

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE
DESHIDRATACIÓN AUTOMÁTICO DE FRUTAS Y VERDURAS MEDIANTE LIOFILIZACIÓN
PARA CONSERVACIÓN DE SUS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS**

**Elaborado por:
CORONEL MENDOZA, ERICK ARMANDO**

**Director del Proyecto:
ING. LÓPEZ ORTEGA, JESSENIA ESTEFANÍA**



- Antecedentes
- Justificación e Importancia
- Objetivos
- Fundamento Teórico
- Diseño del Prototipo
- Construcción y montaje
- Pruebas y Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Trabajos futuros

ANTECEDENTES

Liofilizadores comerciales



Liofilizador Harvestright



Liofilizador piloto LyoEpic



Liofilizador Industrial KEMOLO FD-10

ANTECEDENTES



Trabajos realizados en la Universidad



Diseño y construcción de un liofilizador para preservar las características nutritivas de las frutas de la región.



Diseño y construcción de un prototipo hidrosolubilizador automatizado de extractos botánicos para el manejo agronómico por medio de liofilización para el laboratorio de fitoquímica del IASA 1



JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA



Mediante el presente proyecto se busca investigar sobre el proceso de liofilización y construir un prototipo la capacidad aproximada de liofilizadores piloto comerciales, con la misma calidad y menor costo.



Liofilizador LyoLaB marca
CoolVacuum



Objetivo General



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



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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.

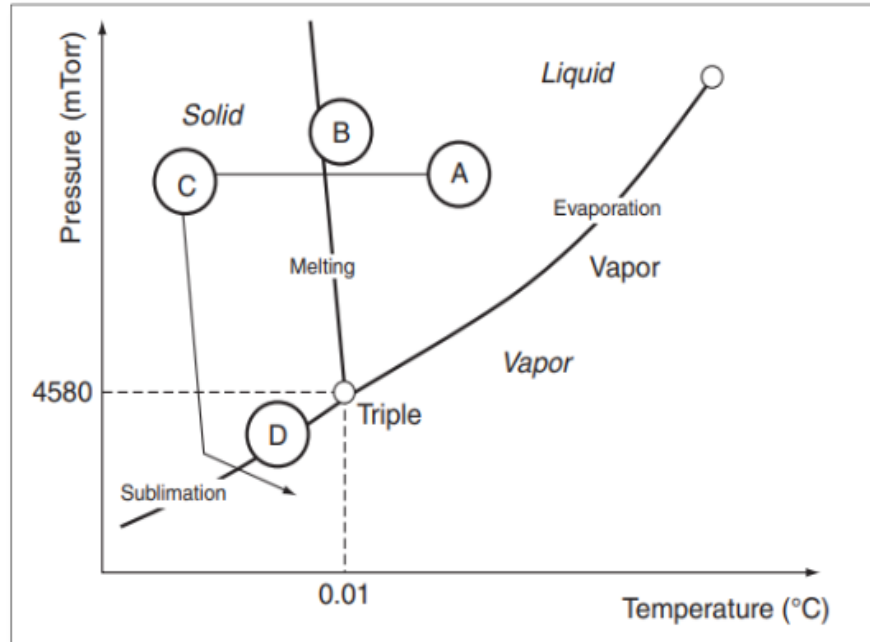
–Dimensionar el sistema eléctrico y de control de las variables de temperatura, presión y tiempo para que el sistema cumpla con la curva de temperatura de congelamiento, sublimación y calentamiento para su correcta deshidratación.

Dimensionar 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.





A : Estado Inicial (15 ° C)- Pa

B: Congelación

C : Sólido (-35 ° C)

D: Reducción de presión

Sublimación

Diagrama de fases del agua y pasos para la sublimación

DISEÑO MECATRÓNICO

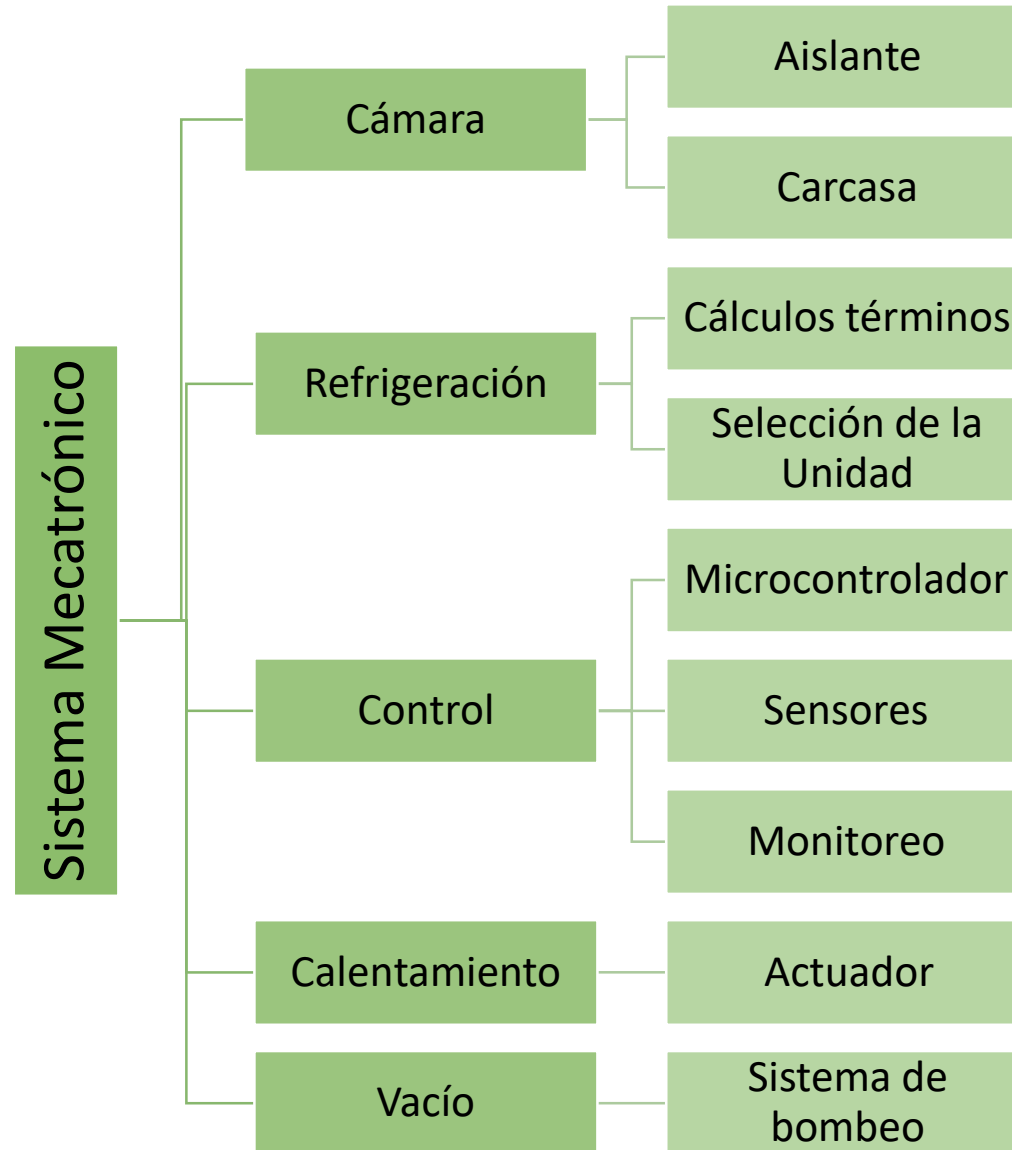
No	Nivel	Requerimientos para el equipo.
1	Requerimientos	El sistema debe ser capaz de mantener el alimento dentro de las condiciones de congelación, calentamiento y presión de vacío dentro de la cámara.
2	Diseño Preliminar del sistema	El sistema estará compuesto por una cámara de trabajo donde se ubicara el sistema de bandejas, sistema de calentamiento y el sistema de congelación, también deberá tener un sellado hermético.
3	Diseño específico	La estructura debe ser diseñada de tal manera que soporte el vacío generado, mantenga la temperatura de congelación y de calentamiento.
4	Integración del sistema	El sistema integrará la parte mecánica con la parte electrónica, dentro de la cámara de trabajo existen sensores de temperatura, resistencias caloríficas y un ventilador y fuera de la cámara el sistema de congelación (compresor y condensador) y el sistema de bombeo.
5	Modelado y Análisis del modelo	Se procederá a realizar una simulación previa de todo el sistema para comprobar que el prototipo no falle por rigidez.
6	Pruebas	Se realizaran pruebas de funcionamiento de cada una de los subsistemas y pruebas de liofilización de alimentos.
7	Producto	El prototipo estará terminado y listo para ser puesto en marcha.



Especificaciones Técnicas de Diseño

Carga del producto:	10 lb
Superficie útil de carga por placa:	1800cm 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

DISEÑO DE SUBSISTEMAS



Diseño

Se selecciona según su configuración geométrica:

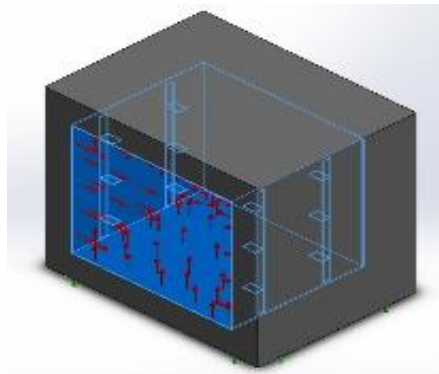
- Sistema de cámara Rectangular

Según la ubicación del sistema de condensación

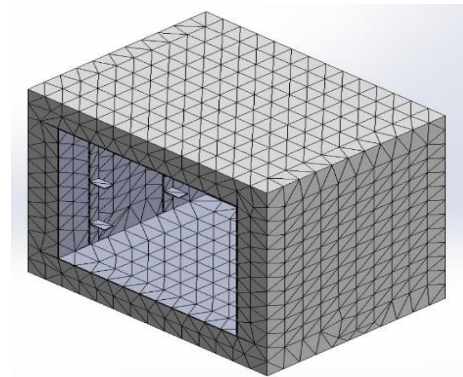
- Sistema de cámara simple

Análisis estructural

Aplicación de vacío cada pared



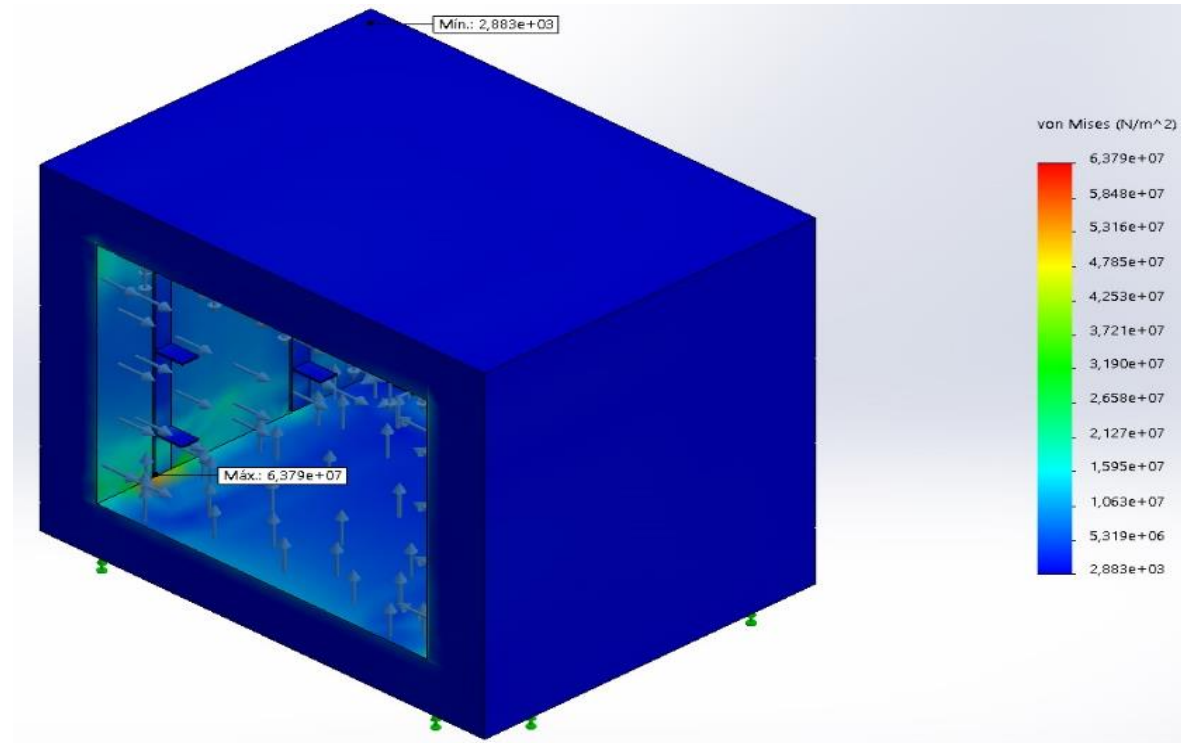
Mallado del modelo



SUBSISTEMA CÁMARA



Obtención de esfuerzos



$$n_s = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

$$n_s = \frac{415 \text{ MPa}}{63,79 \text{ MPa}}$$

$$n_s = 6,5$$



Cálculo de cargas por superficies

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

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

- Cálculo del calor sensible cedido por encima del punto de congelación

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

- Cálculo del calor sensible por debajo del punto de congelación

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

- Cálculo del calor latente de congelación

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

- Cálculo del calor de respiración del producto

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

SUBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN



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



Obtenemos una carga total del sistema de :

$$627,34 \text{ Btu/h}$$

Los que representan :

$$0,26 \text{ hp}$$

Para seleccionar una unidad de refrigeración consideramos un sistema con perdidas del 30 % al 50 %

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

Por lo que seleccionamos una unidad de refrigeración de $3/8 \text{ hp}$ marca Cubigel MLT90LD, fabricación española para un refrigerante R404 A



Controladores

TC-900E de marca Full Gauge



Microcontrolador Arduino UNO



Sensor

Sensor de temperatura DS18B20



Característica	Valor
Voltaje de alimentación	De 3 V a 5,5 V DC
Rango de temperaturas	-55 ° C a 125 ° C
Error (-10 ° C a 85 ° C)	$\pm 0,5$ ° C
Error (-55 ° C a -10 ° C)	± 2 ° C
Resolución programable	9-bit, 10-bit, 11-bit o 12-bit (default)
Protocolo	One-wire

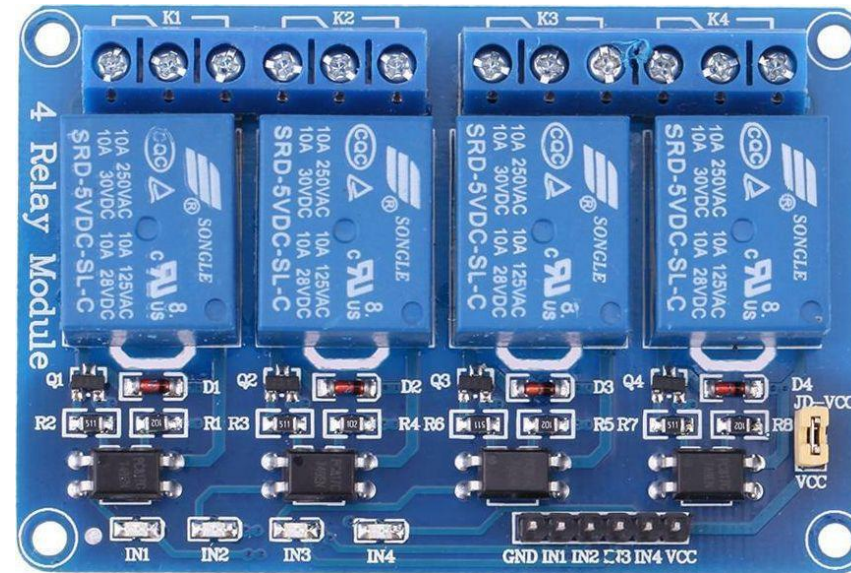
SUBSISTEMA DE CONTROL



Modulo relé de 4 canales

Modulo con alimentación 5 Vdc

Maneja corrientes de hasta 10 A a 250 Vac y 30 Vdc



Fuente de poder

Dispositivo	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Cantidad
Módulo relé 4 C	5	80	1
Display 16 x 2	5	16	1
sensor Ds18B20	5	1,5	1
Total	5	97,5	

Asumiendo un factor de seguridad de 2 para demanda de corrientes pico, se obtiene el requerimiento de la fuente de poder

Voltaje [V]	Corriente [mA]	Factor de Seguridad [mA]	Potencia [W]
5	200	2	1

Fuente de poder 5 V – 1A



Diagrama electrónico

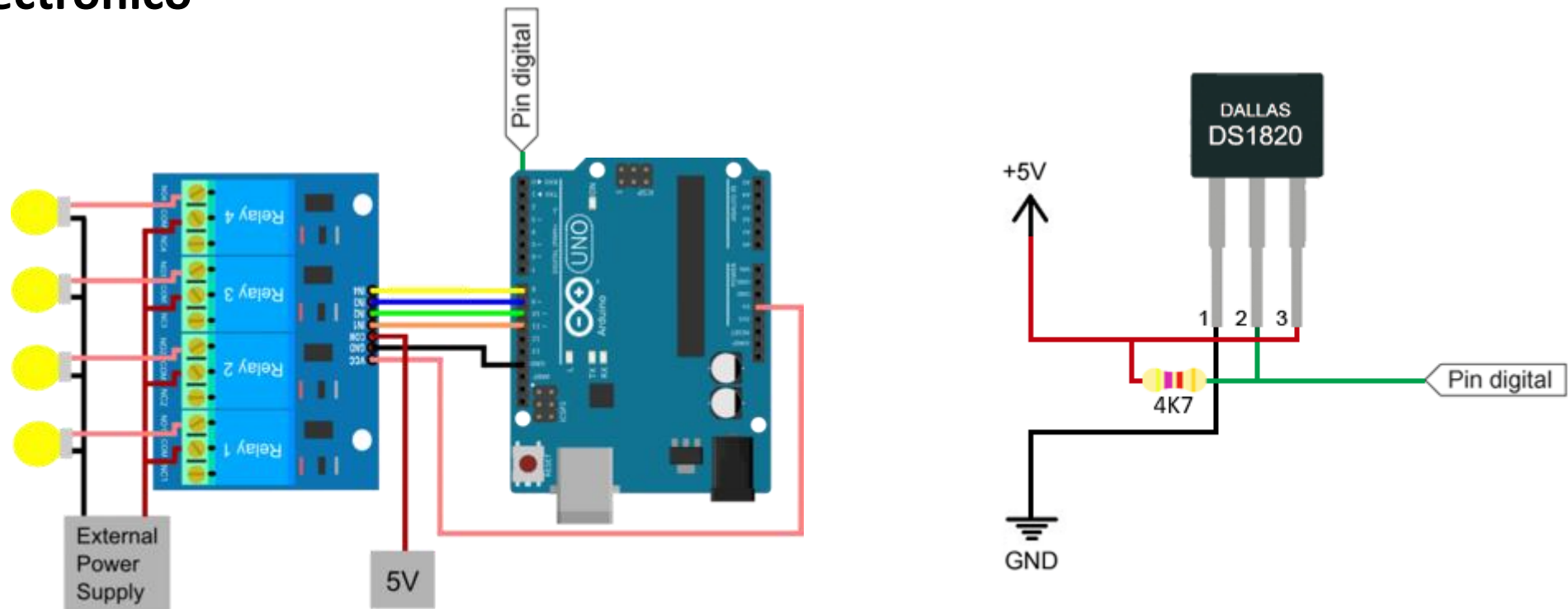
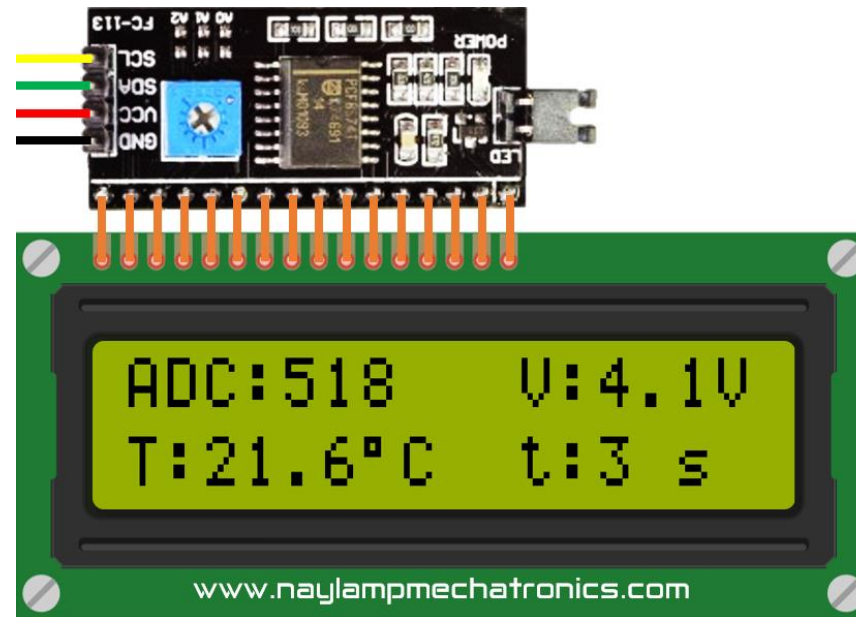
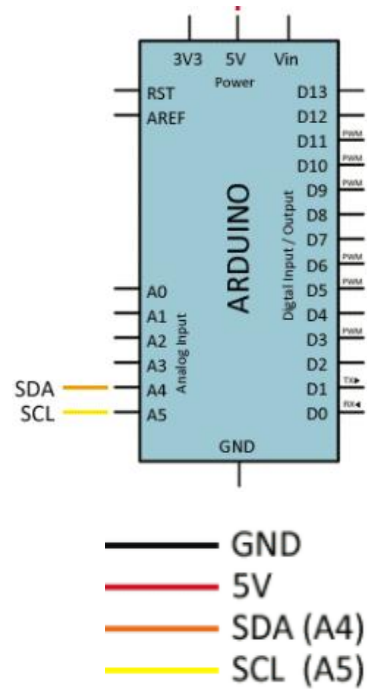


Diagrama de conexión de módulo relé y sensor de temperatura

Monitoreo de datos

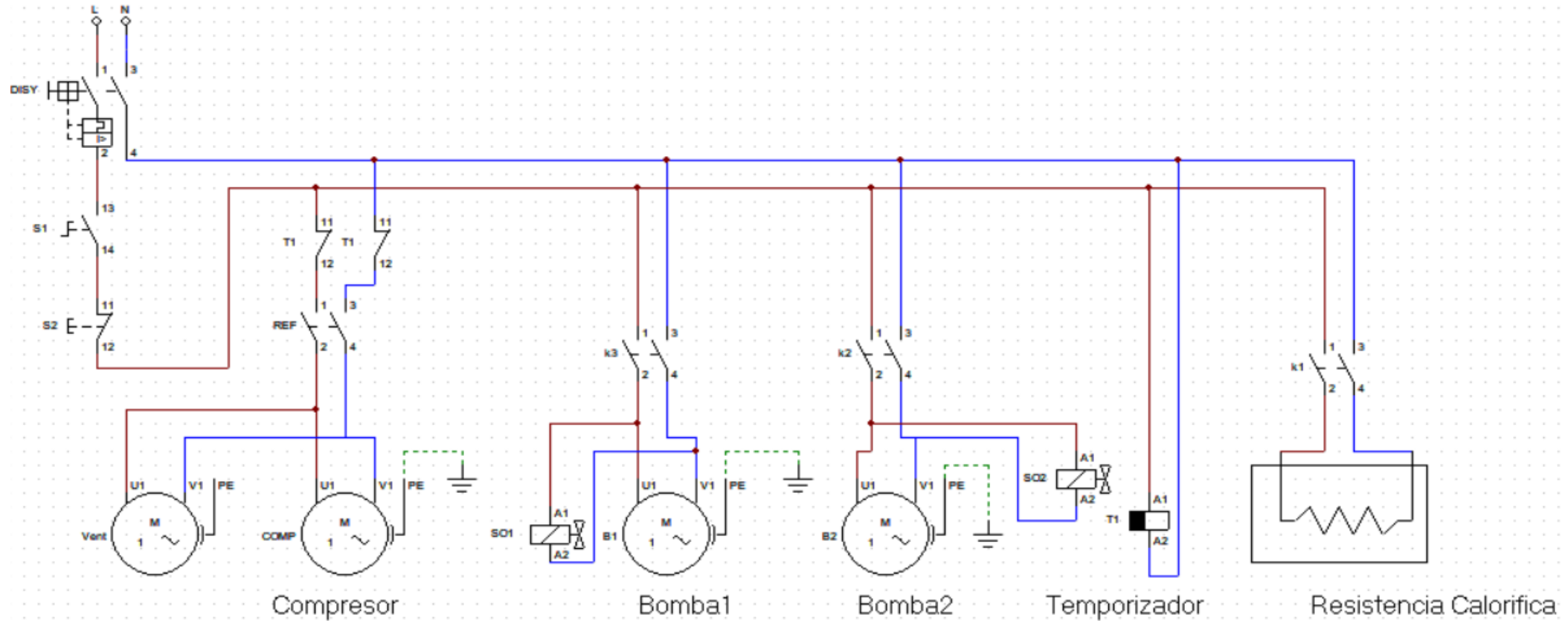


Conexión display 16 x 2 con comunicación I2C

SUBSISTEMA DE CONTROL



Diseño del circuito de potencia



SUBSISTEMA DE CALENTAMIENTO



Mediante el calculo de la carga requerida para calentar el alimento de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ se obtiene :

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

$$Pot = 177.96 \frac{\text{Btu}}{h}$$

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

Resistencia calorífica



Seleccionando resistencias caloríficas de 60 Watts



SUBSISTEMA DE VACÍO



Dimensionamiento del sistema de vacío

Volumen: $(1.54 * 1.96 * 1.54)ft^3 = 4.65 ft^3$



Bomba seleccionada

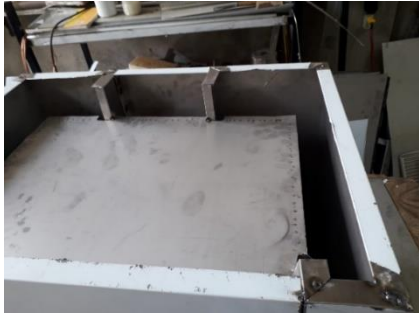
Características técnicas

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	



CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE



Cámara interna y externa en una sola estructura



Cámara soldada



Fundición del poliuretano



Construcción de la estructura



Estructura en construcción



CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Sistema de congelación

Sistema de calentamiento

Unidad de refrigeración

Cámara de trabajo

Sistema de bandejas

Sistema de vacío



CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE



Montaje del circuito de control y de potencia



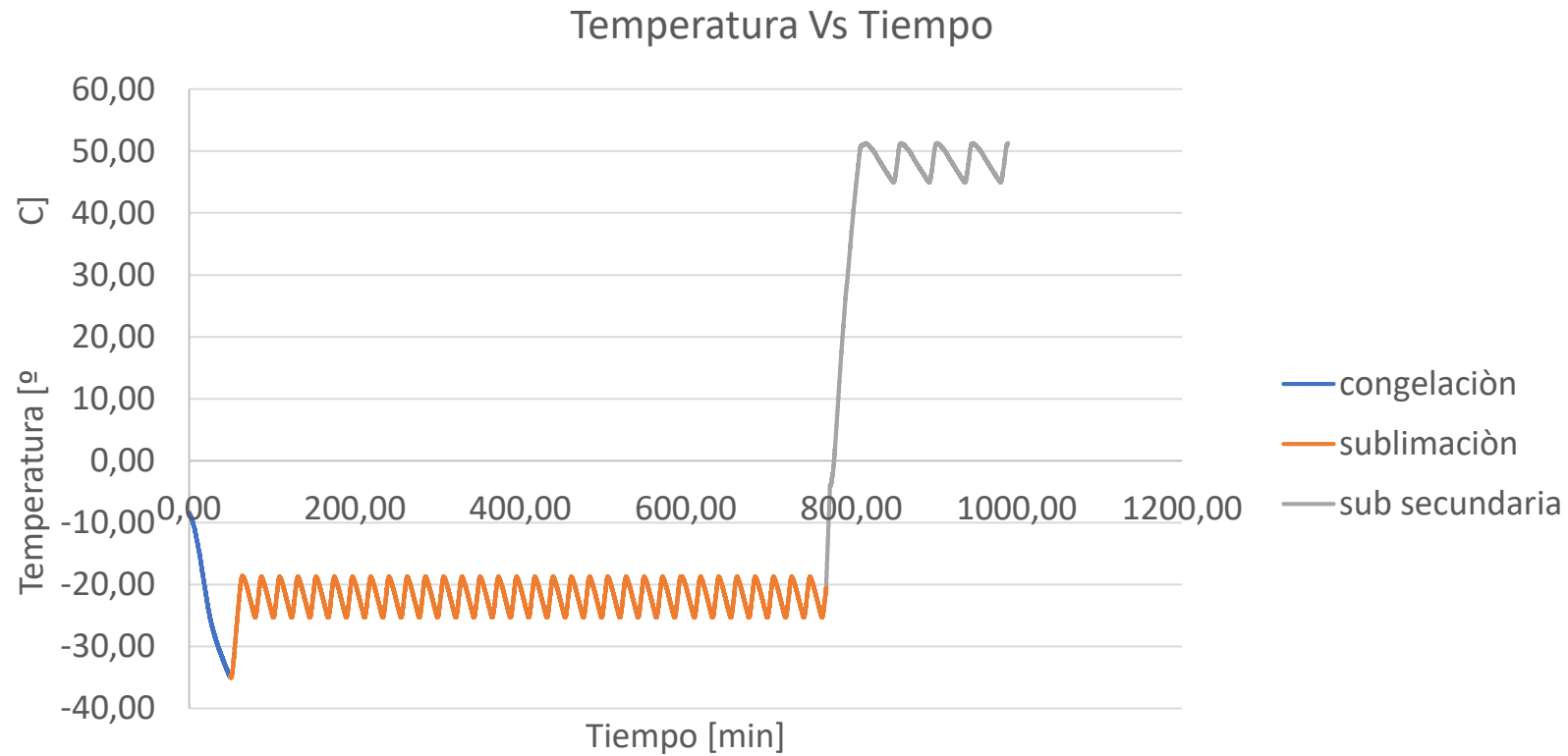
Tablero de control ensamblado



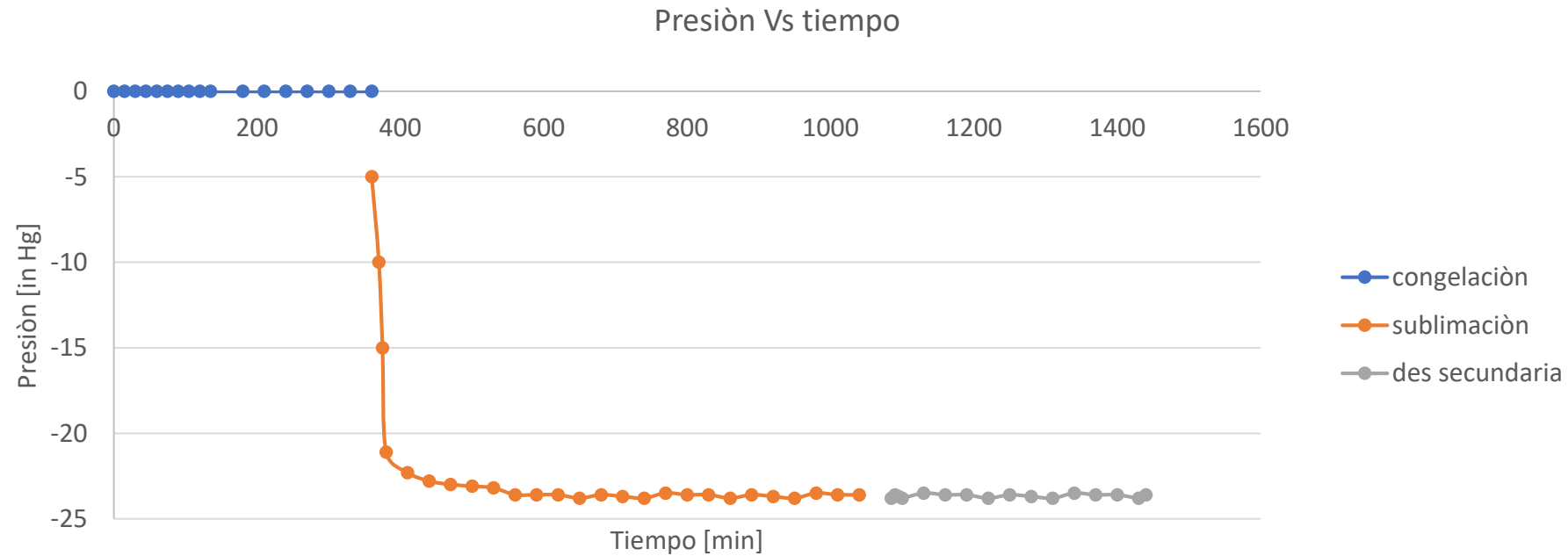
Tablero de control parte externa



Liofilización de frutas



Liofilización de frutas



Liofilización de frutas

Frutas y verduras frescas



Liofilización de frutas

Frutas y verduras Liofilizadas



Pruebas sensoriales

Análisis sensorial

Se parecen				
Extremadamente	Mucho	Ligeramente	Poco	Nada
5	4	3	2	1

ATRIBUTO	CALIFICACION	COMENTARIO
APARIENCIA		
AROMA		
TEXTURA		
SABOR		

Análisis estadístico

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 estadístico – 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	0,00526256	2	0,002631281	0,2397845	0,78845504	2,51060866
Dentro de los grupos	0,29628514	4	0,010973524		8	7
Total	0,30154770	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 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una presión atmosférica, en la desecación primaria se le agrega calor al producto llegando a una temperatura no mayor a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.



CONCLUSIONES



- 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.



CONCLUSIONES



- 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.



- 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.

RECOMENDACIONES



- 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.
- Para un mejor resultado de los alimentos liofilizados se propone un trabajo de investigación centrado en la búsqueda de los parámetros correctos para la liofilización de una fruta y verdura en específico.



GRACIAS
ARIGATO
SHUKURIA
JUSPAXAR
DANKSCHEEN
TASHAKKUR ATU
YAQHANYELAY
SUKSAMA
EKHMET
GRAZIE
MEHRBANI
PALDIES
KOMAPSUMEDA
MAAKE
GOZAIMASHITA
EFCHARISTO
TINGKI
BĪYAN
SHUKRIA
THANK
YOU
BOLZĪN
MERCI