnicas

Para el diseño del prototipo y de cada uno de los subsistemas se define algunas especificaciones técnicas para el proceso de carga del producto, temperatura y presión dentro de la cámara de liofilización obtenidas por la capacidad impuesta, modelado CAD y las temperaturas recomendadas por (Orrego, 2008)

Tabla 2

Especificaciones técnicas de diseño

Especificaciones Técnicas de Diseño	
Carga del producto:	10 lb
Superficie útil de carga por placa:	1800 cm^2
Número de placas	3
Inter distancia entre placas:	8.5 cm
Rango de temperaturas de las placas:	-40 °C a 50 °C
Temperatura final de la cámara:	-40 °C
Bomba de vacío:	6-8 CFM
Capacidad del evaporador:	6000 BTU

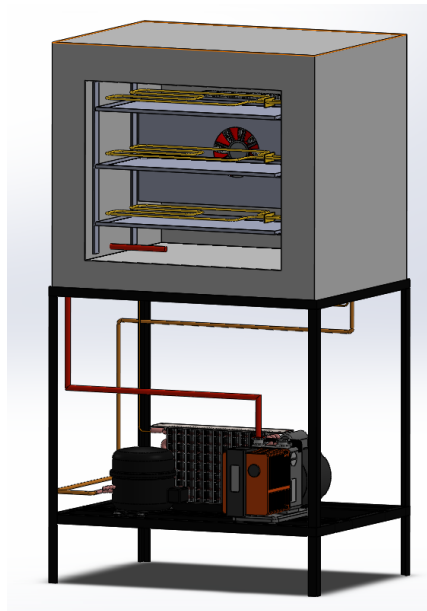
3.3. Análisis estructural

Se realizó en un software CAD el montaje de las partes del sistema propuesto, el cual consta de la cámara de liofilización que consta de un evaporador, un ventilador, las bandejas para el producto y las resistencias caloríficas en cada una de las bandejas, la cámara estará sobre una estructura de perfil metálico y aloja al sistema de vacío y la unidad de refrigeración.

Diseño propuesto

Figura 19

Diseño CAD propuesto

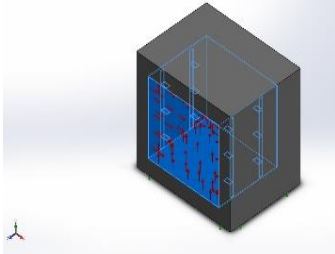


Nota: Imagen del ensamblaje del prototipo en el software CAD. Fuente propia.

Se realizó el análisis estructural del diseño propuesto usando CAE mediante el análisis de elementos finitos con el cual se obtuvo la deformación y los esfuerzos máximos y mínimos en la estructura del liofilizador para evaluar su factibilidad.

Tabla 3

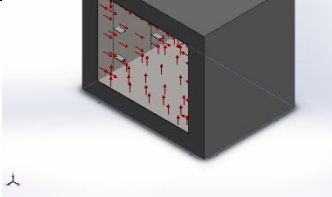
Propiedades del modelo

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	AISI 304	Sólido
	Criterio de error predeterminado :	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	2,06807e+08 N/m²	
	Límite de tracción:	5,17017e+08 N/m²	

Cargas y sujeciones

Tabla 4

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción	
Fijo-1		Entidades: Tipo:	1 cara(s) Geometría fija

Fuerzas resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	2,53669	-7,0798	-28.957,7	28.957,7
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

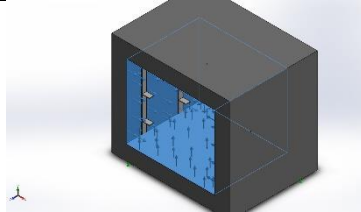
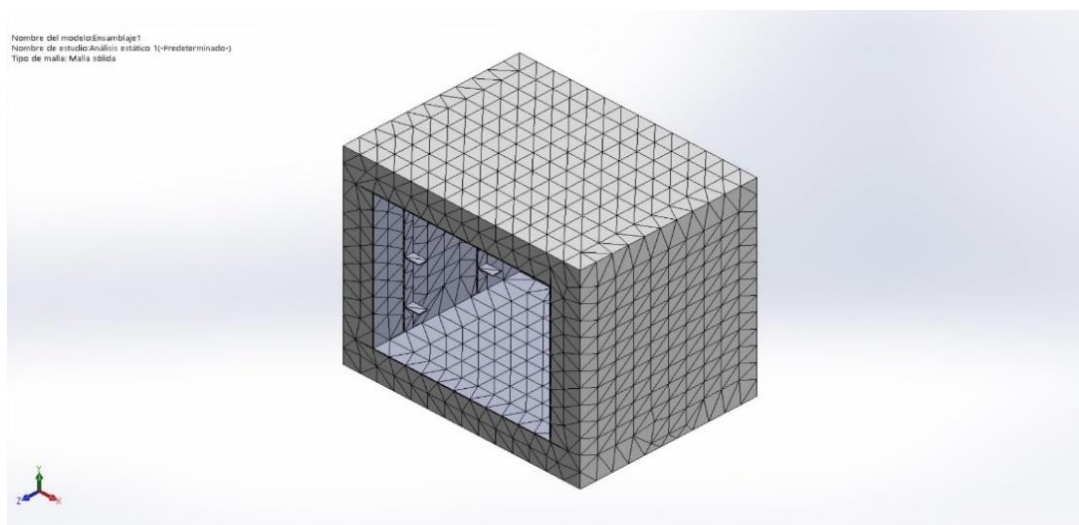
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Presión-1		Entidades: Tipo: Valor: Unidades: Ángulo de fase: Unidades:	5 cara(s) Normal a cara seleccionada -14 psi 0 deg

Figura 20

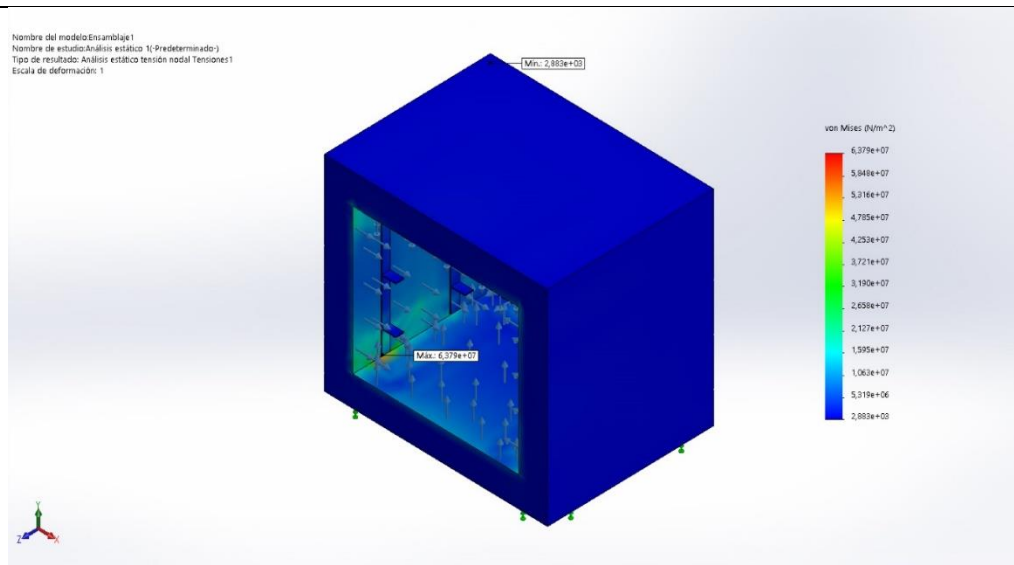
Mallado del prototipo



Nota: se muestra el mallado de la cámara de liofilización tanto del acero inoxidable (parte interna) como del poliuretano (parte externa). Fuente propia

Tabla 5*Tensiones de Von Mises*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	2,883e+03 N/m ² Nodo: 14865	6,379e+07 N/m ² Nodo: 4957

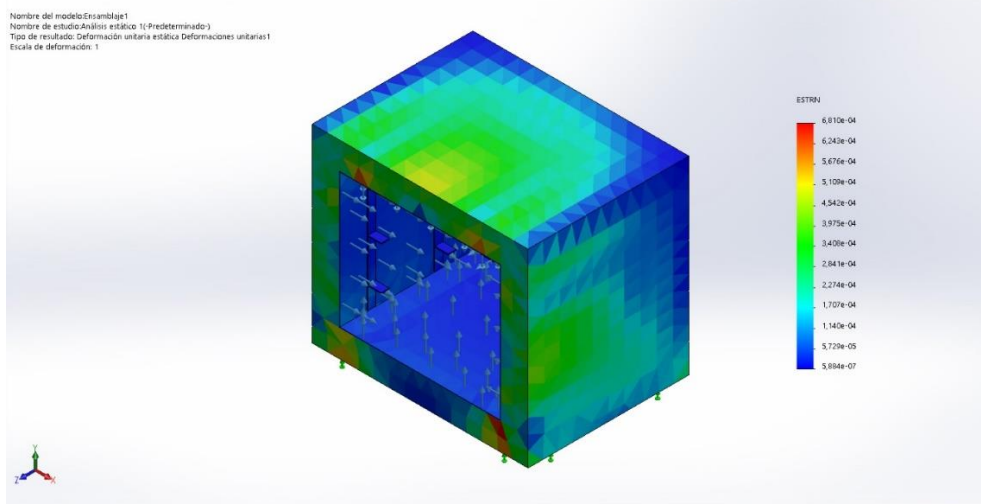
**Ensamblaje1-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1****Tabla 6***Desplazamientos*

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00 mm Nodo: 5493	4,755e-01 mm Nodo: 5527

Tabla 7

Deformaciones unitarias

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	5,884e-07 Elemento: 2034	6,810e-04 Elemento: 3089



Ensamblaje1-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

En base al análisis obtenemos los datos de la tensión de Von Mises también llamado criterio de la máxima energía de distorsión, el cual es un criterio de resistencia estática aplicado a materiales dúctiles según el cual el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción.

Calculamos el coeficiente de seguridad en el punto de la tensión máxima con la siguiente ecuación.

$$n_s = \frac{S_y}{\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)}}$$

Donde:

$\sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)}$ representa el valor que el software nos proporciona luego del análisis de $6,379 * 10^7 \frac{N}{m^2}$

S_y : Resistencia a la fluencia del material

Con lo que obtenemos

$$n_s = \frac{415 \text{ MPa}}{63.79 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 6.5$$

El factor de seguridad para materiales promedios que funcionan en entornos ordinarios y están sometidos a cargas y tensiones que se pueden determinar con relativa precisión debe ser de 2 a 2,5, por lo tanto, el valor de 6.5 obtenido indica seguridad ante el fallo y tanto mayor, cuanto más elevado sea su valor.

3.4. Dimensionamiento del sistema de congelación

3.4.1. Diseño térmico

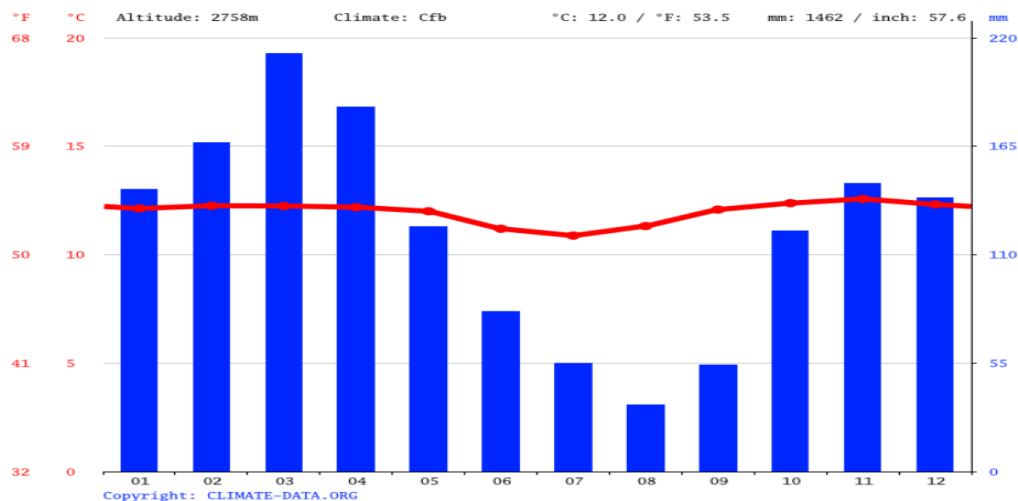
Para los cálculos se toman en cuenta la carga térmica total a extraer por parte del sistema de refrigeración. Si bien sus cálculos son parecidos al de neveras o cuartos fríos esta difiere por algunas características particulares como velocidad de refrigeración y temperaturas finales,

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

3.4.2. Determinación de temperaturas

- **Temperatura exterior ambiente**

Riobamba posee temperaturas que varían dependiendo de la época del año entre los 5 °C a 19 °C y en el caso extremo los 22°C como se puede ver en la figura 19.

Figura 21*Climograma anual de Riobamba*

Nota: Grafica que muestra la temperatura ambiente durante todo el año en la ciudad de Riobamba. Tomado de es.climate-data.org

Como se observa en la figura 20, no se superar la temperatura de 22 °C (-71,6°F), la cual será, la temperatura externa ambiente usada para el diseño de la cámara para efectos de seguridad.

- **Temperatura de diseño dentro de la cámara**

Según (Orrego, 2008), la temperatura que se debe alcanzar dentro de la cámara de liofilización para asegurar la sublimación debe ser de -40 °C aproximadamente.

Temperatura de diseño dentro de la cámara: -40 °C = -40 °F

- **Temperatura de evaporación**

La temperatura de evaporación del refrigerante que utilizaremos la obtendremos después de calcular la carga del sistema. Esta temperatura es la diferencia entre la temperatura del aire que llega al evaporador y la temperatura de saturación del refrigerante igual a la presión de salida del evaporador.

- **Temperatura de condensación**

Depende del tipo de enfriamiento que tendrá el condensador, que puede ser por medio de agua o aire, el condensador del prototipo en este caso será enfriado por aire los cuales funcionan casi siempre a diferencias de temperatura (DT) entre los 10°F y los 30°F, la cual usan normalmente la menor para aplicaciones de frio y la mayor para aplicaciones de temperaturas más elevadas donde la relación de compresión no es crítica al trabajar en ambientes cálidos. En el presente proyecto se utiliza una diferencia menor a la diferencia promedio (15 ° F) debido a que la aplicación es de temperaturas bajas.

$$DT = T_{cond} - T_{amb} = 15 \text{ } ^\circ F$$

$$T_{cond} = 15 \text{ } ^\circ F + T_{amb}$$

$$T_{cond} = 15 \text{ } ^\circ F + 71.6 \text{ } ^\circ F$$

$$T_{cond} = 86.6 \text{ } ^\circ F = 30.33 \text{ } ^\circ C$$

3.4.3. **Cálculo de cargas del sistema**

Para el cálculo de cargas del sistema se toma en cuenta las posibles fuentes de calor que generan un aumento de temperatura en el interior del sistema y que sean de consideración como las siguientes:

- Cargas de los productos a liofilizar.
- Cargas por superficies.
- Cargas internas varias.

También existen las cargas por servicio que se dan al abrir la puerta de la cámara, pero como en nuestro caso va a permanecer siempre cerrada durante todo el proceso no se la toma en cuenta.

- **Cálculo de cargas por superficies**

El cálculo de cargas por la cantidad de calor a través de las superficies se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_p = A * U * \Delta [Btu] \text{ (carga térmica por transmisión)}$$

Donde:

A: Área de la pared [ft²]

U: Factor de transmisión [Btu/ft²]

Δ: Diferencia de temperaturas en la pared

Debido a sus propiedades aislantes en frío, comúnmente utilizado en la industria de la refrigeración de alimentos en este proyecto se utilizó poliuretano expandido. El poliuretano expandido estará dentro de láminas de acero inoxidable 304 mate de 1 mm de espesor.

Datos usados en el cálculo:

Dimensiones internas de la cámara

Alto: 50 cm = 1.54 ft

Ancho: 60 cm = 1.96 ft

Fondo: 50 cm = 1.54 ft

Temperaturas

$$T_{amb} = 71.6 \text{ °F} = 22 \text{ °C}$$

$$T_{cam} = -40 \text{ °F} = -40 \text{ °C}$$

$$\Delta = T_{amb} - T_{cam}$$

$$\Delta = 71.6 - (-40)$$

$$\Delta = 111.6 \text{ °F}$$

Conductividad térmica de los materiales

Poliuretano: $k = 0.16 \left[\frac{Btu}{FT \text{ } ^\circ F} \right]$

Acero inoxidable: $K = 108 \left[\frac{Btu}{FT \text{ } ^\circ F} \right]$

Cálculo del factor de transmisión de calor

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f_i} + \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2} + \dots + \frac{1}{f_o} \quad [ft^2 \circ F / Btu]$$

Donde: $\frac{1}{f_i}$ y $\frac{1}{f_o}$,

Son coeficientes de convección de las paredes interna y externa respectivamente, son despreciables por la mínima velocidad del aire en el entorno del prototipo.

x = espesor del material

k = conductividad térmica del material

Cálculo de áreas de las superficies de la cámara

Tabla 8

Cálculo de área de las superficies internas de la cámara de liofilización

Ubicación	Altura [ft]	Ancho [ft]	Profundidad [ft]	Área [ft ²]
Paredes laterales	1,64	-	1,64	2,6896
Piso	-	1,9685	1,64	3,22834
Techo	-	1,9685	1,64	3,22834
Fondo	1,64	1,9685	-	3,22834
Puerta	1,64	1,9685	-	3,22834

Con los datos calculados anteriormente y usando la ecuación del factor de transmisión de calor podemos obtener la tabla 9.

Tabla 9

Tabla de datos y cálculo de factor de transmisión de calor

Ubicación	Área [ft^2]	Espesor [ft]		U [$\frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F}$]	Δ [°F]
		Acero inoxidable	Poliuretano		
Paredes laterales	2,6896	0,01968504	0,328	0,487762	111,6
Piso	3,22834	0,01968504	0,328	0,487762	111,6
Techo	3,22834	0,01968504	0,328	0,487762	111,6
Fondo	3,22834	0,01968504	0,328	0,487762	111,6
Puerta	3,22834	0,01968504	0,328	0,487762	111,6

Una vez calculados los factores U y Δ junto con la tabla del área de cada una de las paredes de la cámara de liofilización obtenemos el resultado de las cargas por superficie.

Tabla 10

Carga a través de las superficies de la cámara

Ubicación	Cantidad	Calor Transferido Q_p [BTU]
Paredes laterales	2	292,8123656
Piso	1	175,7320554
Techo	1	175,7320554
Fondo	1	175,7320554
Puerta	1	175,7320554
Total Q_p		995,7405871

- **Cálculo de carga térmica del producto**

Para el cálculo de la carga térmica del producto debemos tener en cuenta los siguientes factores:

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

Para calcular los calores antes mencionados es necesario que tengamos los siguientes datos:

- Masa del producto a liofilizar.
- Calor específico promedio por encima del punto de congelación.
- Factor de rapidez de enfriamiento promedio.
- Calor latente promedio.
- Calor específico promedio por debajo del punto de congelación.
- Temperatura de congelación promedio.
- Temperatura ambiente.
- Temperatura de la cámara.

Los datos antes mencionados se obtendrán del promedio de los valores correspondientes a cada uno de los alimentos que podrían ser liofilizados y que se presentan a continuación en la tabla 11.

Los datos de calor latente, calor específico por arriba y por debajo del punto de congelación, así como el punto de congelación de varias frutas y verduras propias de nuestro país y de nuestra región aún no se estandarizan en tablas por lo que se toma en cuenta las frutas y verduras más comunes que se liofilizan y se producen en nuestro país.

Tabla 11*Punto de congelación y calor latente de posibles productos a liofilizar*

Alimento	% Agua	Punto de congelación [°F]	Calor específico $\left[\frac{Btu}{Lb \cdot ^\circ F}\right]$		Calor latente de fusión [Btu/lb]
			Arriba del punto de congelación	Abajo del punto de congelación	
Zanahoria	88	-1,4	3,79	1,95	29,4
Apio	94	-0,5	3,99	2,02	31,4
Pepinos	96	-0,5	4,06	2,05	32,1
Cebolla fresca	89	-0,9	3,82	1,96	29,7
Pimiento	92	-0,7	3,92	2,07	30,7
Manzana	84	-1,1	3,65	1,95	28,1
Mora	82	-1,6	3,59	1,87	27,4
Plátano	75	-0,8	3,35	1,78	25,1

Cereza	80	-	3,5	1,8	26
		1,8	2	5	7
Durazno	89	-	3,8	1,9	29
		0,9	2	6	7
Peras	83	-	3,6	1,8	29
		1,6	2	9	7
Piña	85	-1	3,6	1,9	28
			9	1	4
Fresa	90	-	3,8	1,9	30
		0,8	6	7	1
	81,5	-	3,5	1,8	25
		1,7	70	66	5,3
		87	62	25	08
		5	5		75
PROMEDIO		28,	0,8	0,4	10
		78	52	45	9,7
		25	6	7	62

Nota: Tabla de valores de punto de congelación y calores específicos de posibles productos a liofilizar. Tomado de (A.cengel & Ghajar, 2011)

Con lo cual obtenemos los datos necesarios de la siguiente forma:

Tabla 12

Datos necesarios para el cálculo de calores por producto

Masa del producto	$m = 10 \text{ lb}$
Calor específico promedio por encima del punto de congelación	$C_{p_h} = 0.8526$
Factor de rapidez de enfriamiento promedio	$f_r = 0.8$
Calor latente promedio	$h_{fi} = 109.762$

Calor específico promedio por debajo del punto de congelación	$Cp_l = 0.4457$
Temperatura de congelación	$T_c = 28.78 \text{ }^\circ\text{F}$
Temperatura ambiente	$T_{amb} = 71.6 \text{ }^\circ\text{F}$
Temperatura de la Cámara	$T_{cam} = -40 \text{ }^\circ\text{F}$

a) Cálculo del calor sensible cedido por encima del punto de congelación

Tenemos la siguiente ecuación:

$$Q_{enf} = \frac{m * Cp_h * \Delta T}{f_r} [Btu]$$

Donde:

m : masa del producto [lb]

Cp_h : calor específico por encima del punto de congelación obtenido en la tabla 11.

ΔT : Diferencia de temperatura entre la entrada del producto y la de congelación de este.

f_r : Factor de rapidez de enfriamiento usado por la diferencia de temperaturas entre el espacio dentro de la cámara y la temperatura con la que ingresan los alimentos, este valor asegura la capacidad de la máquina incrementando el valor de la carga del producto al valor correspondiente al valor del pico máximo.

Donde reemplazando los datos anteriores tenemos:

$$Q_{enf} = \frac{10 * 0.8526 * (71.6 - 28.7825)}{0.8} [Btu]$$

$$Q_{enf} = 456.327 [Btu]$$

b) Cálculo del calor latente de congelación

La ecuación para el cálculo de la carga por el calor latente de congelación es la siguiente:

$$Q_{sol} = m * h_{fi} \text{ [Btu]}$$

Donde:

m : masa del producto [lb]

h_{fi} : calor latente en el punto de congelación

$$Q_{sol} = 10 * 109.762 \text{ [Btu]}$$

$$Q_{sol} = 1097.62 \text{ [Btu]}$$

c) Cálculo del calor sensible por debajo del punto de congelación

Tenemos la siguiente ecuación:

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

Donde:

m : masa del producto [lb]

C_{pl} : calor específico por debajo del punto de congelación obtenido en la tabla 11.

ΔT : es la diferencia entre la temperatura de congelación con la temperatura de diseño de cámara en °F.

$$Q_{alm} = 10 * 0.4457 * (27.7825 - (-40)) \text{ [Btu]}$$

$$Q_{alm} = 306.5636 \text{ [Btu]}$$

d) Cálculo del calor de respiración del producto

Los productos durante su almacenamiento producen calor y generan una reacción entre los carbohidratos de los tejidos con el oxígeno del aire dando como resultado dióxido de carbono y calor

Para motivos del cálculo es necesario definir el tiempo que dura el proceso de almacenamiento en la cámara del producto, el cual se asumió de 6 horas contemplando la velocidad de congelamiento efectiva para que se generen cristales de hielo adecuados para una buena sublimación y para que los alimentos no sufran cambios en su estructura por motivos de una rápida congelación.

Aplicamos la siguiente ecuación:

$$Q_{resp} = m * C_{resp} * t \text{ [Btu]}$$

Donde:

m : masa del producto [lb]

C_{resp} : Calor de respiración promedio de los posibles alimentos a liofilizar

t : Tiempo de almacenamiento del producto de la cámara

$$Q_{resp} = 10 * 0.0487 * 6 \text{ [Btu]}$$

$$Q_{resp} = 2.922 \text{ [Btu]}$$

Representa un valor casi despreciable debido a poca cantidad del producto.

- **Cargas varias**

El enfriamiento de los alimentos dentro de la cámara de liofilización se lo realiza circulando el aire frío por un ventilador pequeño que presenta las siguientes características:

Velocidad: 1200 rpm

Corriente: 0.25 A

Frecuencia: 60 Hz

Voltaje: 110 V

Este ventilador genera calor por su funcionamiento entonces es necesario calcular la carga cedida por el consumo de la potencia en las horas de trabajo usando la siguiente ecuación

$$Pot = V * I \text{ [w]}$$

$$Pot = 110 * 0.25 \text{ [w]}$$

$$P = 27.5 \text{ [w]}$$

Sabiendo que 1 watt = 3.41 Btu/h y teniendo un tiempo de trabajo de 6 horas obtenemos:

$$27.5w = 93.775 \text{ [Btu/h]}$$

Como el sistema de trabajo del sistema de refrigeración es de 6 horas

$$Q_{vent} = 93.775 * 6 = 562.65 \text{ [Btu]}$$

En la tabla 13, se presenta todas las cargas de la cámara de liofilización con la sumatoria total de las mismas.

Tabla 13

Sumatoria de cargas del sistema

Cargas	Q [Btu]	Q[Btu/h]
Carga por superficies	995,7405871	165,956765
Carga por producto	1863,433109	310,572185
Cargas varias	562,65	93,775
Sumatoria	3421,823696	570,303949
Factor de seguridad	10%	10%
Carga total del sistema	3764,006066	627,334344

En base a la carga total requerida usamos una equivalencia para obtener la energía térmica de refrigeración para el proceso de congelación de la siguiente manera.

$$3.41 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 1 \text{ watt}$$

$$627.334344 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 193.969 \text{ watt}$$

$$0.00134102 \text{ hp} = 1 \text{ watt}$$

$$193.696 \text{ watt} = 0.26 \text{ hp}$$

El valor obtenido en los cálculos representa la potencia necesaria para extraer el calor que existe dentro de la cámara para un sistema con el 100 % de eficiencia, el valor real sufre pérdidas del 30% al 50 % debido a factores ajenos al diseño como eficiencia del compresor o fuga por lo cual le agregamos un 30% de potencia de seguridad obteniendo:

$$P = 0.26 + (0.26 * 30\%) = 0.338 \text{ HP}$$

Por lo que utilizar una unidad de enfriamiento de 0.35 ò 3/8 HP sería lo correcto.

3.5. Selección del sistema de vacío

Según el proceso de liofilización después de finalizar la etapa de congelación se requiere obtener una presión de vacío dentro del cámara menor a 610 Pa o (0.089 Psi) es decir por debajo del punto triple del agua logrando así la sublimación del hielo.

Para este fin se realizó una selección de una bomba de vacío que logre disminuir la presión dentro del sistema de forma rápida para evitar que la temperatura suba debido a la extracción de aire frío y a la liberación de energía del producto. Se calculo el volumen de la cámara de liofilización para saber el caudal necesario de la bomba a seleccionar

Dimensiones internas de la cámara

Alto: 50 cm = 1.54 ft

Ancho: 60 cm = 1.96 ft

Fondo: 50 cm = 1.54 ft

Volumen: $(1.54 * 1.96 * 1.54) \text{ ft}^3 = 4.65 \text{ ft}^3$

En base a las características de funcionamiento y la generación de vacío necesario para la sublimación, al necesitar extraer el vapor generado por el producto dentro de la cámara y para obtener un buen rendimiento pese a fugas se selecciona una bomba QVP-900 con las siguientes características

Tabla 14

Tabla de características de la bomba de vacío

QVP-900		
Voltaje	110 V	
Frecuencia	50 Hz	60 Hz
Desplazamiento de aire libre	8,0 CFM	9,5 CFM
Potencia	570 W	620 W
Rpm	2880	3440
Vacío ultimo	2 Pa	
	15 micrones	
Capacidad de aceite	380 ml	

Figura 22

Bomba de vacío QE Quality High Efficiency



Nota: Fotografía de la bomba de vacío usada en el prototipo. Fuente Propia

3.6. Selección del sistema de calentamiento

Es el encargado de agregarle energía al producto para producir la sublimación y evaporar el agua de las diferentes capas del producto. Luego de alcanzar los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de la cámara de trabajo y haber encendido la bomba de vacío para alcanzar los 610 Pa se comienza a suministrar calor por medio de resistencias caloríficas que se encuentran sobre cada bandeja con el fin de calentar el producto por medio de radiación.

En esta etapa debe mantener el vacío alcanzado y realizar un control del calentamiento manteniendo la temperatura se mantenga por debajo del punto de congelación de manera que el hielo se vaya sublimando desde la capa más externa hacia el centro, en esta etapa se alcanza disminuir la humedad del alimento hasta llegar al 15% sobre su peso húmedo.

Las resistencias caloríficas también entran en la última etapa de la liofilización cuando ya no existe hielo en el producto y la humedad es específicamente de agua ligada parcialmente en el producto, se debe mantener la presión baja y se eleva la temperatura hasta por lo menos los $40\text{ a }50\text{ }^{\circ}\text{C}$ de esta forma la sublimación se da en el interior del alimento, para este punto la humedad del producto será de por lo menos el 2% de su peso húmedo.

3.6.1. Selección de resistencias caloríficas

Las resistencias caloríficas se fabricaron en base a las medidas de las bandejas que contienen el alimento de forma que el calor sea distribuido de la mejor manera sobre toda la superficie del alimento.

De acuerdo con el diseño CAD de las resistencias caloríficas estas tienen una longitud de 5.3 m .

Para encontrar la potencia de diseño de las resistencias tenemos los siguientes datos de calor específico y densidad del cobre.

$$Cp_{cobre} = 385 \frac{J}{Kg} * K$$

$$Cp_{cobre} = 8933\text{ Kg}/m^3$$

Con la densidad y el volumen obtenemos la masa

$$V = \pi * r^2 * L$$

$$V = \pi(0.003 \text{ m})^2 * 5.367 \text{ m}$$

$$V = 0.0001517 \text{ m}^3$$

$$m = \rho * V = 8933 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.0001 \text{ m}^3 = 1.355 \text{ Kg}$$

Para el cálculo de la potencia necesitamos conocer la temperatura y el tiempo de trabajo, según (Orrego-Alzate, 2003) se toma de referencia la temperatura que los alimentos no pueden superar antes de llegar a la cocción es decir 60°C y el tiempo de calentamiento se lo impuso de 10 minutos de donde obtenemos la siguiente carga

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

$$Q = 1.3555 \text{ Kg} * 385 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * (323.15 - 263.15)\text{K}$$

$$Q = 31313.62 \text{ J}$$

$$Q = 29.67 \text{ Btu}$$

$$Pot = 29.66 \frac{\text{Btu}}{\frac{1}{6} \text{ horas}} = 177.96 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Pot = 52.1244 \text{ Watts}$$

3.7. Selección del sistema de control y de potencia

3.7.1. Control del sistema de refrigeración

Para el sistema de refrigeración se seleccionó un controlador electrónico de refrigeración marca Full Gauge modelo TC-900E el cual una temperatura de control entre -50 °C a 105 °C vuelve automático los procesos de deshielo según la necesidad de la instalación, cuenta con un setpoint normal y económico, además de la funcionalidad de congelamiento rápido, sus salidas de relé comanda directamente compresor de hasta 1 HP y su salida de deshielo tiene capacidad de hasta 10 A, posee también un filtro digital el cual tiene la finalidad de simular un aumento de masa en el

sensor de ambiente aumentando su tiempo de respuesta y evitando accionamientos sin necesidad del compresor.

El controlador TC-900E de la marca Full Gauge contiene un control digital de temperatura interno en base a la lectura de dos sensores, temperatura ambiente y temperatura de evaporador respectivamente controla la activación del compresor, ventilador interno y de una resistencia de evaporador para aplicaciones de descarchado en el evaporador, se programa su set point, tiempo inicial, histéresis y tiempo de descongelamiento además de una serie de alarmas.

La activación del contactor de la unidad de refrigeración se da por medio de una salida de relay del controlador y en serie con un Timer programado con el tiempo de congelación y de desecación primaria sumados, una vez transcurrido ese tiempo se desactiva la unidad de frío para proceder a la última etapa en la que se eleva la temperatura del producto.

Figura 23

Controlador de refrigeración TC-900E de marca Full Gauge



Nota: Imagen referencial del controlador de refrigeración Full Gauge. Tomado de www.fullgauge.com

El control del sistema se encarga de retirar el calor interno de la cámara de trabajo mediante el accionamiento del compresor del gas que absorbe el calor y lo conduce hasta el condensador en la parte externa de la cámara para expulsarlo al ambiente, trabaja en función de la lectura de los sensores del evaporador y de ambiente dentro de la cámara, se encarga también de activar o desactivar el ventilador para que haga circular el aire enfriado en el evaporador a través de toda la cámara y al estar en contacto con el alimento vaya congelándolo.

El compresor se activa cuando se cumple la condición de que la cámara de congelación este por arriba del valor establecido como referencia más el diferencial asignado, y se desactiva cuando la temperatura este por debajo del punto de referencia o Set Point.

a) Especificaciones técnicas

El modelo escogido para el proyecto funciona a 115 V y 60 HZ

Fuente: Manual TC900EPWR07-01T-15838

Tabla 15

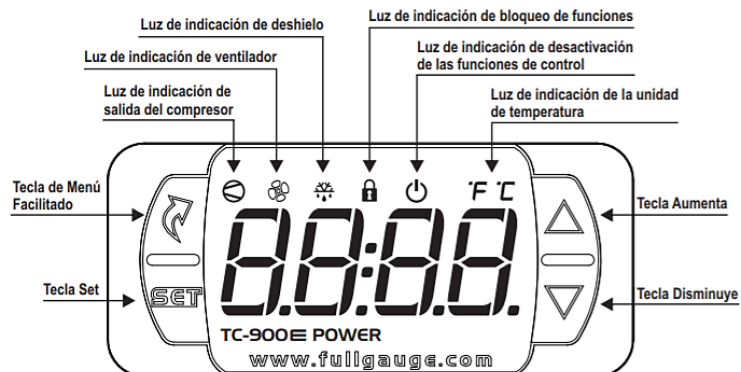
Especificaciones técnicas de la bomba de vacío

Alimentación directa	TC-900E POWER: 115 o 230 Vac +- 10% (50/60 Hz)
Temperatura de control	T -50 °C a 105 °C / -58 °F a 221°F
Temperatura de operación	0 a 50 °C
Corriente máxima por salida	COMP: 12(8) A / 240 Vac 1 HP DEFER: 10A / 240 Vac 2400W FANS: 5(3) A / 240 Vac
Humedad de operación	10 a 85 % UR (sin condensación)
Dimensiones (mm)	76 x 34 x 77 mm (AxAxP)
Dimensiones del recorte para fijación del instrumento	71 x 29 +-0,5 mm

b) Indicaciones y teclas de operación

Figura 24

Indicaciones y teclas de operación

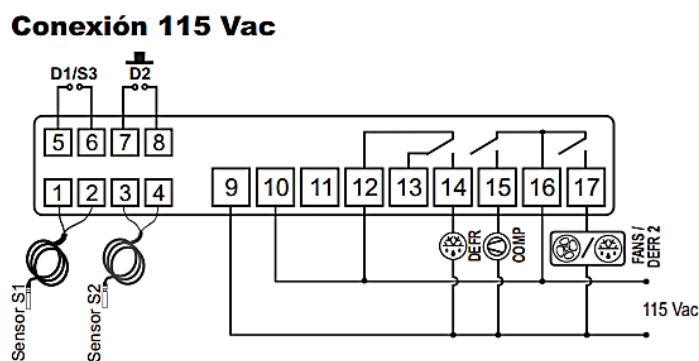


Nota: Imagen del teclado y de los indicadores existentes en la pantalla del controlador de refrigeración. Tomado del manual del controlador TC900EPWR07-01T-15838

c) Instalaciones y conexiones eléctricas

Figura 25

Esquema del controlador de refrigeración



Nota: Esquema de conexión de los sensores y actuadores del sistema de refrigeración al controlador Full Gauge. Tomado del manual TC900EPWR07-01T-15838

3.7.2. Control del sistema de calentamiento y de vacío

Luego de que se cumpliera la etapa de congelamiento y se llegue a la temperatura deseada inicia el sistema de vacío y de calentamiento mediante la activación de la bomba de vacío y las resistencias caloríficas respectivamente. El sistema de calentamiento activa o desactiva las resistencias caloríficas en base a la lectura del sensor que está ubicado en el alimento manteniéndolo en la temperatura deseada a lo largo de la desecación primaria.

Para el control de estos dos sistemas se seleccionó al microcontrolador Arduino Uno teniendo en cuenta que tenemos al sensor del alimento (DS18B20) como entrada y como salida las resistencias y el sistema de vacío, el microcontrolador Arduino Uno es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P posee 14 pines de entrada/salida digitales, 6 entradas analógicas un cristal de 16 MHz, conexión USB para conectarse con el software y programarlo y un plug para alimentación a 5 V y para separar la parte de potencia de la de control usaremos un módulo relay de 4 canales, estas características del microcontrolador y del módulo relay son suficientes para la aplicación y el número de entradas y salidas que necesitamos.

Figura 26

Placa comercial microcontrolador Arduino UNO



Nota: Imagen del microcontrolador Arduino UNO seleccionado para el prototipo.

Tomado de la página www.arduino.cl

3.7.3. Dimensionamiento del sistema de control y diagramas

El equipo liofilizador está compuesto por los siguientes equipos:

- Unidad de refrigeración de la cámara
- Bomba de vacío
- Resistencia térmica
- Válvula solenoide
- Sensor de temperatura 1
- Sensor de temperatura 2
- Temporizador

Se realizó el dimensionamiento de los elementos de protección y accionamiento, así como de sus conductores usando las potencias y datos técnicos obtenidos de los cálculos y de los Datasheet respectivos.

- **Equipos de Potencia**

- a) Unidad de refrigeración de la cámara

La unidad de refrigeración mediante su controlador TC- 900 E acciona el compresor y el ventilador del condensador, usando los valores impresos en su respectiva placa sabemos que el compresor tiene un amperaje de carga nominal de 9.6 A con un voltaje de 115 V a 60 Hz y el ventilador del condensador de 0.48 A con voltaje de 115 V a 60 Hz.

Con lo cual se calcula la corriente que debe soportar el conductor usando la siguiente fórmula:

$$I_{cond} = (I_{carga\ mayor}(1.25)) + \sum I_{carga\ menor}$$

$$I_{cond} = (9.6(1.25)) + 0.48$$

$$I_{cond} = 12.48\ A$$

En base a la corriente calculada se seleccionó el conductor 16AWG-2000V-75°C tanto para los conductores de fase, neutro y tierra, para el dimensionamiento del elemento de protección se lo realizó mediante los siguientes cálculos:

$$I_{Elem\ Proteccion} = (I_{carga\ mayor}(2.5)) + \sum I_{carga\ menor}$$

$$I_{Elem\ Proteccion} = (9.6(2.5)) + 0.48$$

$$I_{Elem\ Proteccion} = 24.48\ A$$

Con el valor calculado y en base al funcionamiento de los elementos del sistema se seleccionó un elemento de protección de 30 A.

b) Bomba de Vacío

Usando los valores impresos en su respectiva placa sabemos que la alimentación es de 115 V a 60 Hz con una potencia de 620W de donde según la potencia y la alimentación y la tabla 10 se tiene una corriente nominal de 9.8 A

Con lo cual se calcula la corriente que debe soportar el conductor usando la siguiente formula:

$$I_{cond} = (I_{carga\ mayor}(1.25))$$

$$I_{cond} = (9.8 (1.25))$$

$$I_{cond} = 12.25\ A$$

En base a la corriente calculada se seleccionó el conductor 16AWG-2000V-75°C tanto para los conductores de fase, neutro y tierra, para el dimensionamiento del elemento de protección se lo realizo mediante los siguientes cálculos:

$$I_{Elem\ Proteccion} = (I_{carga\ mayor}(2.5))$$

$$I_{Elem\ Proteccion} = (9.8(2.5))$$

$$I_{Elem\ Proteccion} = 24.5\ A$$

Con el valor calculado y en base al funcionamiento de los elementos del sistema se seleccionó un elemento de protección de 30 A.

- **Equipos de control**

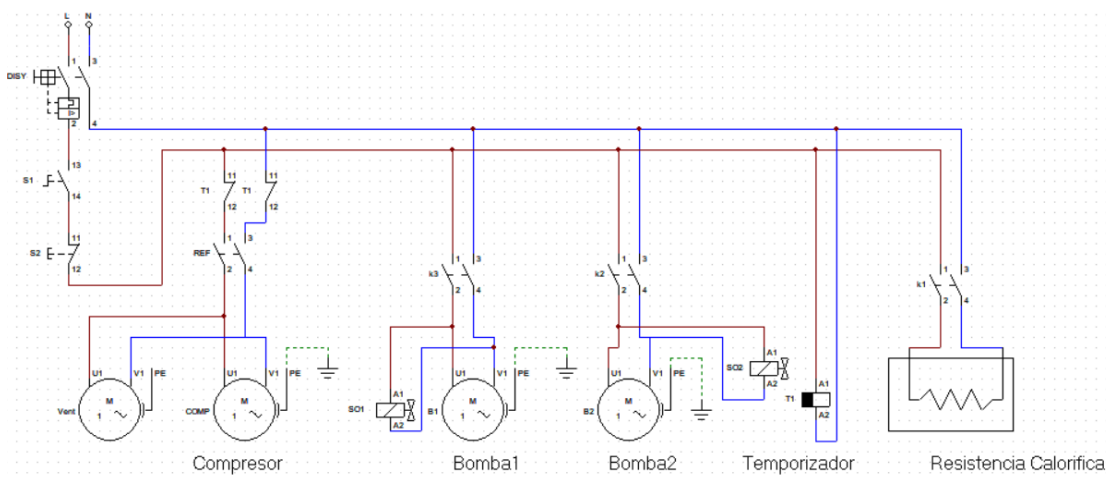
Teniendo en cuenta los equipos usados en el diseño del sistema con un controlador separado para el sistema de congelación y otro controlador para el sistema de calentamiento y de vacío se pudo determinar 3 entradas analógicas, 4 salidas digitales de las cuales dos entradas y una salida usa el controlador de refrigeración; se seleccionó el microcontrolador Arduino UNO y un display de 16 x 2 como controlador y supervisor respectivamente. Además, se usó un temporizador analógico en escala de 30 h para desactivar el sistema de congelación al terminar la etapa de desecación primaria.

- **Diagramas**

Luego de dimensionar los componentes eléctricos se realizó los diagramas tanto de fuerza como de control en los cuales podemos apreciar todos los elementos permitiéndonos una correcta instalación de los componentes

Figura 27

Diagrama del circuito de potencia



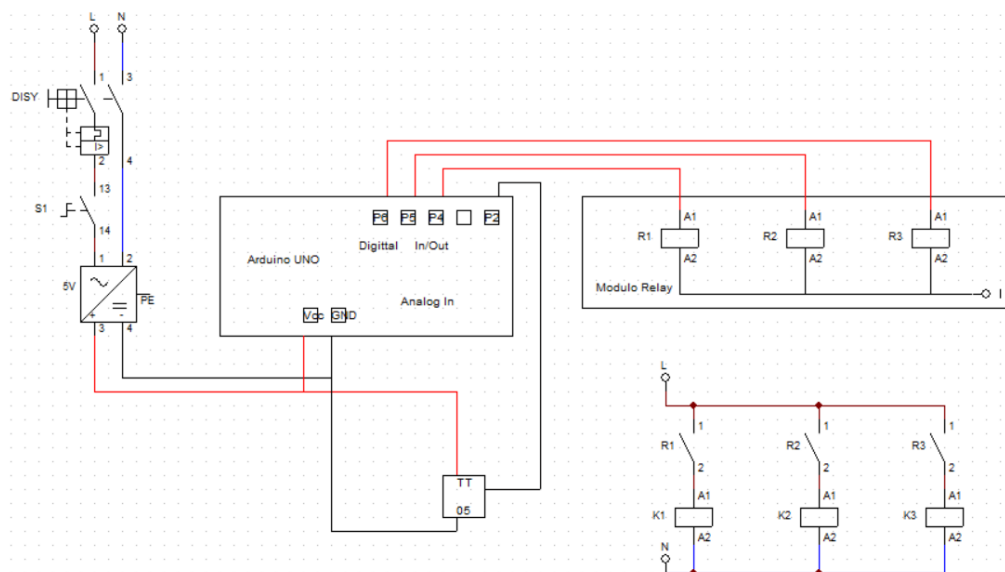
Podemos ver en la figura que se ha tomado en cuenta la conexión de dos válvulas solenoides que funcionarán en paralelo a cada una de las bombas de vacío que van iterando en periodos de tiempo las cuales se encuentran en la toma de cada bomba para que exista paso de aire solamente cuando su respectiva bomba esté

funcionando minimizando así fugas y garantizando el nivel de vacío interno, también se detalla la conexión del control eléctrico de la unidad de refrigeración en serie con un temporizador el cual nos permite desactivar el sistema de refrigeración en la última etapa o desecación secundaria en la que se activarán solamente el sistema de vacío y el sistema de calentamiento.

Se realizó también el diagrama de control tomando en cuenta un selector de dos posiciones para el encendido del equipo, una vez que enciende el controlador de refrigeración espera un minuto e inicia su operación mientras que en el display se puede ver la temperatura de la cámara el proceso en el que se encuentra y el tiempo que ha transcurrido el proceso, se implementó también un botón de paro de emergencia que desconecta todos los sistemas el controlador activa también los relays de activación de los contactores de la resistencia, bomba 1 y bomba 2, así con todas estas consideraciones se realizó el siguiente diagrama de control.

Figura 28

Diagrama del circuito de control



- **Sistema de potencia del prototipo liofilizador**

El prototipo de liofilizador propuesto trabaja con una alimentación de 110 V, el controlador de refrigeración TC-900E trabaja con una alimentación de tensión de 110 V

mientras que el microcontrolador Arduino Uno junto con el sensor de temperatura y el módulo relé necesitan de un adaptador de 110V a 5 V dc.

Figura 29

Placa del módulo Relé de 4 canales



Nota: Imagen del módulo relé de cuatro canales alimentado con 5v y activado por las salidas digitales del microcontrolador. Tomada de <https://www.profetolocka.com.ar>

Las salidas del microcontrolador Arduino Uno activan las bobinas con pulsos en alto o bajo a 5 V dc de los relays los cuales permiten el paso de la línea de fase a 110 V hacia la bobina A1 de los contactores en el lado de potencia, se usan contactores de la marca FATO de 9 A, 12 A y 12 A para la unidad de frío, resistencias y sistema de vacío respectivamente.

Figura 30

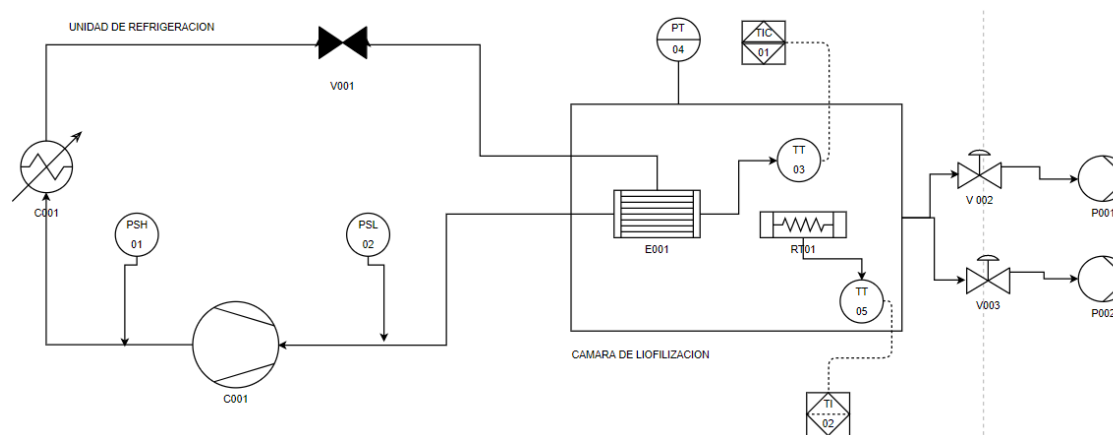
Contactador usado para la activación del sistema de refrigeración



3.8. Diagrama P&ID

Figura 31

Diagrama de tuberías e instrumentación P&ID por sus siglas en ingles



3.9. Programación

Para que las etapas de proceso se lleven a cabo correctamente se realizó la programación de manera secuencial dividida en tres procesos, la programación controla la temperatura del alimento mediante la activación y desactivación de las resistencias caloríficas y a la vez controla el tiempo de cada etapa, la programación también controla la activación del sistema de vacío dependiendo de la etapa en la que se encuentra.

Proceso 1

En el proceso 1 se procede a la congelación del producto por lo que mantiene encendido el sistema de congelación y apaga el sistema de calentamiento y de vacío hasta que la temperatura del alimento no sea menor o igual a -35°C , el proceso 1 finaliza si la temperatura del alimento llega a la indicada o en el caso de que no llegue a la temperatura indicada pasara al proceso 2 luego de transcurrir las 6 horas de congelación previstas en el diseño.

Proceso 2

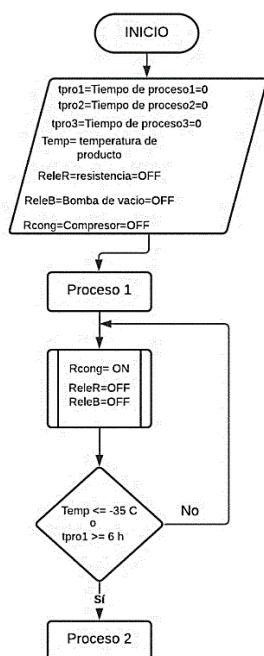
Una vez cumplido el primer proceso el alimento tendrá una temperatura de -35°C por lo que iniciará el proceso 2 donde se enciende el sistema de calentamiento del alimento hasta llegar a -15°C entonces mantendrá esa temperatura con una histéresis de -5°C

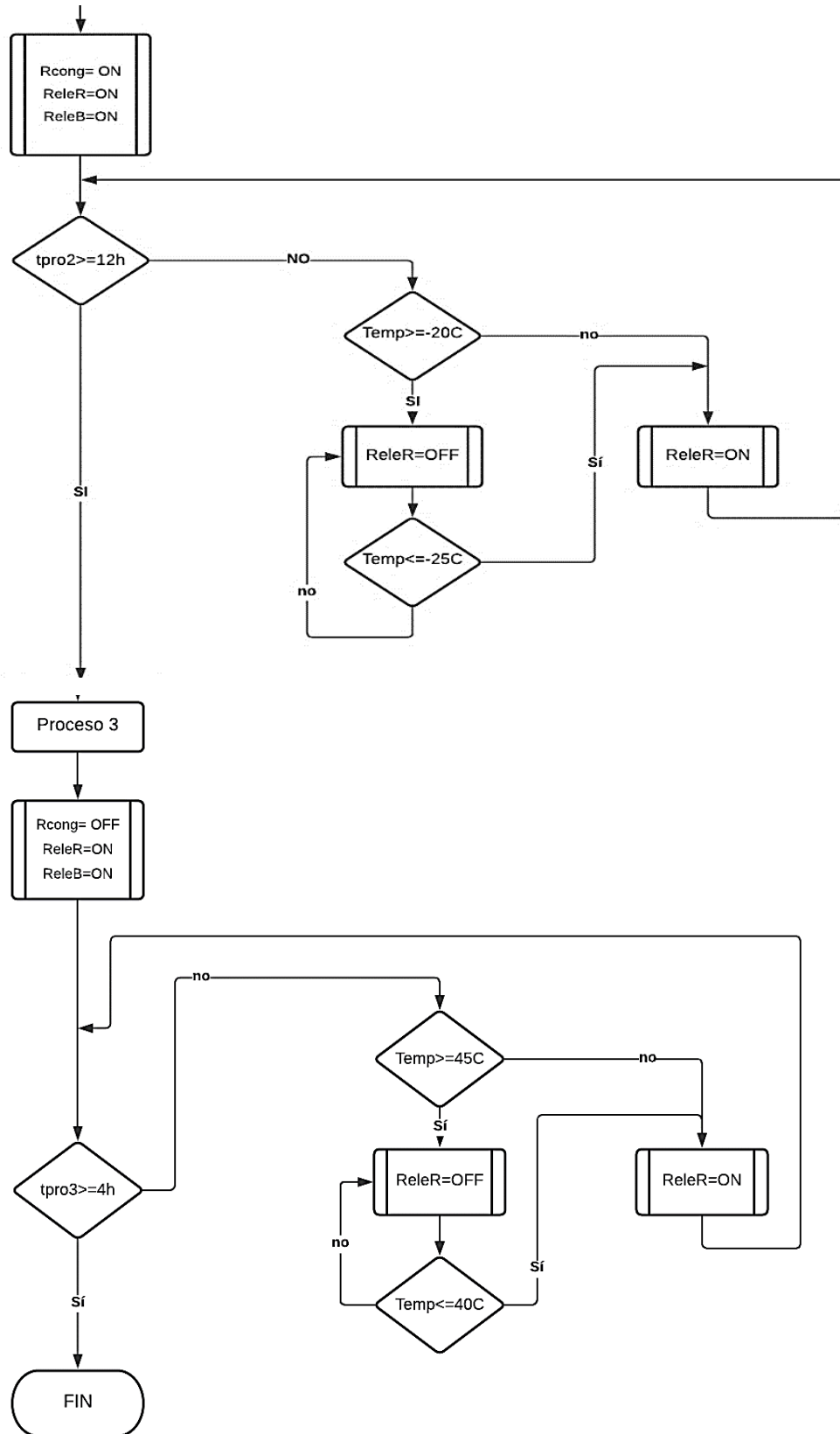
durante las horas programadas en base a los alimentos, en el proceso 2 también se activa el sistema de vacío para que mantenga una presión de vacío constante, el proceso 2 termina luego de cumplir con el tiempo establecido.

Proceso 3

Luego de completar la desecación primaria en el proceso 2 se activará el proceso 3 en el que se desactiva el sistema de congelación y se activa el sistema de calentamiento del alimento elevando la temperatura por encima de la temperatura ambiente manteniéndolo entre 35 y 40 °C para realizar la desecación secundaria, el sistema de vacío permanece activado y este proceso termina luego de cumplirse el tiempo programado.

A continuación, observamos el diagrama de flujo con todos los procesos de la programación





CAPÍTULO IV

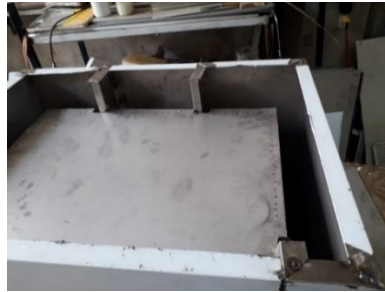
4. Construcción y montaje del sistema

4.1. Estructura y cámara de Liofilización

La cámara de liofilización se construyó en un solo cuerpo, se cortó el molde en la lámina de acero, se realizó el doblado, se unió las partes con soldadura y se armó la estructura tanto interna como externa de la cámara.

Figura 32

Estructura de la cámara de refrigeración sin poliuretano



Una vez ensamblada la estructura y soldadas las uniones se procedió a fundir el poliestireno que se expande en un solo cuerpo desde la base rodeando las paredes y hasta el techo de la estructura para que la cámara interna tenga un sellado hermético aparte a las soldaduras.

Figura 33

Fundición del poliuretano



Figura 34

Poliuretano en proceso de expansión



Luego de que se expandiera el poliuretano se dejó secar por dos días dejando que solidifique y se procedió a retirar el exceso y soldar la tapa superior, para la puerta se realizó de igual manera.

Figura 35

Construcción de la cámara de refrigeración



Una vez construida la cámara de liofilización se construyó la estructura que soporta la cámara y se acoplan los sistemas de refrigeración y de vacío.

Figura 36

Construcción de la estructura del liofilizador

**Figura 37**

Estructura y cámara de liofilización ensambladas



La cámara de liofilización tanto interna como su parte externa y la puerta son de acero inoxidable mate 304 ya que va a estar en contacto con alimentos este material nos garantiza que no exista oxidación.

La puerta es fijada a la cámara de refrigeración para empezar el proceso por medio de cuatro pernos en cada una de las esquinas, se instaló un empaque magnético para que se reduzca las fugas y se mejore la hermeticidad de la cámara.

4.2. Montaje del sistema de refrigeración

La unidad de refrigeración compuesta por el compresor y el condensador se ubicaron debajo de la cámara de liofilización en el espacio designado en la estructura, dentro de la cámara está instalado el evaporador y un ventilador, el evaporador está conectado mediante el tubo capilar que ingresa por agujero el cual posteriormente se selló rellenando con silicona y reforzando con membrana autoadhesiva pegada con calor.

Figura 38

Unidad de refrigeración



4.3. Ensamblaje del sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento está instalado en el interior de la cámara de liofilización por encima de cada bandeja a una distancia de 3 cm de separación con el alimento, la resistencia tiene una forma de serpentín con la finalidad de que el calor sea distribuido en todo el producto.

Figura 39

Resistencia calorífica



4.4. Acoplamiento del sistema de vacío

El sistema está compuesto por la bomba de vacío ubicada en la parte inferior de la cámara de liofilización, está conectado mediante una cañería la cual posee una válvula solenoide instalada en la cañería de entrada para que actúe como una llave al momento de que la bomba este apagada y se active dejando pasar el aire cuando la bomba este trabajando.

Figura 40

Bomba de vacío acoplada al sistema de liofilización



Se le agrego dentro de la cámara una extensión a la toma de la cañería para extraer el vapor generado en el alimento de forma rápida y tengamos mejores resultados.

Figura 41

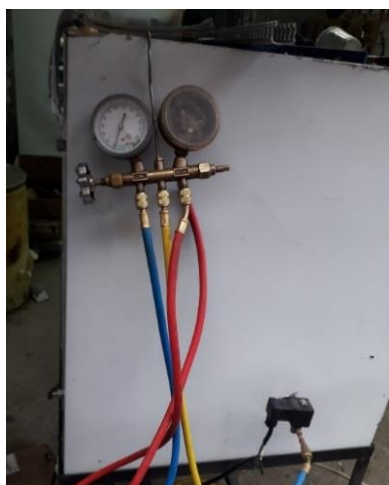
Válvula solenoide instalada en la cámara de liofilización



En el sistema de vacío se instaló un manómetro en la misma conexión de la bomba para verificar el vacío generado dentro de la cámara de liofilización

Figura 42

Manómetro y vacuómetro



4.5. Montaje del circuito de control y de potencia.

El sistema de control y de potencia fue ensamblado en un tablero de 40 x 40 cm el cual nos brinda espacio suficiente para todos los componentes anteriormente detallados en los diagramas eléctricos.

Figura 43

Construcción del tablero de control



En el exterior del tablero queda expuesto el controlador de refrigeración el cual muestra un display para verificar la temperatura y las teclas de operación para ingresar los parámetros necesarios también tenemos un selector de dos etapas para el encendido y puesta en marcha del proceso y un botón de paro de emergencia en caso de que sea necesario.

4.6. Ajustes y correcciones

En las uniones de lámina soldadas dentro de la cámara de liofilización se aplicó sello industrial para prevenir fugas, las bandejas deben ubicarse de forma que exista una separación de 8 a 10 cm tanto con la pared delantera como con la trasera para que el aire frío pueda circular de forma constante y aumente la eficacia del sistema de refrigeración.

Una vez ensamblado el sistema de acuerdo al diseño propuesto anteriormente se llevó a cabo la prueba de funcionamiento del sistema de vacío y se pudo observar

que si bien la bomba cumple con el requerimiento del nivel de vacío necesario empieza a presentar calentamiento y evaporación del aceite de lubricación debido al trabajo continuo, para evitar daños irreparables y que la bomba se funda se optó por añadir otra bomba de iguales características para que trabajen por cortos periodos de tiempo y que mientras la una trabaje la otra se enfríe y evitar que el sobre calentamiento de las mismas, la evaporación de aceite y algún daño irreparable. De esta manera se garantiza el nivel de vacío durante todo el proceso el cual puede llegar a durar entre la desecación primaria y secundaria por lo menos 16 a 18 horas para una fruta promedio.

CAPÍTULO V

5. Pruebas y resultados

5.1. Pruebas del sistema eléctrico y calibración de equipos

Una vez ensamblado todo el sistema de potencia se procede a realizar pruebas del mismo, basándonos en los diagramas del circuito de potencia (Fig. 27) y del circuito de control (Fig. 28) se revisó que el cableado sea el correcto, se realizó pruebas de continuidad por medio del multímetro para verificar que no existan desconexiones o cortocircuitos y entonces se procedió a alimentar el sistema activando los contactores verificando el encendido y apagado de los sistemas y el botón de paro de emergencia.

5.2. Pruebas de funcionamiento del sistema de refrigeración

Una vez verificado el circuito de potencia se realizó el encendido del sistema de refrigeración y el ingreso de parámetros en el controlador TC-900E estableciendo el set point en -35°C y una histéresis de 4°C sin alimentos en la cámara, se pudo verificar que se llegó a la temperatura deseada en aproximadamente 30 minutos, luego se realizó la prueba con $1/3$ de la capacidad como se puede ver en la figura 44 y el sistema tardó en llegar a la temperatura deseada alrededor de 1 hora con 10 minutos, la congelación con toda la capacidad de la cámara tardó alrededor de 3,5 horas en llegar a la temperatura deseada.

Figura 44

Manzana congelada a -35°C



Posteriormente, se encendió el microcontrolador Arduino uno para calibrar el sensor que mide la temperatura del alimento y se realizó una prueba con carga para hallar la diferencia de la medición y establecer una compensación al valor leído por el sensor del microcontrolador, según los datos del datasheet del sensor DS18B20 se sabe que en temperaturas menores a -10°C existe un error de 5°C aproximadamente, cuando el controlador de temperatura registro -35°C dentro de la cámara de refrigeración la lectura del microcontrolador tenía una diferencia de 7°C , esta diferencia se usó para restar al valor de la lectura del microcontrolador y que los dos controladores tengan la misma lectura.

Figura 45

Prueba de funcionamiento del sistema de refrigeración

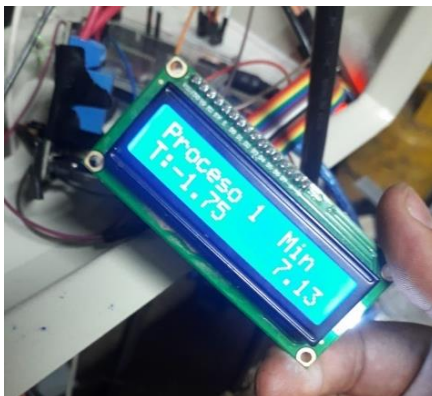


5.3. Prueba del funcionamiento del sistema en conjunto

Luego de calibrar los sensores y verificar el funcionamiento de cada uno de los subsistemas se realizó pruebas de funcionamiento del prototipo primero en vacío, con el fin de verificar el correcto funcionamiento del código implementado en el microcontrolador se implementó un display el cual muestra si está en el proceso de congelación o proceso 1, desecación primaria o proceso 2 y desecación secundaria o proceso 3, la temperatura del alimento en $^{\circ}\text{C}$ y el tiempo en minutos que ha transcurrido en cada proceso.

Figura 46

Pruebas de funcionamiento de la programación

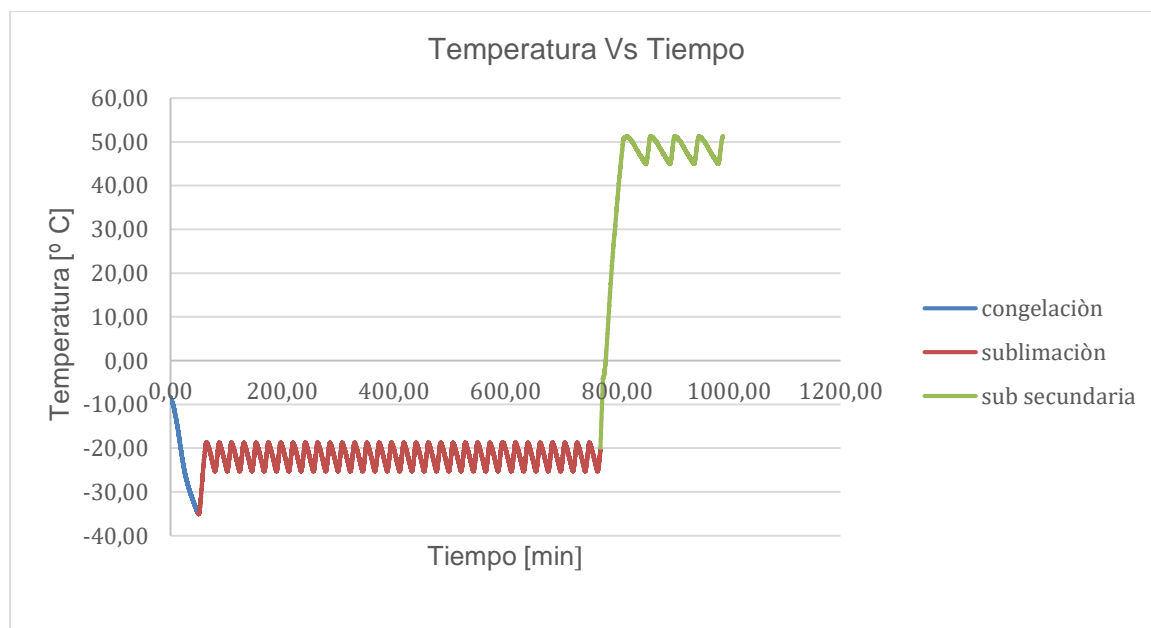


5.4. Liofilización de frutas

Como se observa en la figura 47, se registró la medición temperatura en un archivo Excel por medio del puerto serial del controlador y del nivel de vacío en función del tiempo mediante la lectura analógica del vacuómetro, se graficaron los datos obtenidos y se verificó que cumplan con la curva de liofilización.

Figura 47

Curva Temperatura vs tiempo real de proceso



En la gráfica se puede observar la curva de la temperatura del alimento durante el proceso de liofilización, (de color azul) la congelación llega a -35°C y pasa a la desecación primaria o sublimación (de color rojo) en la cual se le agrega calor y su temperatura se mantiene entre los -20°C y -25°C , en la desecación secundaria (de color verde) se apaga el sistema de refrigeración y se eleva la temperatura entre 45°C y 50°C .

Figura 48

Curva Presión vs tiempo real del proceso



En la figura 49, se observa el funcionamiento del sistema de vacío durante la desecación primaria (de color rojo) y secundaria (de color verde), en estas etapas el sistema de vacío trabaja permanentemente a -24 in Hg.

Figura 49

Medición del nivel de vacío en funcionamiento



El vacío último que se pudo generar dentro de la cámara de liofilización fue -24 in Hg debido a factores como la eficiencia de la bomba, la altitud de la ciudad en la que trabaja el prototipo (2800 msnm) y a las posibles fugas que pueda tener la cámara.

5.5. Pruebas organolépticas de las frutas y vegetales

Se implementaron las pruebas sensoriales como método de comprobación de la conservación de propiedades organolépticas como color, olor, sabor y textura; estas pruebas dependen del nivel de sensibilidad de los jueces, se obtienen resultados estadísticos confiables para la obtención de conclusiones.

Se realizó la liofilización de remolacha, uvilla, aguacate y pimiento, una vez liofilizado el producto se realizó las pruebas sensoriales con 10 jueces, se asignó a cada juez una muestra de referencia de fruta fresca y las muestras codificadas con un número de 3 dígitos aleatorios en nuestro caso 582 para la muestra 1 (M1), 657 para la muestra 2 (M2) y 351 para la muestra 3 (M3), la estadística se hizo en base a la encuesta del anexo 2, los jueces debían probar una de las muestras codificadas, calificarlas y luego enjuagarse con agua entre muestra y muestra.

Una vez finalizadas todas las pruebas se realizó la tabulación de los resultados para realizar la normalización de los datos y el análisis probabilístico mostrado a continuación.

Figura 50

Fruta liofilizada



5.6. Tabulación de resultados

5.6.1. Prueba con remolacha

- Prueba de sabor

Tabla 16

Prueba de sabor remolacha

Prueba de sabor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	4	3	3
J2	2	4	4
J3	2	3	4
J4	3	2	1
J5	3	4	4
J6	4	3	4
J7	4	4	3
J8	4	4	5
J9	3	4	4
J10	3	3	2

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 17

Análisis de varianza de un factor (sabor)

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,874104215	0,687410421	0,01560144
Columna 2	10	7,17513421	0,717513421	0,00300216
Columna 3	10	6,919861705	0,691986171	0,01431697

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,005262562	2	0,002631281	0,2397845	0,788455048	2,510608667
Dentro de los grupos	0,296285144	27	0,010973524			
Total	0,301547706	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 17 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.1$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al sabor.

- **Prueba de olor**

Tabla 18

Prueba de olor remolacha

Prueba de olor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	4	3
J2	2	4	4
J3	3	3	2
J4	4	4	4
J5	4	2	3
J6	3	3	4
J7	4	4	4
J8	3	3	3
J9	4	3	4
J10	2	3	4

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 19*Análisis de varianza datos olor (remolacha)*

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,78901338	0,678901338	0,01003901
Columna 2	10	6,965104639	0,696510464	0,00607199
Columna 3	10	7,214982112	0,721498211	0,0055148

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,009163208	2	0,004581604	0,6355747	0,537370759	3,354130829
Dentro de los grupos	0,194632213	27	0,0072086			
Total	0,203795421	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 19 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al olor.

- Prueba de color

Tabla 20*Prueba de color (remolacha)*

	Prueba de color		
	Muestras Liofilizadas		
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	4	4	4
J2	3	5	5
J3	4	4	3
J4	4	5	5
J5	4	3	4
J6	4	4	5
J7	4	4	5
J8	3	4	4
J9	5	4	5
J10	4	4	5

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 21*Análisis de varianza de un factor color (remolacha)*

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	10	6,712587526	0,671258753	0,00366106
Columna 2	10	6,934436276	0,693443628	0,00265752
Columna 3	10	7,322076328	0,732207633	0,00215963

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,019031943	2	0,009515971	3,36721193	0,049479044	4,004092573
Dentro de los grupos	0,076303847	27	0,002826068			
Total	0,203795421	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 21 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H_0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.03$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al color.

- **Prueba de textura**

Tabla 22

Prueba de textura remolacha

Prueba de textura			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	5	3	2
J2	4	4	5
J3	5	3	3
J4	4	4	4
J5	4	2	4
J6	5	4	3
J7	4	3	3
J8	4	3	4
J9	5	2	4
J10	4	3	4

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 23

Análisis de varianza de un factor textura remolacha

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	7,850023367	0,785002337	0,0056175
Columna 2	10	6,235629641	0,623562964	0,0066821
Columna 3	10	6,883447122	0,688344712	0,00870999

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,132006808	2	0,066003404	9,42475467	0,000785946	3,354130829
Dentro de los grupos	0,189086291	27	0,007003196			
Total	0,321093099	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 23 podemos observar que el valor crítico para F es menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es menor a $\alpha = 0.05$ rechazando la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto a la textura.

5.6.2. Prueba con pimiento

- **Prueba de sabor**

Tabla 24*Prueba de sabor Pimiento*

Prueba de sabor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	3	3
J2	4	4	4
J3	3	3	4
J4	3	3	2
J5	3	4	4
J6	3	3	4
J7	3	4	3
J8	4	4	4
J9	3	4	4
J10	3	3	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 25

Análisis de varianza de un factor (sabor)

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,756873411	0,675687341	0,00190034
Columna 2	10	7,131689621	0,713168962	0,0017005
Columna 3	10	7,080537098	0,70805371	0,00355942

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,008262065	2	0,004131033	1,73081737	0,196219665	3,354130829
Dentro de los grupos	0,064442316	27	0,002386752			
Total	0,072704381	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 25 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al sabor del pimiento liofilizado.

- Prueba de olor

Tabla 26*Prueba de olor pimienta*

Prueba de olor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	4	3
J2	3	4	5
J3	3	3	4
J4	3	4	4
J5	4	3	3
J6	3	4	4
J7	4	3	4
J8	3	3	4
J9	4	3	4
J10	3	3	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 27*Análisis de varianza datos olor (pimiento)*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,749165478	0,674916548	0,00411796
Columna 2	10	6,874104215	0,687410421	0,00313734
Columna 3	10	7,345830437	0,734583044	0,00254317

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,019804813	2	0,009902407	3,03182246	0,064889733	3,354130829
Dentro de los grupos	0,088186225	27	0,003266156			
Total	0,107991038	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 27 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al olor del pimiento.

- **Prueba de color**

Tabla 28

Prueba de color (pimiento)

Prueba de color			
	Muestras Liofilizadas		
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	3	3
J2	4	3	3
J3	3	3	2
J4	4	4	3
J5	3	4	4
J6	3	3	3
J7	3	4	4
J8	2	3	3
J9	4	3	3
J10	2	3	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 29

Análisis de varianza de un factor color (pimiento)

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,906407552	0,690640755	0,00376151
Columna 2	10	6,85525503	0,685525503	0,00652062
Columna 3	10	7,207437548	0,720743755	0,00158524

**ANÁLISIS DE
VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,007242272	2	0,003621136	0,91540189	0,412424718	3,354130829
Dentro de los grupos	0,106806284	27	0,003955788			
Total	0,114048556	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 29 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al color del pimiento, sin embargo hay que aclarar que muchas de las muestras mantuvieron el color solamente en cuanto a su cascara ya que la mayor parte de su contenido es agua como lo podemos ver en la figura 51.

Figura 51
Pimiento liofilizado


- Prueba de textura

Tabla 30*Prueba de textura en pimientos*

Prueba de textura			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	2	4	2
J2	2	3	2
J3	2	3	1
J4	1	4	2
J5	2	4	2
J6	1	3	2
J7	1	4	1
J8	2	3	1
J9	2	4	1
J10	2	3	2

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 31*Análisis de varianza de un factor textura pimiento*

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	5,993811288	0,599381129	0,01438797
Columna 2	10	9,282507549	0,928250755	0,00744266
Columna 3	10	5,692781293	0,569278129	0,01400188

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,793075892	2	0,396537946	33,1992842	5,29441E-08	3,354130829
Dentro de los grupos	0,322492632	27	0,011944172			
Total	1,115568523	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 31 podemos observar que el valor crítico para F es menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H_0) se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es menor a $\alpha = 0.05$ rechazando la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto a la textura del pimiento, la muestra liofilizada como se puede apreciar en la figura 52 perdió la mayoría de su composición la cual es mayormente agua y por esta razón su textura cambio radicalmente.

5.6.3. Prueba con uvilla

- Prueba de sabor

Tabla 32

Prueba de sabor Uvilla

Prueba de sabor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	4	4	4
J2	5	4	4
J3	4	5	4
J4	3	4	3
J5	4	4	4
J6	4	5	4
J7	3	4	4
J8	4	4	3
J9	5	5	4
J10	4	4	5

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 33

Análisis de varianza de un factor (sabor)

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,906407552	0,690640755	0,00200675
Columna 2	10	7,253195039	0,725319504	0,00166023
Columna 3	10	6,809497539	0,680949754	0,00207086

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,010884019	2	0,00544201	2,84532858	0,075629552	3,354130829
Dentro de los grupos	0,051640525	27	0,001912612			
Total	0,062524545	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 33 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al sabor de la Uvilla.

- **Prueba de olor**

Tabla 34*Prueba de olor Uvilla*

Prueba de olor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	4	5	4
J2	4	4	5
J3	4	4	5
J4	4	5	5
J5	5	3	4
J6	4	4	5
J7	5	4	4
J8	4	5	4
J9	4	4	4
J10	3	4	4

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 35*Análisis de varianza datos olor (Uvilla)*

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	10	6,851143785	0,685114378	0,00331923
Columna 2	10	6,948053798	0,69480538	0,00316544
Columna 3	10	7,169902547	0,716990255	0,00169672

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,005340519	2	0,002670259	0,97914591	0,388576132	3,354130829
Dentro de los grupos	0,073632545	27	0,002727131			
Total	0,078973064	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 35 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al olor de la Uvilla.

- **Prueba de color**

Tabla 36

Prueba de color (Uvilla)

Prueba de color			
	Muestras Liofilizadas		
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	4	4	3
J2	3	4	4
J3	3	4	3
J4	3	3	3
J5	3	4	4
J6	4	4	3
J7	3	3	4
J8	3	4	4
J9	4	4	4
J10	4	4	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 37

Análisis de varianza de un factor color (Uvilla)

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	10	6,781468816	0,678146882	0,00279433
Columna 2	10	7,281223762	0,728122376	0,00117554
Columna 3	10	6,906407552	0,690640755	0,00377716

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,013528396	2	0,006764198	2,61940299	0,091263057	3,354130829
Dentro de los grupos	0,069723273	27	0,002582343			
Total	0,083251669	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 37 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al color de la Uvilla.

- **Prueba de textura**

Tabla 38

Prueba de textura en Uvilla

Prueba de textura			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	5	3	2
J2	4	2	3
J3	3	3	1
J4	4	1	2
J5	5	1	2
J6	4	2	2
J7	5	3	1
J8	4	1	1
J9	5	2	1
J10	5	3	2

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 39

Análisis de varianza de un factor textura Uvilla

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	9,645225458	0,964522546	0,00880271
Columna 2	10	6,076589222	0,607658922	0,0253371
Columna 3	10	5,24728545	0,524728545	0,0208085

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1,092159522	2	0,546079761	29,814186	1,46217E-07	3,354130829
Dentro de los grupos	0,494534835	27	0,018316105			
Total	1,586694357	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 39 podemos observar que el valor crítico para F es menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es menor a $\alpha = 0.05$ rechazando la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto a la textura de la Uvilla.

5.6.4. Prueba con Aguacate

- Prueba de sabor

Tabla 40*Prueba de sabor Aguacate*

Prueba de sabor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	4	4
J2	4	3	3
J3	4	4	4
J4	3	4	3
J5	4	4	4
J6	4	4	3
J7	3	4	4
J8	4	4	3
J9	4	5	4
J10	4	4	4

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 41*Análisis de varianza de un factor (sabor)*

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	10	6,91575046	0,691575046	0,00294587
Columna 2	10	7,262537946	0,726253795	0,00137107
Columna 3	10	6,790811724	0,679081172	0,00198897

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,011946563	2	0,005973281	2,84175219	0,075853303	3,354130829
Dentro de los grupos	0,056753223	27	0,002101971			
Total	0,068699785	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 41 podemos observar que el valor crítico para F es mayor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H_0) no se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es mayor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto al sabor del Aguacate.

- **Prueba de olor**

Tabla 42

Prueba de olor Aguacate

Prueba de olor			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	4	4
J2	4	4	4
J3	3	5	3
J4	2	4	3
J5	2	3	4
J6	3	5	1
J7	3	4	3
J8	4	4	4
J9	4	3	4
J10	3	5	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 43

Análisis de varianza datos olor (Aguacate)

RESUMEN					
	<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1		10	6,525518384	0,652551838	0,0064028
Columna 2		10	7,793124625	0,779312462	0,01216362
Columna 3		10	6,650457121	0,665045712	0,01986348

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,097604143	2	0,048802072	3,80969451	0,034881803	3,354130829
Dentro de los grupos	0,345869184	27	0,01280997			
Total	0,443473327	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 43 podemos observar que el valor crítico para F es ligeramente menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es de 0.034 menor que $\alpha = 0.05$, estos valores nos dicen que la muestra liofilizada no es igual a la fruta fresca en cuanto al olor y es debido a que el Aguacate no posee un olor muy característico y después del proceso de liofilización este tiende a reducirse.

- **Prueba de color**

Tabla 44

Prueba de color (Aguacate)

	Prueba de color		
	Muestras Liofilizadas		
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	3	4	3
J2	3	5	4
J3	3	4	3
J4	3	5	2
J5	2	4	4
J6	4	5	3
J7	3	3	2
J8	3	4	3
J9	2	4	4
J10	4	4	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 45*Análisis de varianza de un factor color (Aguacate)*

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	6,442225893	0,644222589	0,00829364
Columna 2	10	7,959709607	0,795970961	0,0019222
Columna 3	10	6,56716463	0,656716463	0,00869648

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,141918267	2	0,070959134	11,2560169	0,000278494	3,354130829
Dentro de los grupos	0,170210887	27	0,006304107			
Total	0,312129154	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 45 podemos observar que el valor crítico para F es menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H0) se rechaza, otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es menor a $\alpha = 0.05$ lo que confirma la hipótesis de que la muestra liofilizada es diferente a la muestra fresca en cuanto al color del Aguacate, después del proceso de liofilización el producto sufrió un poco de oxidación superficial lo que hace que cambie su color.

- **Prueba de textura**

Tabla 46*Prueba de textura en Aguacate*

Prueba de textura			
Muestras Liofilizadas			
	M1(582)	M2(657)	M3(351)
J1	5	3	4
J2	4	4	3
J3	4	3	3
J4	4	3	4
J5	5	3	3
J6	4	3	3
J7	5	3	4
J8	4	2	4
J9	4	3	3
J10	4	3	3

Análisis de varianza de clasificación simple

Tabla 47*Análisis de varianza de un factor textura Aguacate*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10	7,866910839	0,786691084	0,00097687
Columna 2	10	6,275640911	0,627564091	0,00412112
Columna 3	10	6,82654838	0,682654838	0,00318442

Tabla ANOVA

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,130599769	2	0,065299884	23,6525001	1,16056E-06	3,354130829
Dentro de los grupos	0,074541671	27	0,002760803			
Total	0,20514144	29				

Análisis de tabla ANOVA

Según los resultados de la tabla 47 podemos observar que el valor crítico para F es menor que el valor de F calculado por lo cual la hipótesis nula (H_0) se rechaza otro factor para analizar es el valor de P (probabilidad) es menor a $\alpha = 0.05$ rechazando la hipótesis de que la muestra liofilizada es igual a la muestra fresca en cuanto a la textura del Aguacate.

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un sistema de deshidratación de frutas y verduras mediante liofilización para conservación de las propiedades organolépticas, mediante el control de las variables de temperatura y presión en cada fase del proceso según recomienda Orrego en su libro "Congelación y liofilización de alimentos" y deben ser: en la etapa de congelación a una temperatura de -35°C y una presión atmosférica, en la desecación primaria se le agrega calor al producto llegando a una temperatura no mayor a -10°C y se debe mantener una presión de vacío menor a 610 Pa, para la desecación secundaria y última etapa la temperatura del producto se eleva sin sobrepasar los 60°C a una presión de vacío menor a los 610 Pa.
- Se dimensionó el sistema eléctrico, para el subsistema de refrigeración se usó un controlador de temperatura Full Gauge TC-900E que activa la unidad de refrigeración de 3/8 de Hp junto al evaporador y un ventilador que extraen el calor de la cámara de trabajo, para los subsistemas de vacío y de calentamiento se usó un microcontrolador Arduino Uno el cual controla las resistencias de 60 W que calientan el producto y la bomba de vacío de 9 CFM acorde a la programación para cada una de las etapas de liofilización.
- Se realizó el modelamiento del prototipo en un software CAD para establecer las dimensiones de la cámara interior de 60 cm de ancho, 50 cm de alto y 50 cm de profundidad para una capacidad de 3 bandejas y 10 lbm de producto fresco con un aislante de 10 cm de poliuretano expandido para lograr compactar en una sola estructura la cámara de trabajo que fabricada en acero inoxidable MATE 304 de 1mm de espesor, toda la cámara de trabajo esta sobre una estructura de ángulo de acero A36, perfil AL 25 X 4. Luego se realizó el análisis del diseño por medio de un software CAE midiendo las tensiones de Von mises máximas con la cámara sometida a la presión de vacío verificando que el prototipo sea seguro.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento de los subsistemas verificando que el congelamiento llega a -35°C entre 2 a 5 horas dependiendo de la carga de

producto, el subsistema de calentamiento eleva el producto de -35°C a -20°C en 15 minutos, el subsistema de vacío mantiene una presión negativa de -24 in Hg durante todo del proceso, y en la última etapa se calienta el producto de -20°C a 50°C en 50 minutos manteniendo una presión de vacío de -24 in Hg.

- Se evaluó el resultado del proceso de liofilización mediante pruebas sensoriales analíticas duo-trio y mediante estimación de magnitud con 10 jueces y con tres muestras a evaluar una de producto fresco y dos de liofilizado, en la remolacha, pimiento, uvilla se mantuvieron el sabor, olor y color mientras que la textura si cambio, en cuanto al aguacate mantuvo solamente su sabor, pero el olor, color y textura cambiaron.

7. Recomendaciones

- Para el subsistema de congelación es vital el uso de un ventilador dentro de la cámara para que exista un enfriamiento por aire forzado y se pueda obtener un congelamiento homogéneo en todo el producto, también el uso de un evaporador para que el congelamiento sea más rápido y se llegue a la temperatura necesaria en lugar de un serpentín.
- Se recomienda el uso de una bomba de vacío de alta eficiencia y con capacidad de uso prolongado ya que si bien la bomba usada para el proyecto fue correctamente dimensionada el uso continuo durante varias horas genera el calentamiento excesivo de la misma por lo que se optó por usar dos bombas en paralelo que van iterando para evitar un daño irreversible y garantizar el nivel de vacío dentro de la cámara.
- Para futuros proyectos se recomienda implementar una trampa de vapor también llamada cámara de condensación, la cual evita daños en la bomba de vacío y que el producto sea rehidratado por la circulación del vapor y la condensación dentro de la cámara de trabajo.
- La implementación de una HMI (Interfaz humano maquina) para la gestión de recetas y fácil cambio de parámetros debe ser tomado como un nuevo trabajo de investigación para el mejoramiento del prototipo.

8. Bibliografía

- A.cengel, Y., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa Fundamentos y aplicaciones*. Mexico: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Congote, P. A. (2010). Entrenamiento del panel sensorial de la compañía de galletas NOEL S.A en pruebas discriminativas y descriptivas. *Caldas: Corporación Universitaria Lasallista*.
- Espinosa, J. (2007). *Evaluación sensorial de los alimentos*. Cuba: Editorial Universitaria.
- García, C. R. (2018). liofilización de frutillas enteras (fragaria ananassa duch): efecto de micro-perforaciones realizadas con tecnología laser de CO2 en el tiempo de secado primario . *Valparaiso-Chile: Universidad Técnica Federico Santa María* .
- Grajales-Agudelo, L. M., Cardona-Perdomo, W. A., & Orrego-Alzate, C. E. (2005). *Liofilización de carambola (Averrhoa carambola L.)*. Ingeniería y Competitividad, Volumen 7(1), 20. doi: 291323478003.
- Lopez, J. C. (2004). *Robotica Educativa Nivel Secundario* .
- López, P., & Padilla, D. (2012). Diseño y construcción de un equipo hidrosolubilizador automatico de extractos botánicos para el manejo agronomico por medio de liofilización para el laboratorio de fitoquímica del IASA 1. *Sangolquí: UFA ESPE*.
- Molina, R. M., & Rodríguez, O. A. (2008). Diseño y construcción de un liofilizador piloto para el estudio de proceso de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío . *Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander* .
- Orrego, C. E. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. Manizales: Artes Gráficas Tizan Ltda.
- Orrego-Alzate, C. E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- PRODAO-, P. d.-P.-P. (s.f.). *Alternativas de aplicación del proceso de liofilización en frutas y hortalizas compatible con la normativa orgánica* . PRODAO.
- Ramirez-Navas, J. S. (2006). *Liofilización de alimentos* . ReCiTeIA , 20-23.
- Suarez, B., & Yupangui, A. (2016). Diseño y construcción de un liofilizador para preservar las características nutritivas de las frutas de la región. *Latacunga : UFA ESPE-L*.

Anexos