



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**Diseño de un sistema de deshidratado de frutas mediante método de
liofilización**

POR

Álvaro Enrique Navarrete Roa

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánica

Profesor Guía:
Cristian Alberto Cuevas Barraza

Enero 2023
Concepción (Chile)

© 2022 Álvaro Enrique Navarrete Roa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

En la actualidad, la preservación de los alimentos es vital, es por esto que la industria de alimentos ha empezado a desarrollar diferentes técnicas de conservación, entre ellas la liofilización, el cual es un proceso de deshidratación que contiene dos subprocesos: la congelación del alimento y posteriormente el secado del mismo en el que se genera la sublimación del hielo, eliminando un alto porcentaje de humedad. El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un sistema de liofilizado de tamaño piloto para deshidratar manzana. Esta oportunidad se genera debido a la existencia de una unidad de condensación en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Concepción, el cual puede ser reutilizado para los ciclos de congelado de la fruta. El proceso de liofilización es considerado un sistema costoso y complejo debido a las condiciones que requiere, sin embargo, posee ventajas importantes como lo son mantener la mayor parte de las propiedades organolépticas y llegar a una humedad final del producto cercana al 3%, bajo porcentaje con respecto a otros métodos que alcanzan alrededor del 15-20%.

El diseño y definición del sistema se analiza posterior a una revisión bibliográfica sobre la teoría que involucra cada parte del sistema, los cuales son principalmente: sistema de enfriamiento, sistema térmico, condensador de hielo o también denominado trampa de hielo y sistema de vacío. Para esto se tiene en cuenta las características de la unidad de condensación, principalmente la potencia del compresor equivalente a 3.37 kW, siendo el factor limitante para determinar la escala del sistema. Se diseñó un sistema integrando en una misma cámara el proceso de congelado y de secado como un sistema continuo. El sistema de enfriamiento consistirá en un ciclo por compresión a vapor utilizando la unidad de condensación, estableciendo una temperatura de la fruta de -30°C . El sistema térmico será haciendo circular agua a una temperatura de 30°C por las bandejas en que estará depositada la fruta, entregando calor por conducción en la parte superior y calor por radiación por la parte inferior. Para esto se aprovecha el calor generado en el circuito de enfriamiento del condensador de hielo, que requiere permanecer a una temperatura de -45°C .

Los tiempos de cada etapa son importantes, debido a que influyen tanto en la calidad como en la seguridad de un buen funcionamiento sin generar imprevistos ni colapsos en el proceso. Es por esto, que el diseño del sistema parte por determinar los tiempos, resultando una etapa de congelamiento de 96 minutos y una etapa de secado primario de 224 minutos. Con los parámetros determinados se estableció la posibilidad de operar con 15.5 kg de manzana fresca por ciclo.

Como conclusión, se estructura un sistema que cumple en base a la teoría con el objetivo de generar manzana liofilizada. Siendo un sistema con un COP igual a 1 y 1.45 en los sistemas de refrigeración y de secado respectivamente. Es de vital importancia el respetar los principios de la liofilización, principalmente los tiempos y lograr las temperaturas y presiones establecidas. El proyecto es una buena oportunidad para recuperar la unidad de condensación. Generar un sistema con fines de estudio, para estudiar y analizar los comportamientos del proceso de liofilización, considerando que en un principio el sistema no es rentable debido a costos de funcionamiento, de mantención y de inversión.

Palabras clave: Liofilización, Sublimación, Deshidratación

Abstract

Nowadays, food preservation is vital, which is why the food industry has started to develop different preservation techniques, among them freeze-drying, which is a dehydration process that contains two sub-processes: freezing the food and then drying it in which the ice sublimation is generated, eliminating a high percentage of humidity. The objective of this project is to design a pilot size freeze-drying system to dehydrate apples. This opportunity is generated due to the existence of a condensation unit in the thermofluids laboratory of the Universidad de Concepción, which can be reused for the freezing cycles of the fruit. The freeze-drying process is considered a costly and complex system due to the conditions it requires, but it has important advantages such as maintaining most of the organoleptic properties and reaching a final product moisture content of around 3%, a low percentage compared to other methods that reach around 15-20%.

The design and definition of the system is analyzed after a bibliographic review of the theory involved in each part of the system, which are mainly: cooling system, thermal system, ice condenser or also called ice trap and vacuum system. For this, the characteristics of the condensing unit are taken into account, mainly the power of the compressor equivalent to 3.37 kW, being the limiting factor to determine the scale of the system. A system was designed integrating the freezing and drying process in the same chamber as a continuous system. The cooling system will consist of a vapor compression cycle using the condensing unit, setting a fruit temperature of -30°C . The thermal system will be circulating water through the freezing chamber. The thermal system will circulate water at a temperature of 30°C through the trays in which the fruit will be deposited, delivering heat by conduction at the top and heat by radiation at the bottom. The heat generated in the cooling circuit of the ice condenser, which must remain at a temperature of -45°C , is used for this purpose.

The times of each stage are important, since they influence both the quality and the safety of a good operation without generating unforeseen events or collapses in the process. For this reason, the design of the system starts by determining the times, resulting in a freezing stage of 96 minutes and a primary drying stage of 224 minutes. With the parameters determined, the possibility of operating with 15.5 kg of fresh apples per cycle was established.

In conclusion, a system is structured that meets the theoretical objective of generating freeze-dried apples. Being a system with a COP equal to 1 and 1.45 in the refrigeration and drying systems respectively. It is of vital importance to respect the principles of freeze-drying, mainly the times and to achieve the established temperatures and pressures. The project is a good opportunity to recover the condensation unit. Generate a system for study purposes, to study and analyze the behavior of the freeze-drying process, considering that at the beginning the system is not profitable due to operating, maintenance and investment costs.

Keywords: Freeze-drying, Sublimation, Dehydrated

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Nomenclatura	vi
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contextualización	1
1.2 Diseño del sistema de liofilización.....	2
1.3 Objetivos del proyecto.....	4
1.4 Aporte directo del estudio.....	4
1.5 Metodología.....	4
2 CAPÍTULO 2: Estado del arte	5
3 CAPÍTULO 3: Marco teórico	8
3.1 Sistema de refrigeración por compresión de vapor	8
3.2 Sublimación.....	9
3.3 Proceso de liofilización.	9
3.4 Tiempos de enfriamiento.....	11
3.5 Transferencia de calor.	13
4 CAPÍTULO 4: Desarrollo	15
4.1 Definición caso estudio	15
4.2 Definición del sistema.	19
4.3 Caracterización del sistema.	20
4.4 Descripción y selección de componentes principales.....	27
4.5 Costos energéticos.	32
5 CAPÍTULO 5: Conclusiones	34
5.1 Perspectivas.	35
Referencias	36
Anexo	38

Lista de Tablas

Tabla 1: Métodos de deshidratación de fruta	1
Tabla 2: Parámetros para una superficie infinita.....	13
Tabla 3: Propiedades principales frutas de exportación en Chile	15
Tabla 4: Propiedades térmicas de la manzana.....	15
Tabla 5: Características compresor existente en laboratorio.....	17
Tabla 6: Propiedades ventiladores axiales	17
Tabla 7: Dimensiones unidad condensadora.....	18
Tabla 8: Datos de entrada etapa de secado.....	23
Tabla 9: Datos de entrada sistema de refrigeración para condensador de hielo	25
Tabla 10: Datos entrada sistema de refrigeración etapa de congelamiento	25
Tabla 11: Principales características del sistema de liofilización	27
Tabla 12: Parámetros para diseño de evaporador.....	27
Tabla 13: Características bomba de vacío.....	32
Tabla 14: Energía consumida en el sistema	32
Tabla 15: Tarifa eléctrica en Concepción. [Fuente: CGE].....	33

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema general proceso de liofilización	2
Figura 2: Diagrama proceso de liofilización estandarizado	5
Figura 3: Sistema de liofilización SiccaDania	6
Figura 4: Esquema ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	8
Figura 5: Gráfico punto crítico de estados del agua.....	9
Figura 6: Etapas proceso de liofilización	10
Figura 7: Gráfico comparativo entre diferentes temperaturas en la cámara	11
Figura 8: Transferencia de calor durante sublimación	13
Figura 9: Condensador de tubo y aletas	16
Figura 10: Unidad condensadora.....	16
Figura 11: Compresor Frascold.....	17
Figura 12: Plano de la unidad condensadora.....	18
Figura 13: Ciclo de refrigeración etapa de congelamiento	19
Figura 14: Sistema durante etapa de sublimación.....	20
Figura 15: Curvas de enfriamiento de la manzana.....	22
Figura 16: Gráfico COP vs Temperatura evaporación condensador de hielo.....	24
Figura 17: Gráfico masa vs Temperatura evaporación condensador de hielo	24
Figura 18: Condensador de placas	29
Figura 19: Diseño placa térmica.....	29
Figura 20: Esquema transferencia de calor hacia la fruta.	30
Figura 21: Bomba de vacío de paletas de 2 etapas.....	32

Nomenclatura

A	:	Superficie de contacto de transferencia [m^2]
Bi	:	Número de Biot
Cp	:	Calor específico [kJ/kg °C]
e	:	Espesor [m]
E	:	Dimensionalidad equivalente de la transferencia de calor
h	:	Entalpía [kJ/kg]
h_{cv}	:	Coefficiente convectivo de transferencia de calor [$W/m^2\text{°C}$]
j	:	Factor de retardo
k	:	Conductividad térmica [$W/m\text{°C}$]
L	:	Calor latente de fusión [kJ/kg]
m	:	Masa [kg]
N	:	Número de dimensiones de un alimento
q	:	Calor [kJ]
\dot{Q}	:	Flujo de calor [kW]
t	:	Tiempo [s]
T	:	Temperatura [°C]
V	:	Volumen [m^3]
w	:	Contenido de agua presente [%]
\dot{W}	:	Potencia [kW]
Y	:	Tasa de enfriamiento
Z	:	Ancho zona de interfase [m]

Símbolos

Π	:	Permeabilidad de la zona seca al vapor de agua
Δ	:	Variación

Letras griegas

α	:	Difusión térmica [m^2/s]
ε	:	Emisividad térmica
ρ	:	Densidad [kg/ m^3]
λ_s	:	Calor latente de sublimación [J/kg]
λ, γ	:	Parámetros geométricos
ω	:	Raíz [rad]

Subíndices

amb	:	Ambiente
bpc	:	Bajo punto de congelación
cd	:	Conducción
cond	:	Condensador
cp	:	Compresor
cv	:	Convección
ev	:	Evaporación
f	:	Final
i	:	Inicial
liof	:	Liofilización
manz	:	Manzana
me	:	Medio de enfriamiento
nec,l	:	Necesario para liofilizar
pl	:	Placa térmica
r	:	Refrigerante
rad	:	Radiación
res	:	Residual
spc	:	Sobre punto de congelamiento
t	:	Transferencia

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contextualización

Actualmente Chile mantiene una alta reputación a nivel mundial debido a su constante y consistente exportación de frutas. Además, es un actor reconocido en la industria mundial por producir y exportar más de 50 diferentes especies frutales, y es considerado un proveedor de categoría mundial por su fiabilidad y cumplimiento de la inocuidad alimentaria en base a la normativa internacional. En la temporada 2020-2021 se exportaron un total de 2.567.717 toneladas de frutas, siendo EEUU y Asia los principales destinos. Por lo tanto, esto asegura una fuerte base de materia prima para los procesos de deshidratado de frutas y su posterior exportación. En el año 2021 se exportaron 125 mil toneladas de frutas deshidratadas, que es un producto con una creciente demanda debido a sus diferentes ventajas nutritivas respecto a otros alimentos menos saludables, siendo consecuente con la mejora en la calidad de vida y por ende de alimentación de las personas.

La exportación de frutas presenta debilidades que propician el desarrollo de las frutas deshidratadas, convirtiéndolas en una seria alternativa de exportación. Una de las desventajas es el consumo de energía que conlleva el traslado de la fruta, ya que para su óptimo mantenimiento ésta debe estar refrigerada en un rango de 0 a 12°C dependiendo de la fruta, además de un riesgo permanente de la contaminación o pudrición del producto. En la Tabla 1 se observan diferentes métodos alternativos para la deshidratación de frutas teniendo todas sus ventajas y desventajas correspondientes según costos, calidad del producto, entre otras.

Tabla 1: Métodos de deshidratación de fruta

Método de Deshidratación	Principio Fundamental
Deshidratación por placas calientes	Conducción
Deshidratación en cama o banda	Convección
Deshidratación solar	Radiación y/o Convección
Deshidratación Osmótica	Osmosis
Liofilización	Congelación

Uno de los procesos para lograr un buen producto deshidratado es la liofilización, que consiste en congelar un producto a bajas temperaturas, una vez realizado esto se somete la cámara a un proceso de vacío y aplicación de calor con el fin de lograr la sublimación, es decir, lograr evaporar el hielo sin pasar por la fase líquida. El proceso puede llegar a generar una fruta con una humedad final menor a 2%, mientras que la efectividad en el proceso de deshidratación mediante aplicación de calor se llega a obtener una humedad de entre 10% y 24%. Actualmente los productos liofilizados se utilizan principalmente para astronautas, militares o deportistas, ya que es posible transportar una cantidad mayor de comida con un menor peso, alcanzando a disminuir en un 70-75% de su peso inicial.

La ventaja principal de la fruta deshidratada es el aumento de su vida útil sin perder sus nutrientes ni vitaminas. Otra ventaja es el transporte de la fruta, como se expresa en el párrafo anterior el peso disminuye considerablemente y por consecuencia su volumen, lo que hace mucho más fácil su almacenamiento y transporte. La principal desventaja de la fruta deshidratada se debe al costo de los equipos y el consumo energético de los sistemas de deshidratación.

1.2 Diseño del sistema de liofilización.

En la Figura 1 se presenta un esquema general del método propuesto de deshidratación.



Figura 1: Esquema general proceso de liofilización

Los equipos principales para realizar la liofilización son:

- Sistema de Refrigeración
- Bomba de Vacío
- Condensador de Hielo
- Cámara o colector
- Sistema térmico
- Sistema de Control

El sistema de refrigeración es utilizado para extraer la humedad durante la sublimación y dependiendo del tipo de sistema se puede utilizar para congelar la fruta durante la primera etapa del proceso. La bomba de vacío se encarga de disminuir la presión de la cámara previo a la liofilización. En la cámara o colector se deposita el producto, ya sea en viales o a granel en bandejas o estante, donde se encuentra además la fuente de calor. El condensador recibe los vapores generados en la sublimación transformándolo nuevamente en hielo, el cual debe ser retirado manualmente una vez finalizado el proceso. El sistema de control se puede variar dependiendo de su complejidad y tecnología; sin embargo, las principales variables a medir son la temperatura, la presión y la humedad. A medida que más avanzado sea el sistema de control puede controlar de mejor manera el progreso del proceso, así como también las curvas de temperatura, pudiendo manipular de mejor manera los parámetros de todo el sistema.

Los sistemas de liofilización se pueden clasificar según una serie de condiciones de diseño explicados a continuación.

Se tienen dos tipos de liofilizadores:

-Liofilizador de plataforma: Controla el sistema mediante sensores de presión y temperatura capaces de manipular los parámetros tanto en el proceso de congelación como de secado, variando la temperatura con el fin de disminuir tiempos del proceso. Corresponde al tipo de liofilizador más utilizado.

-Liofilizador múltiple: Controla la presión de vacío del sistema. Debido a la falta de control sobre la tasa de transferencia de calor al producto, la mayoría de los secadores múltiples funcionan de manera conservadora a presiones más bajas para ayudar a mantener la temperatura del producto más baja.

Se tienen 2 tipos de cámaras secadoras:

-Cámara secadora múltiple: El producto suele entrar a las bandejas precongelado en contenedores, comúnmente viales o matraces que se depositan en bandejas para ser insertados directamente en el estante y aumentar la transferencia de calor.

-Cámara secadora de estantería: El producto se coloca en una bandeja directamente a granel, lo que aumenta la transferencia de calor, sin embargo, existe un mayor riesgo de contaminación en el producto y al ser la liofilización un método para productos altamente valorizados no es conveniente.

Los tamaños de los equipos liofilizadores:

-Equipos de laboratorio: Sistemas con finalidades de investigación e innovación realizando pruebas experimentales.

-Unidad piloto: De igual forma cuenta con la capacidad de ser utilizado con fines de estudio con la diferencia que a la vez puede ser para producciones a pequeña escala.

-Unidades de producción: Sistemas optimizados con altos volúmenes de producción.

La congelación de los productos a liofilizar puede ser externa o interna:

-Externa: El proceso de congelamiento se realiza en un equipo externo al liofilizador, puede ser en un congelador estándar, inmersión directa en nitrógeno líquido o mediante congelación de carcasa (Shell bath), que consiste en congelar el producto en un matraz que se encuentra rotando a gran velocidad lo que provoca que la muestra se congele en las paredes del matraz y se genere un bloque grande al fondo de éste.

-Interna: Liofilizadores más avanzados cuentan con un sistema de refrigeración interna que permite congelar el producto al interior de la cámara, ya sea en contenedores o a granel. La ventaja de este modelo es que controla las tasas de enfriamiento y optimizar el tamaño de los cristales de hielo generados.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general.

- Diseñar y evaluar el desempeño de un sistema de liofilización de fruta.

1.3.2 Objetivos específicos.

-Conocer teorías y bases fundamentales asociadas a la liofilización.

-Recuperar unidad de condensación.

-Diseñar el sistema de deshidratado de fruta.

1.4 Aporte directo del estudio

Si bien Chile tiene un gran impacto económico y laboral en la producción y exportación de frutas a todo el mundo, la idea de la liofilización conlleva una gran cantidad de oportunidades para ser una alternativa tanto para las frutas frescas como para las frutas deshidratados mediante métodos de aplicación directa de calor. La idea surge debido a la disponibilidad de un sistema de refrigeración en la Universidad utilizado para liofilizar fruta, por lo que se presenta la oportunidad de estudiar el método y evaluar distintos esquemas o arquitecturas con un propósito final de integrar este equipo y poder recuperarlo. El proceso de liofilización surge por la calidad superior de los productos obtenidos en comparación con los alimentos deshidratados por otros métodos, ya que conserva la totalidad de vitaminas y nutrientes además de su apariencia. Es por esto que el presente proyecto busca evaluar una opción para justificar el alto valor que conlleva realizar éste método o bien encontrar una forma de disminuir esos costos.

1.5 Metodología

Actividad 1: Contextualización y teoría de la liofilización

Estudio del estado del arte sobre los sistemas de liofilización. Investigación sobre las tecnologías y teorías implícitas en cada subproceso y sus componentes respectivos.

Actividad 2: Recuperación unidad de condensación

Caracterización del equipo conociendo sus características y funciones. Definición del caso estudio

Actividad 3: Diseño del sistema

Análisis y desarrollo de las diferentes teorías implicadas en el proceso, diseñando un sistema estructurado y escalado para la unidad de condensación. Optimización de flujos de calor con la finalidad de optimizar costos energéticos.

CAPÍTULO 2: Estado del arte

En la actualidad, existe una gran cantidad de industrias que producen productos liofilizados de alto valor. Los principales procesos y sistemas se encuentran explicados a continuación.

El sistema estandarizado denominado liofilización al vacío, considerado el mejor método para realizar el proceso de liofilizado y utilizado ampliamente por industrias de mediana y gran escala [23], consiste en 2 cámaras independientes: en una se realiza la congelación de o de los productos, mientras que la otra se encarga de las fases de secado por sublimación, la Figura 2 muestra esquemáticamente ambas cámaras.

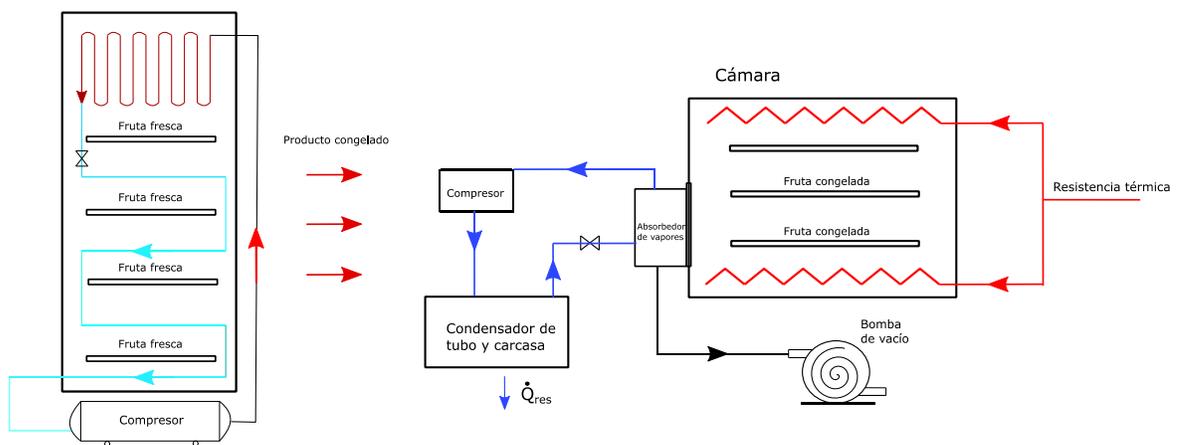


Figura 2: Diagrama proceso de liofilización estandarizado

El producto a liofilizar es depositado en una primera cámara de refrigeración a temperaturas por debajo de su punto eutéctico, es decir, una vez que se congela el soluto de la fruta. Esto varía dependiendo el producto, en el caso de la fruta el rango se encuentra entre -25°C y -35°C , mientras que para farmacos la temperatura objetivo se acerca a los -50°C [3]. Una vez congelada la fruta, se traslada a a cámara de secado en condiciones de alto vacío y conectada a un sistema térmico. A medida que el producto se calienta el hielo comienza sublimarse por la parte superior, distinguiéndose dos zonas: la zona seca y la zona congelada. Mientras el proceso evoluciona la zona congelada reduce su tamaño hasta desaparecer [5]. El vapor generado en la cámara de secado es conducido hasta el absorbedor de vapores, definido como un condensador de hielo el cual se encuentra a una temperatura inferior a la cámara con la ayuda de un sistema de refrigeración. La bomba de vacío debe generar una presión en la cámara de 1 mbar y 0.01 mbar en las etapas de secado primario y secundario respectivamente.

En la Figura 3 se observa el sistema de secado diseñado por la empresa SiccaDania, específicamente el modelo FD30 perteneciente a los equipos de tamaño piloto. En él se aprecian los principales equipos explicados anteriormente incluyendo un sistema eléctrico como fuente de calor para la etapa de secado. Estos diseños poseen un costo de mantenimiento muy bajo principalmente por dos factores,

en primer lugar, utilizan bombas de vacío de funcionamiento en seco, es decir, no requieren aceite ni lubricantes y, además, poseen sistemas optimizados de limpieza con instrumentos CIP (Clean in place).

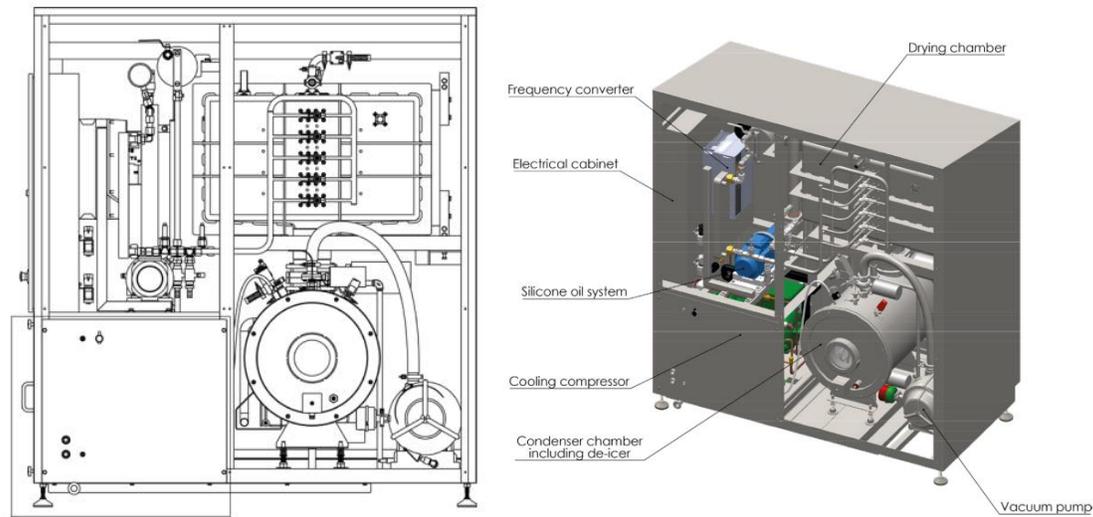


Figura 3: Sistema de liofilización SiccaDania

Si bien, el esquema general utilizado por varias empresas y a la vez utilizado para diversos estudios no varía mucho con el explicitado anteriormente, existen variaciones sobre la fuente térmica del sistema, debido a que representa un porcentaje alto de los gastos del proceso. Como alternativas para entregar el calor a los productos existe una variedad de sistemas en investigación y/o aplicación entre los cuales se encuentran:

- Placas calefactoras (hot surfaces).
- Resistencia eléctrica.
- Microondas
- Lámpara infrarroja.

De estas opciones las más comunes en la industria son las placas calefactoras y resistencias eléctricas. Estas cuentan con una mayor estabilidad en la calidad del producto final, funcionan bajo diferentes condiciones del sistema sin influir de mayor manera en su efectividad. La parte negativa de las placas calefactoras es que requieren un sistema más grande para generar el calor necesario para la cámara de secado. Además, los tiempos de liofilización suelen ser más elevados que el resto de alternativas. Las resistencias eléctricas entre sus desventajas, la más importante es el elevado consumo energético asociado al proceso debido a la gran cantidad de horas que éste requiere.

Por otra parte, el proceso de secado por microondas acelera considerablemente el tiempo de liofilización con una calidad similar, esto se debe a que la capa seca es transparente frente a las microondas, por lo que la energía llega directamente al agua congelada. Sin embargo, es menos

frecuente este tipo de tecnología debido a su inestabilidad durante el proceso, existen riesgos de fusión en la cámara, el calentamiento en el producto es desigual y puede ocurrir la ionización del gas generando descargas luminosas. El secado generado por radiación infrarroja acelera la velocidad de secado, genera un buen producto final y conlleva en un ahorro energético, por lo que investigaciones aseguran su potencial en la industria moderna de liofilización. Como desventaja actualmente, presenta problemas a la hora de mantener propiedades organolépticas, es por ello que se requiere un sistema de control más prolijo y efectivo [23].

En el mercado también existe una gama de liofilizadores compactos que presentan en una misma cámara el proceso de congelación y de secado. Entre ellos se diferencian por el tamaño del sistema, los materiales incorporados, tecnologías utilizadas, potencia asociada, entre otras. Esto considera un costo alto considerando la relación precio vs capacidad de kg producidos por la energía consumida.

CAPÍTULO 3: Marco teórico

En este capítulo se establecen las bases teóricas y definiciones críticas que son esenciales para comprender el proyecto, las siguientes interrogantes y puntos clave serán resueltos en esta sección:

1. ¿Qué es y cómo ocurre el proceso de liofilización?
2. ¿Cómo obtener variables a considerar sobre el proceso?

3.1 Sistema de refrigeración por compresión de vapor

El proceso de refrigeración consta principalmente de 4 etapas: compresión, condensación, evaporación y estrangulamiento mediante válvulas de expansión. Este sistema se utiliza para producir el enfriamiento y congelamiento de la fruta. La Figura 4 muestra la conexión de sus componentes y el ciclo en el diagrama P-h.

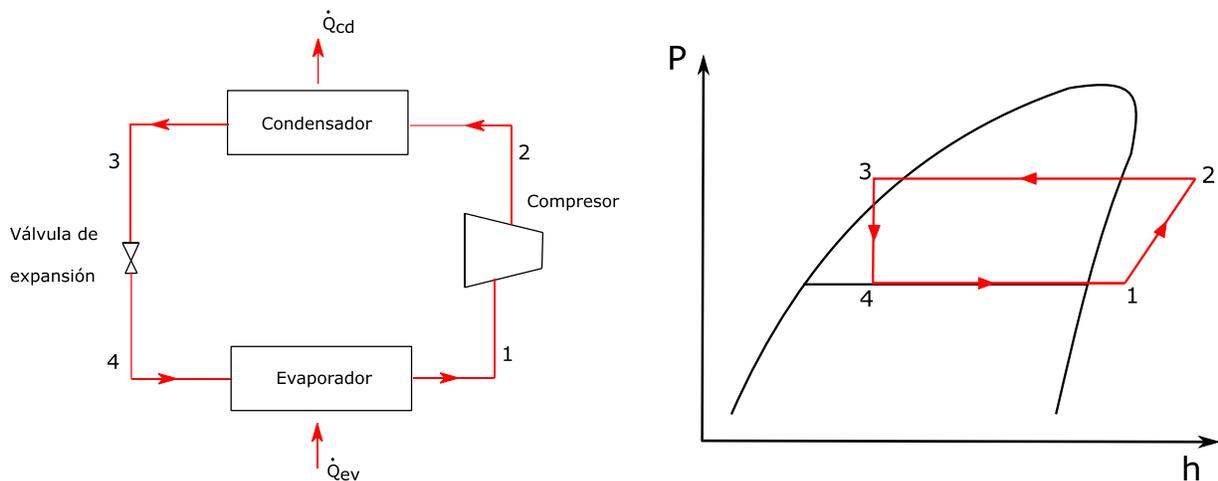


Figura 4: Esquema ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Los principales flujos de energía a determinar en este sistema son la potencia del evaporador y la potencia del compresor:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_r * (h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$\dot{W}_{cp} = \dot{m}_r * (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Y su indicador de desempeño es el COP (Coefficient of Performance), dado por:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{W}_{cp}} \quad (3)$$

Este representa el ciclo básico o general de refrigeración, sin embargo, existen una múltiple variedad de diseños con distintos fines y características. Para temperaturas de evaporación menores de -30°C se recomienda el uso de sistemas de refrigeración de dos o más etapas, es decir, que existan 3 o más niveles de presión en el sistema.

3.2 Sublimación

El principal fenómeno que ocurre durante la liofilización es la sublimación. La definición y propósito de la sublimación es transformar una materia en estado sólido a un estado gaseoso sin pasar por un estado líquido. Para esto se deben reunir un par de condiciones de la presión y temperatura como se observa en la Figura 5. La sublimación ocurre bajo el triple punto del agua, por lo que se requiere llevar a la fruta a presiones muy bajas generando un volumen específico del agua muy grande. Debido a esto se requieren bombas de vacío que alcancen niveles de presión por debajo de 5mbar como mínimo. En el condensador de hielo o trampa de hielo, se observa la sublimación inversa, que de igual forma requiere que el agua se encuentre por debajo del punto crítico.

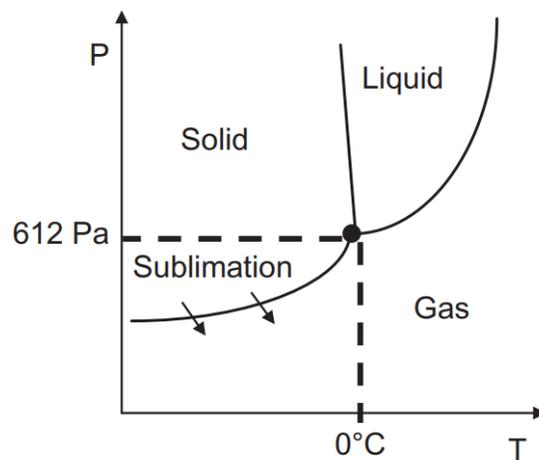


Figura 5: Gráfico punto crítico de estados del agua.

3.3 Proceso de liofilización.

Como se introdujo anteriormente, el proceso de liofilización consta de 3 etapas principales, las cuales son la congelación, el secado primario y el secado secundario. En la Figura 7 se presentan, a modo ejemplo, los tiempos requeridos en cada etapa, siendo los valores dependientes del producto, tamaño, equipo, entre otros [9].

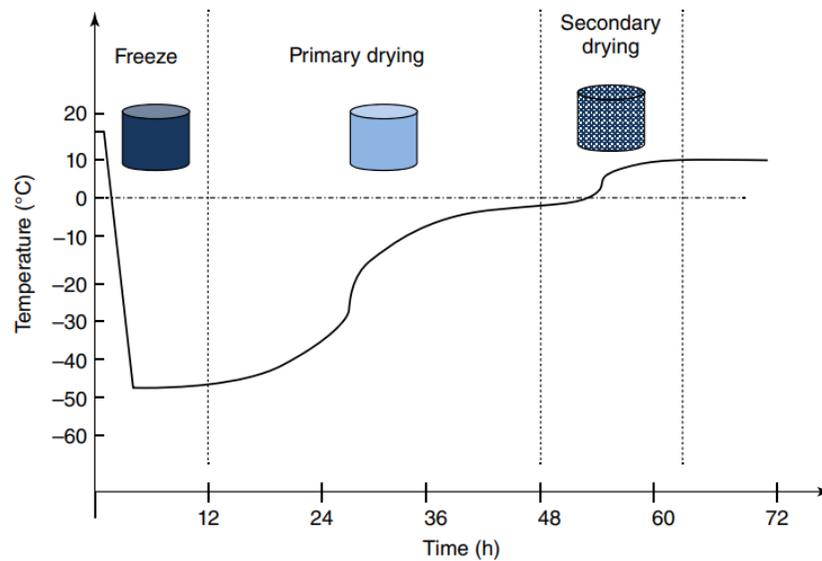


Figura 6: Etapas proceso de liofilización [Fuente:7]

Para el primer paso las muestras frescas pueden ser introducidas en un congelador con sistemas de refrigeración por compresión de vapor o congelados con nitrógeno líquido, lo importante es mantener las muestras a una baja temperatura para evitar la formación de cristales de hielo y así lograr un producto final de mayor calidad. La fruta al ser un producto amorfo puede beneficiarse de un proceso de tratamiento térmico denominado recocido. Durante el cual se hace fluctuar la temperatura del producto (por ejemplo: de -40 °C a -20 °C durante algunas horas y luego vuelve a -40 °C) para obtener una cristalización más completa. El recocido tiene la ventaja añadida de un mayor crecimiento de cristales y tiempos de secado más cortos.

El secado primario es el momento en que se realiza la sublimación y se evaporan los cristales de hielo formados en la matriz, durante esta etapa la cámara se encuentra al vacío y la temperatura de la muestra es menor a la del estante. La fuerza motriz para el secado primario es la diferencia entre la presión del vapor de agua a la temperatura de la muestra y la presión parcial en el condensador de hielo. Éste funciona como una trampa de hielo absorbiendo todos los vapores generados en esta etapa, evitando que circule vapor hacia el sistema de vacío. Por lo general, una temperatura más alta de la muestra (sin que pierda sus propiedades de congelado) aumenta el rendimiento de secado además del tiempo requerido. Al ser la etapa más larga del proceso, es ahí donde se enfoca la atención de los parámetros para lograr disminuir el tiempo de secado, al subir 1°C la temperatura de la muestra es posible disminuir su duración hasta en un 13%. Por teoría se sabe que a mayor diferencia de temperatura entre el estante y la muestra es más rápido el proceso, sin embargo, es mayor la probabilidad de colapso de la muestra por lo que se requiere optimizar esta diferencia entre 5 y 40°C.

El secado secundario consiste en eliminar el agua descongelada por desorción, es decir, eliminar el agua aún retenida en la matriz que finalmente se evapora y se extingue en el vacío. El producto en este punto aún cuenta con un 5-20% de contenido de agua, lo cual es considerable ya que al final del proceso el producto cuenta con una humedad del 1-3%. En el proceso de secado secundario participa la fuente térmica y se genera un nivel de vacío en la cámara de alrededor de 1 Pa, es decir, menor a la

de secado primario. Esto asegura una disminución significativa de peso y volumen que facilita en gran medida el almacenamiento y transporte. Durante este proceso la temperatura de la cámara tiende a aumentar, aunque debe ser controlado, ya que al realizarlo de manera rápida puede colapsar el proceso previo a la reducción total de humedad de la muestra. Para un rendimiento óptimo, el aumento de la temperatura debe ser alrededor de $0.1-0.4^{\circ}\text{C}$ por minuto. En la Figura 7 se muestra la relación que existe entre el tiempo de duración del secado primario según la diferencia de temperatura existente entre la estantería y el producto.

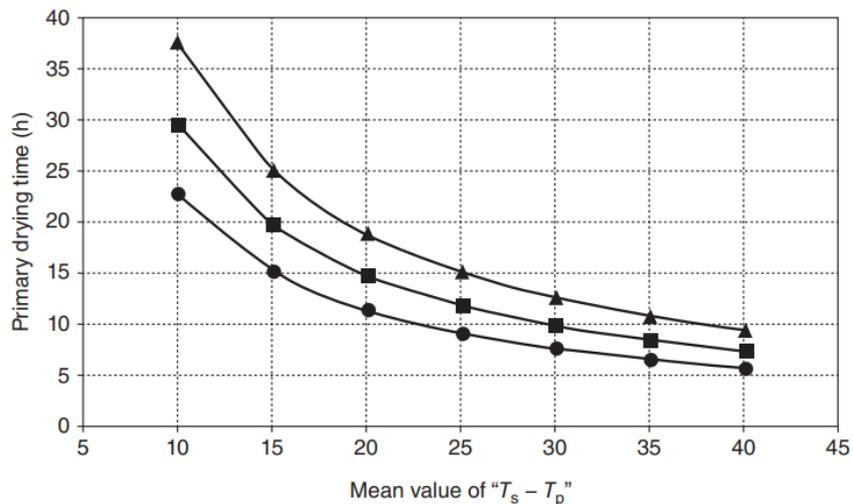


Figura 7: Gráfico comparativo entre diferentes temperaturas en la cámara [Fuente:7]

3.4 Tiempos de enfriamiento.

El tiempo y proceso de enfriamiento tiene gran relevancia, tanto a la temperatura que se hace llegar la manzana o la velocidad de enfriamiento influyen en la calidad del producto final y también en el tiempo de secado. Esto debido a que una congelación rápida crea cristales pequeños y menos contiguos generando estrechas vías para que circule el vapor de sublimación, y una congelación lenta por el contrario genera grandes cristales de hielo, facilitando el éxodo de vapor y acelerando el proceso de secado.

Los tiempos de congelamiento de un producto, en éste caso una fruta, se estima a través de métodos ya predefinidos en la literatura. En gran parte estos tiempos se ven afectados por las propiedades térmicas características de cada producto. Un método de cálculo de este tiempo es el planteado por la ASHRAE [19]. A continuación, se detallarán los pasos y el método utilizado en el presente proyecto.

Específicamente se utilizará la teoría basada en la dimensionalidad del producto, este método consiste en obtener el tiempo a partir de las dimensiones del producto en cuestión, realizando una comparación entre la transferencia de calor total respecto a la transferencia de calor a través de la dimensión más corta. La ecuación (4) muestra la expresión utilizada para determinar el tiempo de congelación del

producto, esta ecuación es válida si se cumple desde ahí se detallará como encontrar los valores de las diferentes variables comprometidas.

$$t = \frac{3\rho c_p L^2}{\omega^2 k E} \ln\left(\frac{j}{Y}\right) \quad (4)$$

En donde c corresponde al calor específico y k la conductividad térmica. L es el largo característico de la muestra, que equivale a la distancia más corta entre el centro térmico del alimento y su superficie. Así, en los cálculos del tiempo de enfriamiento, L es la mitad del espesor de una losa, o el radio de un cilindro o una esfera. La variable ω es el valor de la primera raíz de la ecuación (5), dependiente del Número de Biot que se determina según la ecuación (6) y representa la relación entre la resistencia a la transferencia de calor externa y la resistencia a la transferencia de calor interna.

$$\omega * \cotg(\omega) + Bi - 1 = 0 \quad (5)$$

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (6)$$

E es la dimensionalidad de la transferencia de calor equivalente, basada en la forma del producto, que en los posteriores datos se toma como una losa infinita debido a que la superficie de la muestra de la fruta es infinitamente superior a su espesor. E equivale a:

$$E = \frac{Bi^{\frac{4}{3}} + 1.85}{\frac{Bi^{\frac{4}{3}}}{E_\infty} + \frac{1.85}{E_0}} \quad (7)$$

Los subíndices ∞ y 0 representan la transferencia de calor equivalente para un valor $Bi = \infty$ y $Bi = 0$ respectivamente. Para el caso de una losa infinita $E_0 = 1$ y $E_\infty = 0,75$.

La variable j es un factor dependiente de la geometría expresada en la ecuación 8

$$j = \mu * j_c \quad (8)$$

Con:

$$\mu = \left(\frac{1.5 + 0.69 Bi}{1.5 + Bi} \right)^N \quad (9)$$

$$j_c = \frac{Bi^{1,35} + \frac{1}{\lambda}}{\frac{Bi^{1,35}}{j_\infty} + \frac{1}{\lambda}} \quad (10)$$

$$j_{\infty} = 1.271 + 0.305 \exp(0.172\gamma_1 - 0.115\gamma_1^2) + 0.425 \exp(0.09\gamma_2 - 0.128\gamma_2^2) \quad (11)$$

Los valores correspondientes a una superficie infinita se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros para una superficie infinita

N	λ	γ_1	γ_2
1	0	0	0

Finalmente, Y es la tasa de enfriamiento del producto determinada como:

$$Y = \frac{T_{me} - T}{T_{me} - T_i} \quad (12)$$

Donde T_{me} es la temperatura del medio de enfriamiento, T_i es la temperatura inicial de la muestra y T es la temperatura en tiempo real de la fruta.

3.5 Transferencia de calor.

El proceso de liofilización involucra tanto una transferencia de calor como de masa. Se considerará una transferencia de calor unidireccional, como se observa en la Figura 8, distinguiéndose 2 zonas; la zona congelada, que es donde la fruta aún conserva la totalidad de humedad y la zona seca sólo posee la humedad adherida a la matriz sólida [2]. Existe una zona de interfase denominada frente de sublimación donde ocurre la transformación del agua de sólido a vapor. La manera de proporcionar este calor puede ser tanto por radiación mediante superficies calientes o bien por conducción desde las mismas placas calientes. Por lo general, estos métodos suelen estar combinados para una mejor eficiencia.

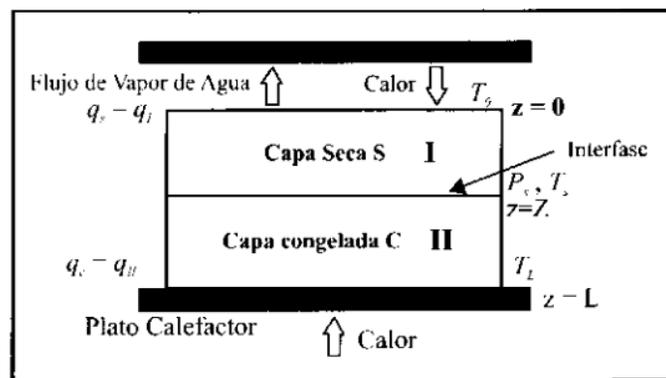


Figura 8: Transferencia de calor durante sublimación [Fuente:2]

Despreciando el calor sensible y considerando una transferencia de calor unidireccional, la tasa de sublimación estaría dada por:

$$\frac{dw}{dt} = A * \rho * (w_i - w_f) \frac{dz}{dt} \quad (13)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones que permitirán determinar el tiempo de sublimación. Se parte de la premisa que la tasa de sublimación debe estar de acuerdo tanto con la transferencia de calor como la transferencia de masa en el frente de sublimación. La ecuación (14) muestra la transferencia de calor existente en razón de la tasa de sublimación como del calor latente existente.

$$q = A * \rho * (w_i - w_f) * \lambda_s \frac{dz}{dt} \quad (14)$$

Por otro lado, el calor transferido corresponde al calor por conducción a través de la zona seca:

$$q = \frac{k * A * (T_0 - T_i)}{z} \quad (15)$$

Ahora bien, considerando la transferencia de masa durante el proceso, la tasa de sublimación debe ser igual a la tasa de eliminación de vapores en la capa seca.

$$A * \rho * (w_i - w_f) \frac{dz}{dt} = \Pi * A * \frac{P_i - P_0}{z} \quad (16)$$

Por lo que finalmente integrando las ecuaciones las ecuaciones (14) y (15) desde $z=0$ hasta $z=Z$ se obtiene el tiempo requerido (aproximado debido a las simplificaciones y suposiciones) durante un proceso de liofilización.

$$t = \frac{Z^2(w_i - w_f)}{2(T_0 - T_i)} * \left[\frac{\rho_i * \lambda_s}{k} \right] \quad (17)$$

CAPÍTULO 4: Desarrollo

4.1 Definición caso estudio

4.1.1 Características y propiedades del producto

En la Tabla 3 se encuentran las frutas mayormente exportadas por Chile junto a sus principales propiedades. El estudio se realizará enfocado en la manzana por lo que en la Tabla 4 se observan sus características para posteriores cálculos de transferencia de calor [6].

Tabla 3: Propiedades principales frutas de exportación en Chile

Alimento	Nivel de exportación [miles de ton]	% de Agua	Temperatura inicio de congelación [°C]	Calor Latente de solidificación [kJ/kg]	Calor específico [kJ/kg °C]	
					Bajo punto Congelación	Sobre punto de Congelación
Manzana	620	84	-1.5	281.0	1.85	3.60
Uva de mesa	522	85	-2.1	274.0	1.84	3.60
Cereza	266	82	-1.8	280.3	1.88	3.64
Kiwi	146	84	-1.5	297.1	1.96	3.80
Ciruela	71	85	-0.8	286.6	1.92	3.72

Tabla 4: Propiedades térmicas de la manzana

Densidad (fresca)	$845 \frac{kg}{m^3}$
Densidad (congelada)	$788 \frac{kg}{m^3}$
Conductividad térmica (fresca)	$0.427 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
Conductividad térmica (seca)	$0.190 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
Conductividad térmica (congelada)	$1.450 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
Difusión térmica	$0.00014 \frac{m^2}{s}$
Coefficiente de transferencia de calor	$2.724 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

4.1.2 Unidad de condensación existente

En el actual proyecto está la posibilidad de adaptar el diseño del sistema a un equipo de refrigeración que consiste en una unidad de condensación, existente en el Laboratorio de Termofluidos de la

Universidad de Concepción que se observa en las Figuras 9 y 10. El sistema posee dos ciclos de refrigeración, tanto para la etapa de congelamiento como para el sistema de refrigeración para el congelador de hielo.



Figura 9: Condensador de tubo y aletas



Figura 10: Unidad condensadora

El equipo presente en el Laboratorio consiste en un compresor semihermético de la empresa Frascold, como el que se observa en la Figura 11. Movido por un motor eléctrico interno y de tipo recíprocante,

modelo Q5-28Y y consta de 4 cilindros. En la Tabla 5 se pueden observar sus principales características.



Figura 11: Compresor Frascold

Tabla 5: Características compresor existente en laboratorio

Fabricante	Frascold
Modelo	EB-Q528-0Y-2M
Potencia	3.37 kW
Frecuencia	50 Hz
Tensión	230 V
Pistones	4
Tipo de Aceite	POE
Carga de Aceite	1.6 lt

El dato más destacable es la potencia equivalente a 3.37 kW. Opera con refrigerante R404A.

El condensador, que se muestra en la Figura 9 es enfriado por aire, posee 2 ventiladores axiales de la marca ebmpapst, sus características se indican en la Tabla 6.

Tabla 6: Propiedades ventiladores axiales

Modelo	S4E400-AA06-17
Potencia	160/225 W
Frecuencia	50/60 Hz
Tensión	230 V
Intensidad	0.71/0.99 A

En la Figura 12 se observa un plano de la unidad de condensación con sus respectivas dimensiones expresadas en la Tabla 7.

Tabla 7: Dimensiones unidad condensadora

	A	B	C	D	E	F	G
Dimensión [mm]	1060	770	664	1010	610	600	90

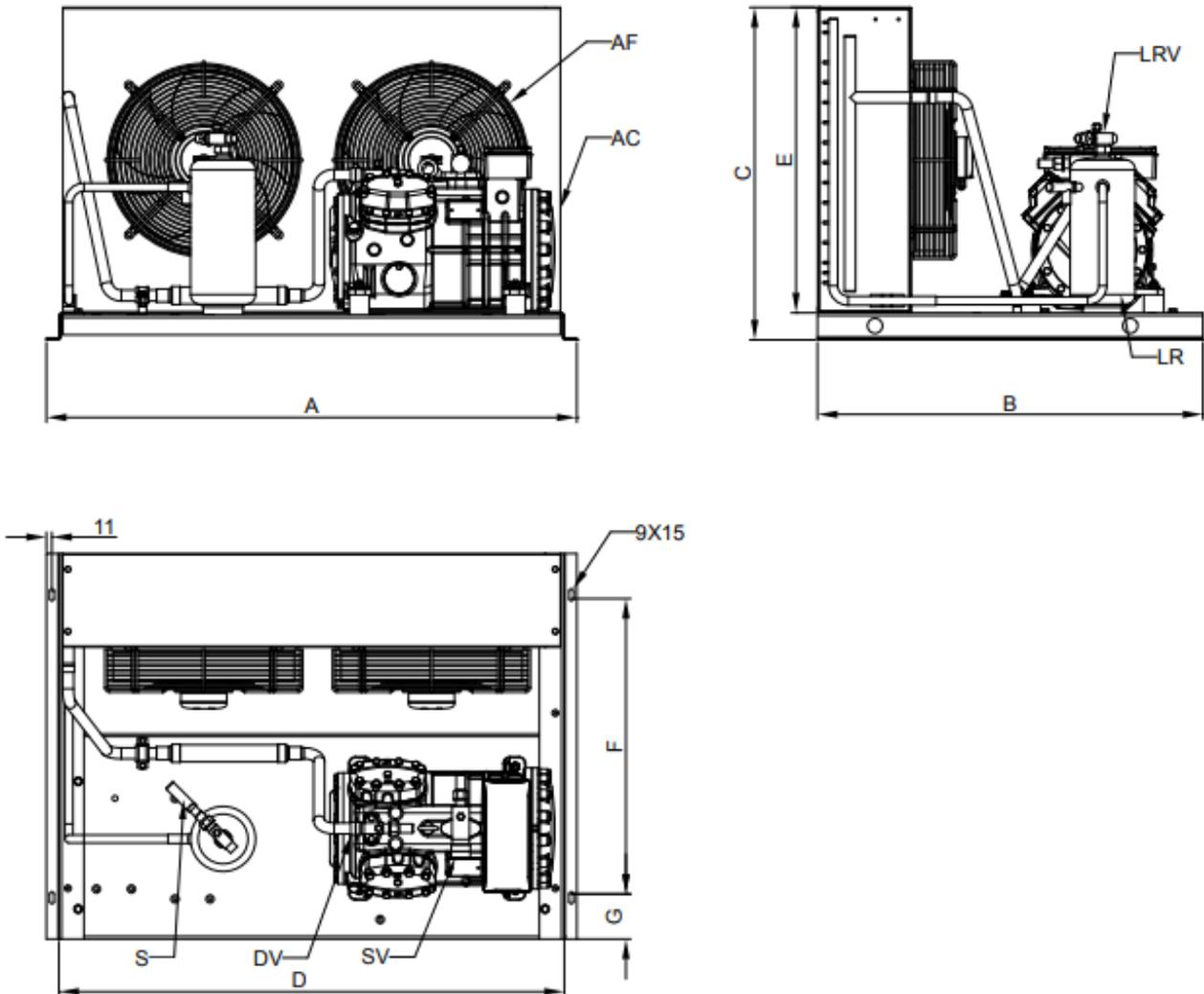


Figura 12: Plano de la unidad condensadora

4.2 Definición del sistema.

Con la idea de optimizar lo visto tanto en la teoría como en los diseños existentes, se busca un nuevo sistema integrado. La idea principal es adaptar el sistema con cámaras independientes y aprovechar de mejor manera los flujos de calor, además, reducir el número de equipos presentes para obtener menores costos de inversión. Partiendo desde la base de reutilizar el calor generado en el ciclo de refrigeración para el condensador de hielo, se define como fuente de calor para la sublimación un condensador de placas, de esta manera no se desecha la totalidad del calor al ambiente. En las Figuras 13 y 14 se observan ambos esquemas del proceso de sublimación diseñado. Utilizando un solo compresor para ambos procesos, el existente en instalaciones del Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción.

El sistema cuenta con dos circuitos que trabajan en tiempos separados. En primer lugar, se tiene el ciclo de congelamiento del producto (1-4), observado en la Figura 13, recibiendo calor desde la cámara en un evaporador, con una temperatura de evaporación del refrigerante R404A igual a -30°C . El sistema cuenta con un ciclo de refrigeración estandarizado con su respectivo compresor, condensador y válvula de expansión. En este caso el calor generado en el condensador es liberado al ambiente.

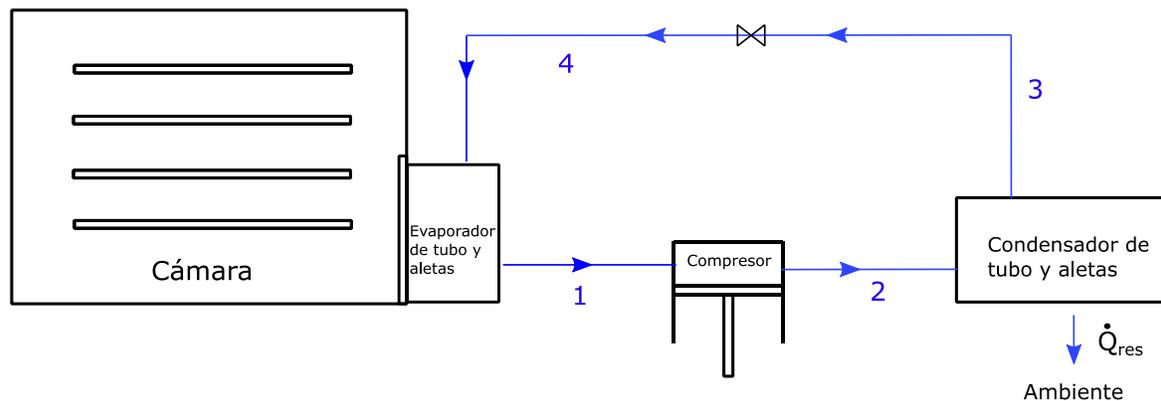


Figura 13: Ciclo de refrigeración etapa de congelamiento

El segundo ciclo (5-11), representado en la Figura 14, pertenece al ciclo de secado de la fruta. Se pretende que ambos circuitos operen con el mismo compresor, intercambiándolos con una válvula de 3 vías. En este caso el refrigerante pasa por la válvula de expansión, recorre el serpentín del condensador de hielo, y el calor generado es reutilizado como fuente de calor para el proceso de sublimación. Sin embargo, existe un excedente de calor generado, por lo que se incorpora un intercambiador de calor paralelamente al condensador de placas (10-11) eliminando el calor residual del proceso al ambiente. Este fluido se vuelve a incorporar al flujo principal previo al paso por la válvula de expansión.

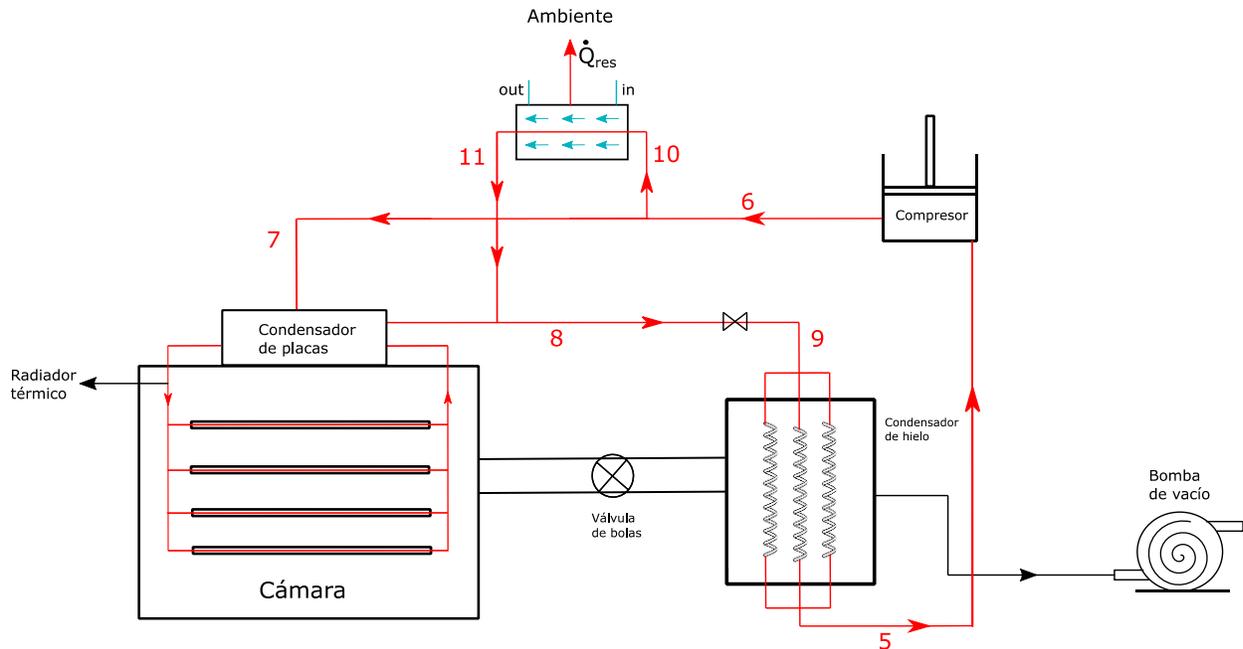


Figura 14: Sistema durante etapa de sublimación

El compresor del proceso de congelado funcionará en modo on/off con tal de cumplir los requerimientos. Dado que se va a reutilizar una unidad de condensación existente, no requiere mayor análisis, sin embargo, aún se requiere seleccionar y especificar las características del evaporador, el dispositivo de expansión, la trampa de hielo, el sistema de vacío y el sistema térmico para el proceso de sublimación.

Criterios en selección de equipos:

- ✓ Flujo de calor a transferir
- ✓ Fluidos de trabajo
- ✓ Presiones de trabajo
- ✓ Temperaturas de trabajo
- ✓ Flujos máxicos
- ✓ Pérdida de carga admisible del lado del refrigerante

4.3 Caracterización del sistema.

En primer lugar, se estimarán los tiempos correspondientes a cada proceso en base a la teoría presentada.

4.3.1 Tiempos de congelación de la fruta.

Para calcular los tiempos de congelación de la muestra se utilizará la teoría definida por la ASHRAE, en éste caso centrándonos en la manzana. En primer lugar, se observan las propiedades térmicas de ésta en las Tablas 3 y 4, para así empezar a desarrollar las ecuaciones y cálculos correspondientes. Vale recalcar que la fruta será llevada desde una temperatura de 15°C a una temperatura de -29°C utilizando un medio con una temperatura de -30°C.

Primeramente, se desarrolla el cálculo para el tiempo sobre el punto de congelamiento, es decir, desde la temperatura ambiente hasta los -1,5°C, así entonces se obtienen los siguientes valores:

$$Bi = \frac{2,724 * 0.0025}{0.427} = 0.016 \quad (18)$$

$$\omega * \cot g (\omega) + Bi - 1 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \omega = 0.2187 \quad (19)$$

El valor característico L se consideró de 5 mm, que corresponde a una rodaja de manzana.

Se procede a calcular el valor del factor j con los parámetros que se encuentran en la Tabla 1, obteniendo los siguientes resultados:

$$\mu = \left(\frac{1,5 + 0,69 Bi}{1,5 + Bi} \right)^N = 0.9967 \quad (20)$$

$$j_c = \frac{Bi^{1,35} + \frac{1}{\lambda}}{\frac{Bi^{1,35}}{j_\infty} + \frac{1}{\lambda}} = 1,001 \quad (21)$$

$$j_\infty = 1.271 + 0.305 \exp(0.172\gamma_1 - 0.115\gamma_1^2) + 0.425 \exp(0.09\gamma_2 - 0.128\gamma_2^2) = 1,576 \quad (22)$$

Por lo tanto, para un producto cuya forma es de tipo superficie infinita se puede expresar que:

$$j = 0.998 \approx 1 \quad (23)$$

Por último, se determina Y:

$$Y = \frac{T_{me} - T}{T_{me} - T_i} = \frac{-30 + 1.5}{-30 - 15} = 0.63 \quad (24)$$

Así, el tiempo requerido para llevar la fruta de 15°C hasta justo antes que se inicie el congelamiento está dado por:

$$t = \frac{3\rho c_p L^2}{\omega^2 k E} \ln\left(\frac{j}{Y}\right) = \frac{3 * 845 * 3600 * 0.0025^2}{0.2187^2 * 0.427 * 0.999} \ln\left(\frac{1}{0.63}\right) \quad (25)$$

$$t = 21.19 \text{ min}$$

De la misma manera y siguiendo los mismos pasos, se obtiene el tiempo de congelación de la manzana bajo el punto de congelamiento.

$$Bi = \frac{2.724 * 0.0025}{1.45} = 0.0047 \quad (26)$$

$$\omega * \cotg(\omega) + Bi - 1 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \omega = 0.1186 \quad (27)$$

El factor j de igual manera que la vez anterior se puede simplificar a 1 debido a que se mantiene la forma de la manzana. Para la tasa de transferencia de calor ahora se tiene que:

$$Y = \frac{T_{me} - T}{T_{me} - T_i} = \frac{-30 + 29}{-30 + 1.5} = 0.035 \quad (28)$$

Para obtener un tiempo de:

$$t = \frac{3\rho c_p L^2}{\omega^2 k E} \ln\left(\frac{j}{Y}\right) = \frac{3 * 788 * 1850 * 0.0025^2}{0.2187^2 * 1.45 * 0.999} \ln\left(\frac{1}{0.035}\right) \quad (29)$$

$$t = 74.8 \text{ minutos}$$

Teniendo así un tiempo total del proceso de aproximadamente 96 minutos. Las curvas de enfriamiento se observan en la Figura 15.

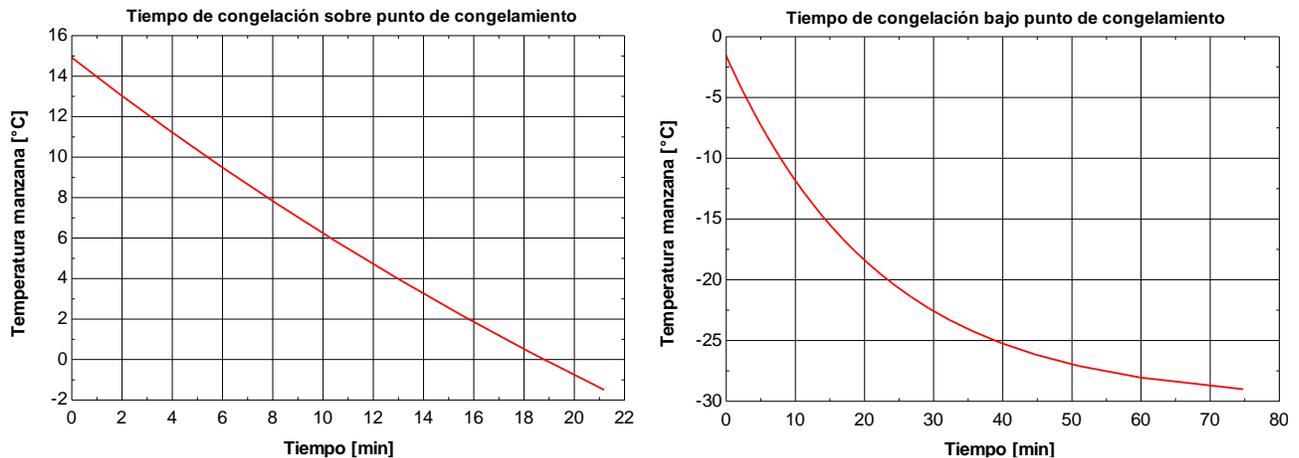


Figura 15: Curvas de enfriamiento de la manzana

Además, es necesario sumarle el tiempo requerido para el cambio de fase, el cual está dado por:

$$t_{lat} = \frac{m * L_{solidificación}}{\dot{Q}_{ev}} \quad (30)$$

Por lo que el tiempo quedará dado según la masa estipulada para el proceso.

4.3.2 Tiempo de secado.

Para obtener el tiempo de sublimación, se calcula el tiempo estimado de sublimación utilizando la ecuación (17), los datos establecidos se encuentran en la Tabla 8.

$$t_{subl} = \frac{0.012^2(0.84 - 0.03)}{2(30 - (-30))} * \left[\frac{845 * 3000000}{0.19} \right] = 12969 \text{ segundos}$$

Tabla 8: Datos de entrada etapa de secado

Z	0.012 m
T_0	30 °C
T_i	-30 °C
w_i	0.84
w_f	0.03
k	0.19 W/m ² °C
ρ_i	845 kg/m ³
λ_s	3000000 J/kg

El tiempo de sublimación determinado es aproximadamente de 224 minutos, es decir, alrededor de 3,73 horas. El tiempo obtenido está dentro de los rangos recomendados de tiempo de secado en las tecnologías existentes [8].

Cabe señalar que el sistema que absorbe el vapor generado durante la sublimación presentará un tiempo de operación equivalente a los tiempos de secado primario y secundario. Esto se considerará para el cálculo de potencias del respectivo sistema de refrigeración.

El secado secundario se realiza en un rango de presión de operación de 1-5 Pa y la temperatura de la fuente térmica puede aumentar para acelerar el proceso. Este proceso requiere de análisis experimental, esto debido a que debe ser controlado con sensores de temperatura, presión y humedad. El tiempo de secado secundario está dado por la siguiente ecuación.

$$t_{sec} = \frac{m * c_{p,spc} * (T_f - T_i)}{\dot{Q}_{rad}} = 7.78 \text{ minutos} \quad (31)$$

4.3.3 Dimensionamiento equipos

4.3.3.1 Sistema de refrigeración para condensador de hielo.

Es necesario comenzar analizando el condensador de hielo debido a que es el subsistema que requiere mayor cantidad de energía dentro del proceso de liofilización. Esto quiere decir que es el proceso limitante de acuerdo a la capacidad del compresor Frascold. Así, el desarrollo del ciclo entregará la masa equivalente de manzana capaz de procesar el ciclo completo. El refrigerante a ocupar será R404A debido a sus rangos de temperatura y su compatibilidad con el compresor seleccionado.

El sistema es evaluado utilizando el programa EES. En primer lugar, se realiza un análisis de la temperatura de evaporación, ésta es importante para generar la diferencia de presión entre la cámara y el condensador, siendo la principal fuerza motriz que atrae el vapor generado. Las moléculas de agua son atraídas hacia el punto más frío del sistema, que es el condensador de hielo. Su temperatura debe estar en un rango mínimo de 20°C de diferencia con respecto a la temperatura eutéctica de la manzana que bordea los -23°C. Es por esto que se parte desde un valor mínimo de -45°C asegurando un buen comportamiento. Los resultados se presentan en los gráficos de las Figuras 16 y 17.

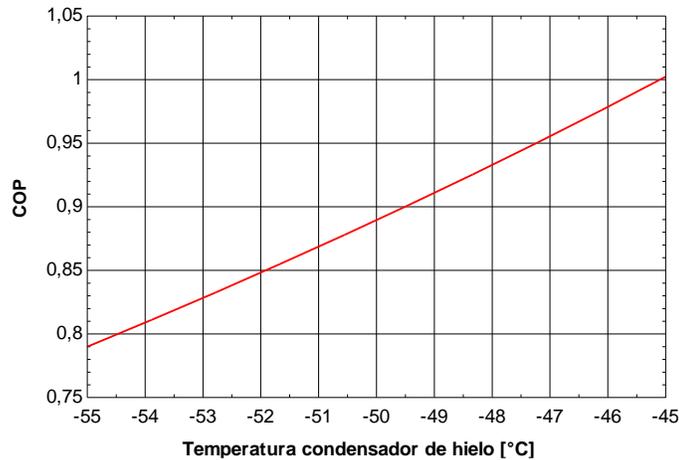


Figura 16: Gráfico COP vs Temperatura evaporación condensador de hielo

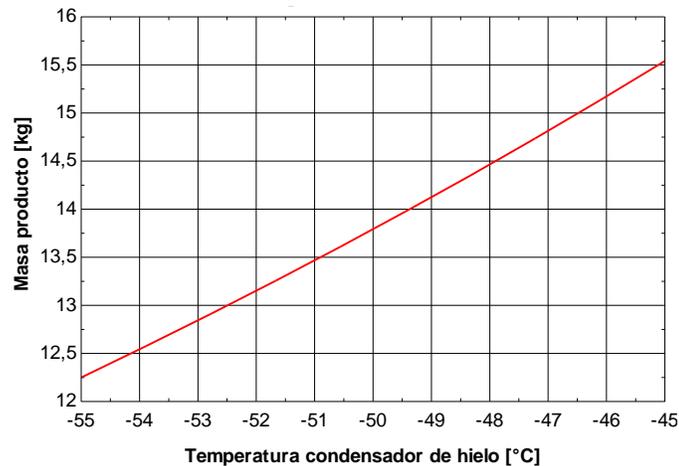


Figura 17: Gráfico masa vs Temperatura evaporación condensador de hielo

Tanto del gráfico de la Figura 16, cómo del gráfico de la Figura 17, se observa una clara mejoría en el rendimiento del sistema (COP) y en la cantidad de kg de manzana capaces de producir respectivamente a una temperatura de -45°C . Por lo tanto, la masa a considerar para el presente y los posteriores cálculos de diseño es de 15.54 kg.

Los datos de entrada del sistema se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9: Datos de entrada sistema de refrigeración para condensador de hielo

Temperatura condensador	40 °C
Sobrecalentamiento	5 °C
Subenfriamiento	5 °C
Eficiencia isentrópica compresor	65%
Potencia Compresor	3.7 kW
Masa de manzana	15.54 kg
Tiempo de operación	3.86 hrs

Por lo que los resultados del sistema son principalmente:

- ✓ COP igual a 1.002
- ✓ Flujo de refrigerante R404A de 0.04 kg/s
- ✓ Potencia del evaporador de 3.7 kW
- ✓ Potencia del condensador de 7.4 kW
- ✓ Presión máxima del sistema de 1830 kPa y una Presión mínima de 103.7 kPa

4.3.3.2 Sistema de refrigeración para congelación de la fruta

El sistema de refrigeración indicado para éste tipo de condiciones, es el tipo por compresión de vapor, ya que permiten alcanzar los rangos de temperatura hasta -30 o -55°C . Se considera refrigerante R404A por la temperatura a la que se desea llegar y además por las características del compresor disponible para el sistema. Los datos de entrada se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10: Datos entrada sistema de refrigeración etapa de congelamiento

Temperatura condensador	40 °C
Temperatura evaporador	-30°C
Sobrecalentamiento	5 °C
Subenfriamiento	5 °C
Eficiencia isentrópica compresor	65%
Potencia del compresor	0.73 kW
Masa de manzana fresca	15.54 kg
Tiempo de enfriamiento	95.9 min

Los resultados son obtenidos mediante el programa EES utilizando la teoría de ciclos por compresión de vapor.

Por lo que los resultados del sistema son principalmente:

- ✓ COP igual a 1.448
- ✓ Flujo de refrigerante R404A de 0.01 kg/s
- ✓ Potencia del evaporador de 1.06 kW
- ✓ Potencia del condensador de 1.79 kW
- ✓ Presión máxima del sistema de 1830 kPa y una Presión mínima de 131 kPa

Teniendo ya la masa de manzana que se requiere congelar y la potencia del evaporador, es posible calcular el tiempo requerido para realizar el cambio de fase mencionado en la ecuación (30).

$$t_{lat} = \frac{m * L}{\dot{Q}_{ev}} = \frac{15.54 \text{ kg} * 281 \text{ J/kg}}{1.06} = 4.166 \text{ segundos}$$

Por lo tanto, el tiempo correspondiente al cambio de fase es despreciable para los cálculos.

4.3.3.3 Sistema de calor para sublimación de fruta

El calor entregado al sistema es mediante radiación térmica y conducción [8], el cual llevará a cabo el proceso de la sublimación del agua solidificada. La temperatura será llevada desde los -30°C hasta los 5°C para asegurar la evaporación total del agua perteneciente a la manzana. De esta manera, el calor necesario para realizar este proceso está dado por:

$$Q_{nec,l} = m * c_{p,spc} * \Delta T_{spc} + m * L + m * c_{p,bpc} * \Delta T_{bpc} \quad (32)$$

$$Q_{nec,l} = 15.54 * [3,6 * 6,5 + 3000 + 1,85 * 28,5] = 46621 \text{ kJ} \quad (32)$$

Por lo tanto, el flujo de calor entregado por el sistema térmico a la cámara mediante radiación y conducción queda definido por:

$$\dot{Q}_{st} = \frac{Q_{nec,l}}{t} = \frac{46621 \text{ kJ}}{12969 \text{ s}} = 3.6 \text{ kW} \quad (33)$$

Lo estimado en el punto 4.3.3 es realizado con la ayuda del programa EES. La tabla de propiedades y sus respectivas ecuaciones se encuentran en el Anexo. En la Tabla 11 se presenta un cuadro resumen de las principales características del sistema.

Tabla 11: Principales características del sistema de liofilización

Parámetro	Ciclo de Congelado de la fruta	Ciclo de secado de la fruta
Potencia compresor	0.73 kW	3.7 kW
Potencia condensador	1.8 kW	7.4 kW
Potencia evaporador	1.1 kW	3.7 kW
Flujo másico refrigerante	0.01 kg/s	0.04 kg/s
Eficiencia compresor	65 %	65 %
COP	1.448	1.002

4.4 Descripción y selección de componentes principales

4.4.1 Cámara

La cámara será el lugar donde ocurrirá tanto el proceso de congelamiento como el posterior secado. Ésta debe ser de acero inoxidable además de contar con los respectivos paneles aislantes. La cámara deberá almacenar en el interior el evaporador, el sistema térmico y el producto a liofilizar en bandejas. Cabe recordar que la masa del producto en cada ciclo será de 15.5 kg, ocupando un volumen de $0.018 m^3$ considerando la densidad de la manzana en su estado inicial. Esta podrá ser distribuida en 4 o 5 bandejas con un área superficial inferior a $1 m^2$. Por lo que para el proyecto la cámara de liofilizado no debe ser de un valor menor a $1m^3$. Su dimensión exacta dependerá del tamaño del evaporador y del sistema térmico a utilizar. Es importante considerar que la cámara deberá tener una puerta con el fin de suministrar o retirar el producto, y principalmente deberá contener un ducto hacia el exterior por el cual pasarán los vapores propios de la sublimación hacia el condensador de hielo. Éste ducto contará con una válvula para controlar el paso de vapor y además mantener sellado el paso durante la etapa de congelamiento. La válvula generalmente suele ser una válvula de bolas.

4.4.2 Evaporador

Para el evaporador se considera un intercambiador de tubos y aletas. Los parámetros principales que debe tener el evaporador se encuentran en la Tabla 12. Sin embargo, aún falta detallar algunas especificaciones como la temperatura de entrada y de salida del fluido secundario, es decir, el aire que va hacia la cámara.

Tabla 12: Parámetros para diseño de evaporador

Tipo	Tubo y aletas
Fluido secundario	Aire
Capacidad	1.1 kW
Flujo másico refrigerante	0.01 kg/s
Flujo másico aire	$420 m^3/hra$
Presión de operación	202 kPa

Temperatura de evaporación	-30°C
T entrada R404A	-30.35°C
T salida R404A	-25°C

Para la confección de un evaporador acorde a las necesidades del proyecto se requiere solicitar directamente a una fábrica informando el diseño. Un evaporador que cuenta con características similares a las del sistema tiene un precio de 650.000 pesos, obtenido de la empresa Antartic.

4.4.3 Condensador de hielo

El condensador de hielo, consiste en una cámara conectada en un extremo a la cámara de liofilización y por el otro extremo a una bomba de vacío. Esta cámara suele estar hecha de acero inoxidable. En su interior cuenta con un serpentín por el cual circula el fluido refrigerante congelando todo el vapor que transcurre por dicha zona. Al necesitar este un desmontaje manual del hielo formado una vez terminado el ciclo, debe diseñarse para acumular un volumen de hielo igual o mayor al generado, esto influye en el diseño del serpentín, específicamente en la separación de las aletas de éste.

En este caso el volumen de hielo generado, considerando que se condensa la totalidad del vapor, está dado por la siguiente ecuación.

$$V = \frac{\text{masa} * (w_i - w_f)}{\rho_{hielo}} * 1000$$

$$V = \frac{15.54 \text{ kg} * (0.84 - 0.03)}{920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} * 1000 \frac{\text{Lts}}{\text{m}^3} = 13.7 \text{ Litros}$$

Siendo w_i el porcentaje de humedad inicial y w_f el porcentaje de humedad final. Entonces considerando eso y decretando un grosor máximo de la capa de hielo sobre el serpentín de 0.5mm para evitar pérdidas de transferencia de calor, nos indica que el condensador de hielo debe tener un área de transferencia equivalente a 27.4 m^2 . El tiempo de congelamiento del vapor sublimado no es un factor limitante, al ser un proceso que dura un poco menos de 4 horas y la cantidad de vapor generado es relativamente bajo, no se considera un problema. El caudal de vapor que fluye durante el ciclo no es uniforme, el secado suele ser mucho más rápido al principio del secado primario.

4.4.4 Fuente térmica proceso de sublimación.

Como condensador del sistema, definido como fuente de calor para la fruta durante el proceso de secado, se considera un intercambiador de placas como el que se muestra en la Figura 18, en base a la disponibilidad existente en el mercado y los parámetros conocidos.

Este intercambiador de calor trabaja con agua como fluido secundario. La totalidad de sus especificaciones técnicas se encuentra en el Anexo, al igual que su plano detallado. Este condensador de por sí no puede alimentar la cámara porque trabaja con agua.



Figura 18: Condensador de placas

Se plantea la idea de utilizar bandejas en las que se depositará la manzana, haciendo circular agua a la temperatura deseada gracias a la ayuda del condensador. Similar al que se observa en la Figura 19, que se utiliza en los evaporadores de contacto.



Figura 19: Diseño placa térmica.

Esta placa de acero transmitirá por el lado superior calor por conducción hacia la manzana mientras que por la parte inferior irradiará calor como se observa en el esquema de la Figura 20. Para esto se debe determinar el área de transferencia para cumplir con el flujo de calor necesario para la liofilización equivalente a 3.6 kW.

En primer lugar, se considera el flujo másico de refrigerante que debe pasar por el condensador de placas, conociendo que el flujo excedente se irá a un intercambiador de calor para eliminar el calor residual al ambiente.

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{m}_{cd} * (h_7 - h_8) \quad (34)$$

$$3.6 \text{ kW} = \dot{m}_{cd} * (436.6 - 252) \quad (34)$$

$$\dot{m}_{cd} = 0.019 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

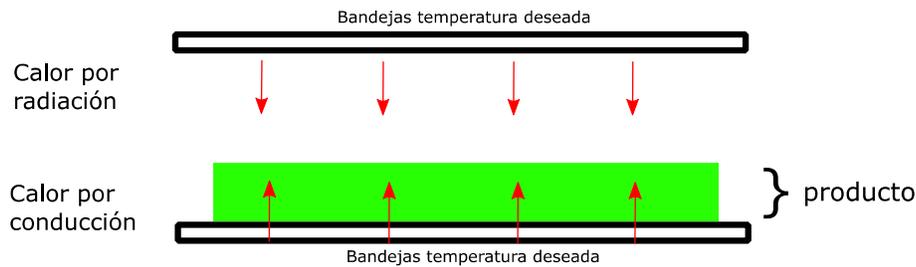


Figura 20: Esquema transferencia de calor hacia la fruta.

Por la teoría de conducción y radiación se tienen las siguientes ecuaciones, utilizando la temperatura de la cámara y de la manzana igual a 0°C , ya que, el tiempo del proceso durante el calor sensible es despreciable.

$$\dot{Q}_{\text{liof}} = 3.6 \text{ kW} = \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{cd}} \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{\text{cd}} = \frac{T_{\text{pl}} - T_{\text{manz}}}{\frac{e_{\text{pl}}}{k_{\text{pl}}} + \frac{e_{\text{manz}}}{k_{\text{manz}}}} * A_t = \frac{30^{\circ}\text{C}}{\frac{0.005}{50} + \frac{0.012}{0.19}} * A_t \quad (36)$$

Siendo e_{pl} y e_{manz} las resistencias térmicas de la placa de acero y de la manzana respectivamente, de igual manera k_{pl} y k_{manz} son la conductividad térmica de la placa y de la manzana. Por lo que el calor de conducción queda dado por:

$$\dot{Q}_{\text{cd}} = 474.25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * A_t$$

Mientras que para el flujo de calor por radiación es:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma * \varepsilon_t * (T_{\text{pl}}^4 - T_{\text{manz}}^4) * A_t \quad (37)$$

Siendo σ la constante Stefan Boltzmann igual a $5.67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ y ε_t la emisividad térmica del acero igual a 0.75 por lo que la ecuación queda:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = 5.67 * 10^{-8} * 0.75 * (303^4 - 243^4) = 210.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * A_t$$

Volviendo a la ecuación (35) podemos calcular el área de transferencia.

$$3.6 \text{ kW} = 210.2 * A_t + 474.25 * A_t$$

$$\Leftrightarrow * A_t = \frac{3600\text{W}}{(210.2 + 474.25)} = 5.26 \text{ m}^2$$

Estableciendo una cantidad de 5 bandejas, contempla un área aproximada de $1m^2$ en cada una.

Para el tema del flujo másico del circuito de agua queda dado por:

$$\dot{Q}_{st} = \dot{M}_r * c_p * (T_{pl} - T_{amb}) \quad (38)$$

$$3.6 \text{ kW} = \dot{M}_r * 4.186 * (30 - 15)$$

$$\Leftrightarrow \dot{M}_r = 0.057 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4.4.5 Sistema de vacío

La bomba de vacío debe ser capaz de llevar la presión interna de la cámara a valores de alto vacío, el proceso de sublimación se logra bajo los 612 pascales con el fin de no pasar por el estado líquido. Sin embargo, al interior de la cámara la presión varía debido a diferentes aspectos, por lo que se recomienda utilizar durante el secado primario una presión de vacío inicial de alrededor de 100 Pa, equivalente a 1 mbar. Mientras que durante el secado secundario la presión de vacío se debe bajar hasta los 0.01 mbar.

Si bien, la bomba de vacío se utiliza para lograr el vacío en primer lugar, también es la encargada de extraer el vapor que no logra congelarse en el condensador además de regular la presión debida a las pérdidas generadas. Para el caso en estudio se requiere una conexión trifásica por recomendaciones de la literatura basado en la potencia total del sistema.

Para la selección del sistema de vacío se analizaron una serie de opciones. Técnicamente hablando el sistema ideal consiste en una bomba de tornillo sin aceite que opera con dos tornillos paralelos que giran rápidamente para impulsar el flujo de aire. Esta bomba posee una alta precisión, no hay fricción entre ambos tornillos, por lo que el ruido es bajo, la vibración es pequeña, no hay desgaste, no requiere lubricación, y la vida útil es larga. Sin embargo, el costo es elevado para el contexto del proyecto. Para procesos de liofilizado se suelen usar bombas de paletas de 2 etapas. Debido a que la presión objetivo es de 1-2mbar durante el secado primario y de 0.01 mbar durante el secado secundario, no se puede utilizar una bomba de paleta en baño de aceite de una etapa. En la Figura 21 se puede apreciar el modelo, mientras que en la Tabla 13 se pueden observar sus principales características. En el anexo se presenta el detalle de la bomba seleccionada. Una de las desventajas es que ante un mal diseño y dimensionamiento en el condensador de hielo y ante el eventual paso de vapor hacia la bomba de vacío existe la posibilidad que se contamine el sistema.



Figura 21: Bomba de vacío de paletas de 2 etapas

Tabla 13: Características bomba de vacío

Fabricante	Marpa Vacuum
Modelo	MVD-010
Caudal nominal	10 m ³ /h
Vacío final	0.005 mbar
Potencia motor	0.4 kW
Frecuencia	50 Hz

4.5 Costos energéticos.

El costo energético es uno de los 3 aspectos económicos importantes que dificultan la liofilización a grandes escalas, por lo tanto, es importante realizar un respectivo análisis y evaluar los costos asociados a la energía requerida para completar un proceso de liofilización. En la Tabla 15 se observa la energía consumida por los diferentes equipos del sistema simplificándolo a los equipos con mayor consumo obteniendo un valor de 16.9 kWh del sistema total.

Tabla 14: Energía consumida en el sistema

Componente	Potencia [kW]	Tiempo de operación [hrs]	Energía consumida [kWh/ciclo]
Compresor etapa de congelación	1.01	1.6	1.61
Compresor etapa de secado	3.7	3.86	13.80
Bomba de vacío	0.4	3.86	1.49

Por la cantidad de potencia requerida, el servicio de electricidad es de tipo BT1, debido a que la potencia total del sistema es menor a 10 kW. En la Tabla 16 se indican los costos asociados y

detallados del servicio correspondientes al tipo de tarifa, los datos están actualizados a día 1 de Julio de 2022.

Tabla 15: Tarifa eléctrica en Concepción. [Fuente: CGE]

Administración del Servicio	Cargo Fijo Mensual BT1 [\$/cliente]	1046.93 CLP
Transporte de electricidad	Cargo por uso del sistema de transmisión [\$/kWh]	22.251 CLP
	Cargo por servicio público [\$/kWh]	0.701 CLP
Electricidad consumida	Cargo por energía consumida [\$/kWh]	90.327 CLP

Hablando estrictamente del costo de la energía por cada ciclo, es decir, el costo para producir 15.54 kg de manzana liofilizada queda estipulado en la ecuación 36.

$$\text{Costo por ciclo} = 16.9 \text{ kWh} * (22.251 + 0.701 + 90.327) = 1914 \text{ CLP} \quad (36)$$

Esto quiere decir que el costo para producir 2.95 kg del producto final a partir de 15.54 kg d manzana fresca es de \$1914, a esto se le añadiría el costo fijo de administración del servicio. Al ser altos valores de costos fijos mensuales, considerarlos para el costo de la energía por ciclo se obtendría un valor alejado de la realidad.

Considerando el tiempo total del proceso igual a 5.4 hrs se podrían realizar 3 ciclos x día incluyendo un trabajo de tiempo completo. Sin embargo, al ser el proceso de congelación en la misma cámara, conlleva tiempo prepararla por el tema de generar el vacío y posteriormente se debe retirar el hielo acumulado en el condensador. Así considerando que el equipo piloto trabaje durante 30 días al mes se completan un total de 90 ciclos produciendo 265.5 kilos de manzana liofilizada. Ahora de manera mensual el consumo de energía se define como aparece en la ecuación (39).

$$\text{Costo mensual} = 1046,93 + 90 * 16.9 \text{ kWh} * (22,251 + 0,508 + 90,327) \quad (39)$$

$$\text{Costo mensual} = 174068 \text{ CLP} \quad (39)$$

Lo expuesto en el resultado representa un costo de energía de 655.6 pesos chilenos por kilo de manzana. Éste valor no incluye los costos de inversión en equipos, del personal de trabajo, de la materia prima entre otros costos asociados a la producción.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

Una vez diseñado el sistema e intentado aprovechar el máximo los equipos existentes y los flujos de calor, es posible sacar una serie de conclusiones en base a la información y datos reunidos.

- El proceso de liofilizado en sí es complejo, para lograr un producto de calidad se requiere gran rigurosidad a la hora de definir los detalles de un sistema, ya que existen muchas variantes involucradas, lo que conlleva a una gran cantidad de factores que pueden afectar positiva o negativamente el proceso. Es importante respetar los principios del proceso: los tiempos de enfriamiento y de secado para asegurar una completa congelación y sublimación de la humedad respectivamente. Mantener constante una condición de alto vacío en la cámara para que no exista un colapso en el sistema, es decir, que ocurra una fusión en la humedad del producto. Dimensionar el condensador de hielo para que sea capaz de absorber la totalidad del vapor sin que ocurra una saturación.
- Para el diseño se intentó maximizar el beneficio de contar con una unidad de condensación, escalando y determinando parámetros en base a las características del compresor y condensador. Finalmente se logró un diseño que en teoría cumpliría todos los objetivos de un correcto proceso para obtener manzana liofilizada, se estableció un sistema para aprovechar el flujo de calor generado en el ciclo de refrigeración para utilizarlo como fuente térmica para la cámara de secado, significando un ahorro en el costo energético. Se logró proponer un tiempo de congelamiento y de secado igual a 5.3 horas, aceptable considerando que se disminuyó en la mayor cantidad posible el tiempo sin afectar el objetivo de un producto de calidad. Se estableció las diferentes características de cada equipo del sistema, principalmente potencias, áreas de transferencias y tamaños. Sin embargo, el condensador de hielo y las placas térmicas utilizadas como bandeja, requieren una mayor investigación y análisis considerando las condiciones del medio, con la finalidad de realizar un diseño óptimo y más específico del realizado en el presente proyecto.
- El proyecto se presenta como una buena oportunidad para recuperar la unidad condensadora existente en la Universidad. Al ser para un establecimiento de educación, es posible la creación del sistema con fines de estudio, para analizar el proceso de liofilización y observar el comportamiento que éste tiene considerando sus diferentes subprocesos, siempre abierto a mejoras en el diseño para aumentar el rendimiento del ciclo. Ya que, el sistema no es rentable debido a sus altos costos de inversión, mantenimiento y energéticos.

5.1 Perspectivas.

- Una alternativa a la solución propuesta es realizar un análisis y rediseño de lo existente actualmente concerniente al sistema de liofilización con sistema de eyectores en vez de una bomba de vacío y un condensador de hielo. Se puede llegar a disminuir en gran medida el costo energético, aunque se debe analizar también la complejidad del sistema, que requiere una mayor cantidad de componentes y subsistemas.
- Como en todo proyecto, para una conclusión más acertada del sistema diseñado, se debe realizar un análisis experimental mediante un sistema de monitoreo para controlar los parámetros más importantes que en este caso son la temperatura del producto, su respectiva humedad y la presión existente en ambas cámaras. De esta manera con la recopilación de datos sería más congruente el realizar cambios de ciertos parámetros del ciclo analizando su comportamiento.

Referencias

- [1] Wilhelm G., Haseley P (2004), *Freeze-Drying*, Wiley-VCH, Second Edition.
- [2] Berk Z, (2013), *Food Process Engineering and Technology*, Academic Press, Second edition, Israel Institute of Technology.
- [3] Zhang F. (2018), *Ice Templating Freeze-Drying for porous materials and their applications*, Wiley-VCH, University of Liverpool.
- [4] (2017), *Liofilización de alimentos : Dos métodos de conservación en uno*, Infoalimentos, <https://infoalimentos.org.ar/temas/inocuidad-de-los-alimentos/438-lio-filizacion-de-alimentos-dos-metodos-de-conservacion-en-uno>
- [5] Vilas C, López E, Alonso A, (2020), *Model-Based Real time Operation of the freeze-drying process*, University of Birgminghan, England.
- [6] (2019), ¿What is Newton's Law of Cooling?, <https://byjus.com/jee/newtons-law-of-cooling/>
- [7] Ramaswamy H, (1981), *Thermophysical Properties of Apples in Relation to Freezing*, Institute of food technologists, EEUU.
- [8] (2019), *Apple freeze drying process*, Song Yuang Freeze Dryer, China. https://www.vacuumfreezedryer.cn/newsshow_162.html
- [9] Barley J, *Basic Principles of Freeze drying*, SPscientific <https://www.spscientific.com/freeze-drying-lyophilization-basics/>
- [10] Ferrer M, Ramos G, Ledesma R, (2018), *Design of a vapor compression refrigeration system*, Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato.
- [11] Cuevas C, (2021), *Congelación y conservación de alimentos*. Universidad de Concepción, Chile.
- [12] Q.Cui. (2008), *Measurement of the eutectic point and melting point of the freeze-dried materials based on electric resistance method*.
- [13] (2014), Evaporador Comercial Cúbico ECC, Expansión directa HFCs, Intercal, Chile.
- [14] Ramirez J, *Predicción de tiempos de congelación y descongelación de alimentos*, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- [15] Orrego C, (2008), *Congelación y Liofilización de alimentos*, Universidad Nacional de Colombia.
- [16] Makhlof J, (2002), *Freeze-drying characteristics of strawberries*, Laval University, Canadá.
- [17] Antal T, (2013), *Assessment of freezing pre-treatments for the freeze dried of apple slices*, Hungary.

- [18] Echave M, (2019), *Conceptos básicos de liofilización por sistema de eyectores*, Biofoods, Argentina.
- [19] (2018), *Refrigeration*, ASHRAE Refrigeration. SI Edition.
- [20] Neyfel K, Kavak E. (2016), *Experimental determination of convective heat transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of apple slices*, Universidad de Osmaniye, Turquía.
- [21] Zhang S, Luo J. (2018), *Step utilization of energy with ejector in a heat driven freeze drying system*, Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology, Zheijiang, China.
- [22] Navarrete A. (2022), *Memoria de título, evaluación de deshidratado de frutas mediante método de liofilización*, Universidad de Concepción.
- [23] Whagmare O, Moses A. (2021), *Recent developments in freeze drying of foods*.

Anexo

Tabla 1A: Valores termodinámicos sistema de liofilización

Punto	Temperatura [°C]	Presión [kPa]	Entalpía [kJ/kg]
1	-35	131	347.5
2	81.8	1830	432
3	35	1830	252
4	-40.3	131	252
5	-40	103.7	344.4
6	85.8	1830	436.6
7	35	1830	252
8	-45.3	103.7	252

Tabla 2A: Valores equipos principales sistema de liofilización

Equipo	Precio [CLP]	Fábrica
Evaporador	500.000-600.000	Intercal
Condensador de placas	212.000	Baode
Bomba de vacío	1.310.000	Marpa Vacuum
Válvula de bolas	108.000	Provaltec

"Tiempo enfriamiento sobre punto de congelación"

$L=0,0025$
 $\text{alfa}=0,00014$
 $Bi=h*L/k$
 $h=2,724$
 $k=0,427$
 $\text{time_spc}=\ln(j_m/Y)*(3*\rho*cp_spc*1000*L^2)/(w^2*k*E)/60$
 $j=1$
 $j_m=((1,5+0,69*Bi)/(1,5+Bi))*j_c$
 $j_c=(Bi^{1,35}+1)/((Bi^{1,35})/j_inf+1)$
 $j_inf=1,271+0,305$
 $Y=(T_ev-T1)/(T_ev-15)$
 $T1=-1,5$
 $w=0,2187$
 $E_0=1$
 $E_inf=0,75$
 $E=(Bi^{(4/3)}+1,85)/(Bi^{(4/3)}/0,75+1,85)$
 $\rho=845$
 $\mu=(1,5+0,69*Bi)/(1,5+Bi)$

"Tiempo enfriamiento bajo el punto de congelación"

$L_2=0,0025$
 $\text{alfa}_2=0,00014$
 $Bi_2=h^2*L_2/k_2$
 $h_2=2,724$
 $k_2=1,45$
 $\text{time_bpc}=\ln(j_m2/Y_2)*(3*\rho_2*cp_bpc*1000*L_2^2)/(w_2^2*k_2*E_2)/60$
 $cp_bpc=1,85$
 $j_m2=((1,5+0,69*Bi_2)/(1,5+Bi_2))*j_c2$
 $j_c2=(Bi_2^{1,35}+1)/((Bi_2^{1,35})/j_inf2+1)$
 $j_inf2=1,271+0,305$
 $Y_2=(T_ev-T2)/(T_ev+1,5)$
 $T2=-29$
 $w_2=0,1186$
 $E_02=1$
 $E_inf2=0,75$
 $E_2=(Bi_2^{(4/3)}+1,85)/(Bi_2^{(4/3)}/0,75+1,85)$
 $\rho_2=788$
 $L_sol=0,281$
 $\text{tiempo_lat}=m*L_sol/3,7$

Figura A1: Programa para obtener tiempos de congelación de la fruta.

```

"Sistema de refrigeración"

T_ev=-30
T_cd=40
x_1=1
T_sh=5
T_sc=5
eps_cp=0,65
time=time_bpc+time_spc
t=time*60
Q_dot_ev=Q_necs/t
Q_necs=m*L_sol*1000+m*(cp_spc*16,5+cp_bpc*28,5)

"Presiones"

P_1=Pressure(R404A;T=T_ev;x=1)
P_3=Pressure(R404A;T=T_cd;x=0)
P_1=P_4
P_3=P_2

"Temperaturas"

T_1=T_ev+T_sh
T_2=Temperature(R404A;P=P_2;h=h_2)
T_3=T_cd-T_sc
T_4=Temperature(R404A;P=P_4;h=h_4)

"Energías"

h_1=Enthalpy(R404A;T=T_1;P=P_1)
s_1=Entropy(R404A;T=T_1;P=P_1)
h_2s=Enthalpy(R404A;P=P_2;s=s_1)
h_2=h_1+(h_2s-h_1)/eps_cp
h_3=Enthalpy(R404A;T=T_3;P=P_3)
h_3=h_4

"Energías"

W_dot_cp=M_dot_r*(h_2-h_1)
Q_dot_cd=M_dot_r*(h_2-h_3)
Q_dot_ev=M_dot_r*(h_1-h_4)
COP=Q_dot_ev/W_dot_cp

```

Figura A2: Programa para obtener datos Sistema de refrigeración para congelar fruta.

"Etapa de sublimación"

```
Z=0,012
T_0=30
T_i=-30
w_i=0,84
w_f=0,03
k_l=0,19
rho_l=845
lambda_s=3000000

t_liof=(Z^2*(w_i-w_f))/(2*(T_0-T_i))*(rho_l*lambda_s)/k_l

Q_nec_liof=m_2*(cp_spc*Delta_spc+L_sub+cp_bpc*Delta_bpc)
Delta_spc=6,5
Delta_bpc=28,5
L_sub=3000
Q_rad=Q_nec_liof/t_liof
```

Figura A3: Programa para obtener datos sobre proceso de liofilización.

"Congelador de vapor de sublimación"

```
T_cd2=40
T_ev2=-45

W_dot_cp_c=3,7
Ld=3000
Q_dot_ev_c=Q_necd/t_liof
Q_necd=m_2*Ld+m_2*(cp_spc*6,5+cp_bpc*38,5)

"Calor latente de deposición"
"Potencia evaporador"
```

"Presiones"

```
P_5=Pressure(R404A;T=T_ev2;x=1)
P_7=Pressure(R404A;T=T_cd2;x=0)
P_5=P_8
P_7=P_6
```

"Temperaturas"

```
T_5=T_ev2+T_sh
T_6=Temperature(R404A;P=P_6;h=h_6)
T_7=T_cd2-T_sc
T_8=Temperature(R404A;P=P_8;h=h_8)
```

"Entalpias"

```
h_5=Enthalpy(R404A;T=T_5;P=P_5)
s_5=Entropy(R404A;T=T_5;P=P_5)
h_6s=Enthalpy(R404A;P=P_6;s=s_5)
h_6=h_5 + (h_6s-h_5)/eps_cp
h_7=Enthalpy(R404A;T=T_7;P=P_7)
h_7=h_8
```

"Energías"

```
W_dot_cp_c=M_dot_r_c*(h_6-h_5)/eps_cp
Q_dot_cd_c=M_dot_r_c*(h_6 - h_7)
Q_dot_ev_c=M_dot_r_c*(h_5 - h_8)
COP_c=Q_dot_ev_c/W_dot_cp_c
```

Figura A4: Programa para obtener datos sobre sistema de refrigeración para congelador de hielo.



Baode Plate Heat Exchanger

Technical specification

Customer :

Model : BL26W-16D

Price :

Item : **Date :** Tuesday 11-8

Fluid		R404A	Water
Mass flow rate	kg/h	127.1	792.3
Fluid Condensed/Vapourized	kg/h	127.1	0.000
Inlet temperature	°XC	40.0	30.0
Outlet temperature(vapor/liquid)	°XC	39.7/36.8	35.0
Operating pressure (In/Out)	bar	18.6/18.6	
Pressure drop (Perm/Calc)	kPa	372/0.739	100/5.45
Velocity Connection (In/Out)	m/s	0.802/0.0752	0.489/0.490
Heat Exchanged	kW	4.600	
Heat Transfer Area	m ²	0.3	
O.H.T.C clean conditions	W/(m ² *K)	2102	
O.H.T.C service	W/(m ² *K)	1813	
Additional Excess Surface	%	16	
Mean Temperature Difference	K	7.3	
Relative direction of the fluids		Countercurrent	
No. of plates		16	
No. of effective plates		14	
Number of passes		1	1
Plate material		AISI 316L	

Performance is conditioned on the accuracy of customer's data and customer's ability to supply equipment and products in conformity therewith.

Site: XiCheng road 33#, Jiang yin city, Jiang su Province, China

Tel.: 0086-13584139179

Email : eric.baodephe@gmail.com

Figura A5: Especificaciones técnicas condensador de placa

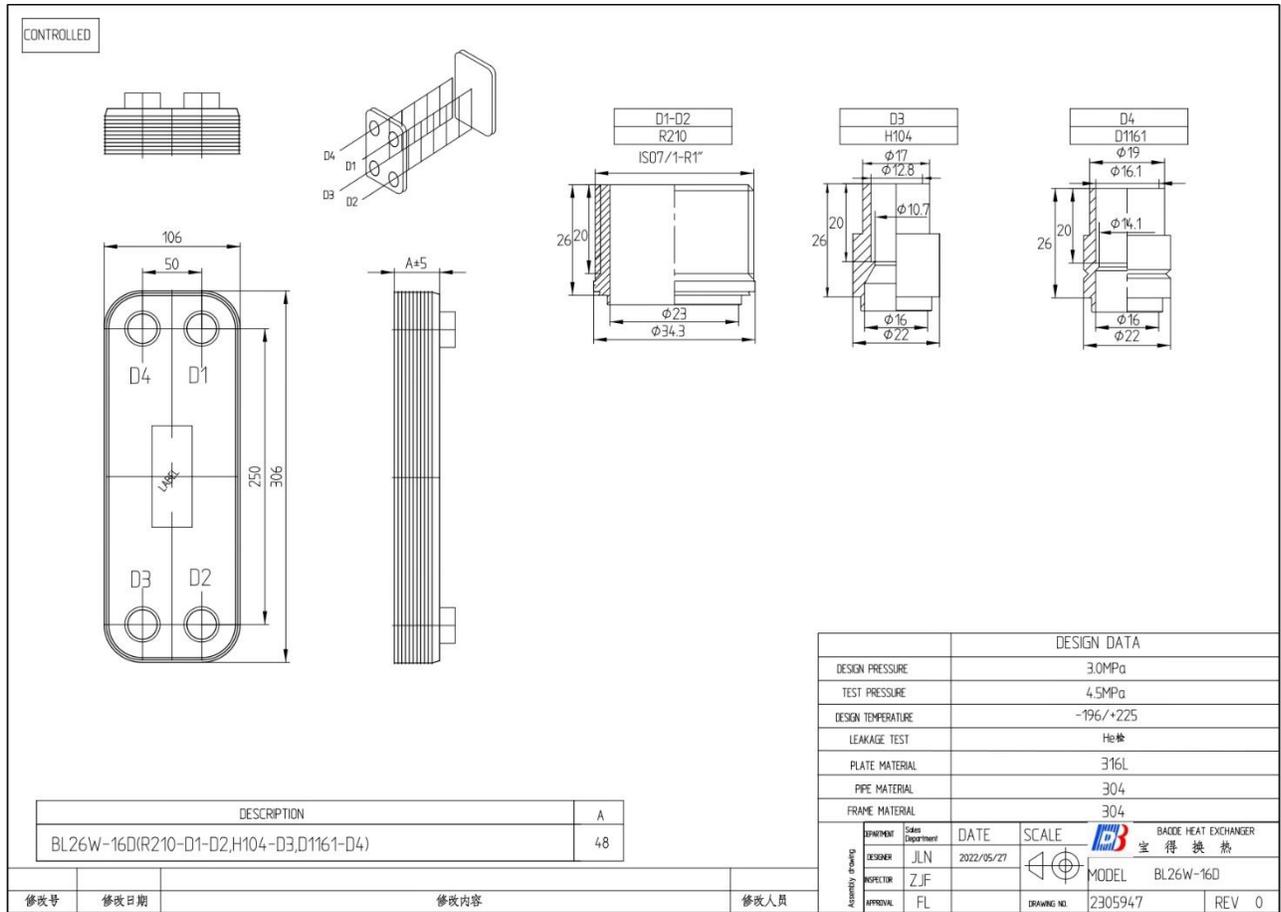


Figura A6: Plano detallado condensador de placas

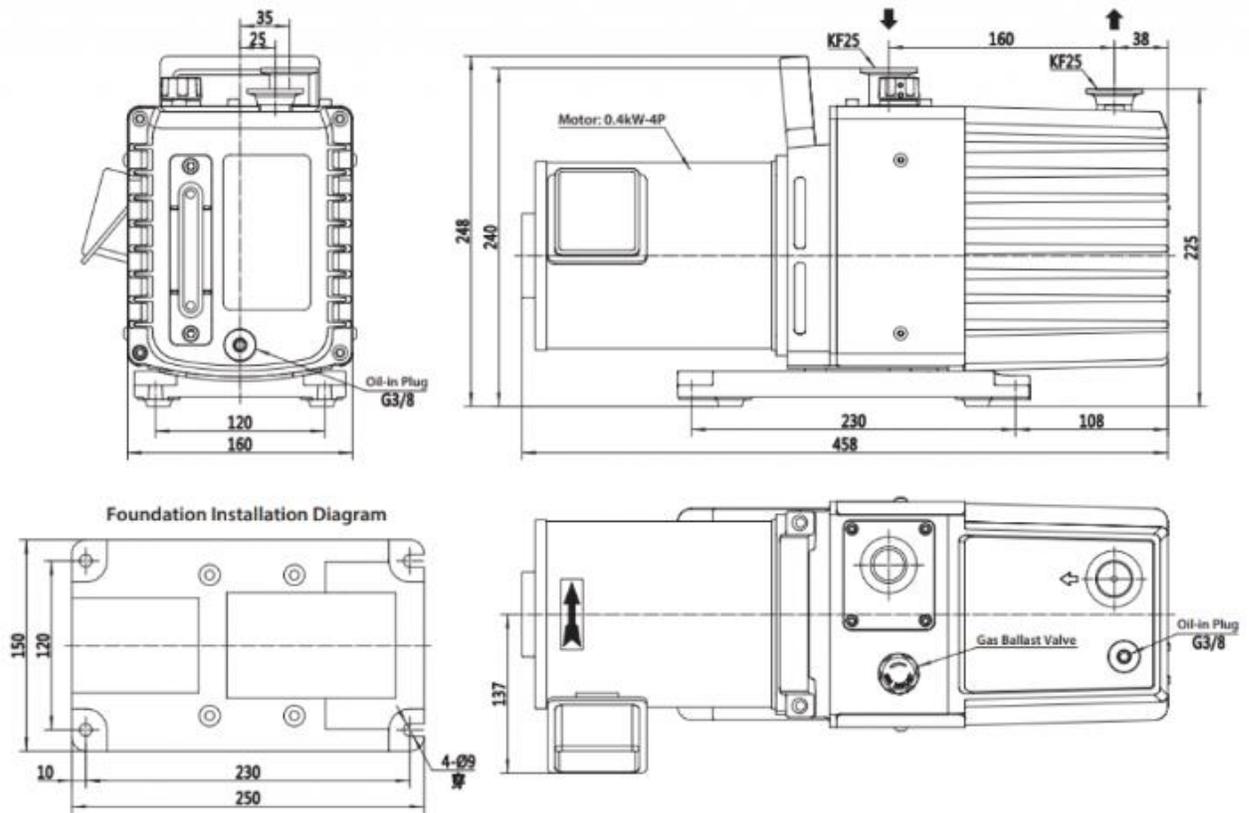


Figura A7: Plano detallado bomba de vacío

Características técnicas	Unidades	50 Hz
Caudal Nominal	m ³ /h	10
Vacío parcial final	mbar	10 ⁻⁴ mbar
Vacío final	mbar	5x10 ⁻³ mbar
Potencia del Motor	Kw	0,4
Velocidad de giro Nominal	rpm	1.45
Tolerancia vapor de agua	mbar	50
Rumorosidad	dB(A)	50
Capacidad de aceite	Lt	1,1
Peso	Kg	25
Temperatura ambiente admisible	°C	5-40
Conexión de entrada	DIN	25 KF
Conexión de salida	DIN	25 KF

Figura A8: Especificaciones técnicas bomba de vacío