



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN LIOFILIZADOR PARA MORA DE CASTILLA  
PREVIO A SU INDUSTRIALIZACIÓN EN LA COMUNIDAD  
CORAZÓN DE JESÚS DE LA PARROQUIA PUNIN”**

Trabajo de titulación presentado para obtener el grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR: GABRIELA ELIZABETH CAMPOS MERA**

**TUTOR: ING. MARCO RAÚL CHUIZA ROJAS**

Riobamba-Ecuador

2015

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

## FACULTAD DE CIENCIAS

### ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “DISEÑO DE UN LIOFILIZADOR PARA MORA DE CASTILLA PREVIO A SU INDUSTRIALIZACIÓN EN LA COMUNIDAD CORAZÓN DE JESÚS DE LA PARROQUIA PUNIN” de responsabilidad de la señorita Gabriela Elizabeth Campos Mera ha sido revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dra. Nancy Veloz	.....	.....
<b>DECANA FAC. CIENCIAS</b>		
Dr. Juan Marcelo Ramos	.....	.....
<b>DIRECTOR DE ESCUELA</b>		
Ing. Marco Chuiza	.....	.....
<b>DIRECTOR DE TESIS</b>		
Ing. Mónica Andrade	.....	.....
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		
Ing. Mario Villacrés	.....	.....
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		
<b>DOCUMENTALISTA</b>		
<b>SISBIB ESPOCH</b>	.....	.....

Yo, Gabriela Elizabeth Campos Mera, autora y ejecutora del presente proyecto de titulación me responsabilizo de las opiniones, pensamientos y resultados expuestos en la presente investigación, siendo la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo dueña intelectual de la misma.

.....

Gabriela Elizabeth Campos Mera

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mi Dios Jehová por ser mi Amigo, mi Padre y mi Dios, a mi Padre, Freddy Campos, que aunque no esté físicamente a mi lado vive todos los días en mí pues me enseñó a amar de verdad y a siempre creer en mí misma, a mi Madre, Norma Mera, que es la mujer más fuerte y valiente que conozco y ha estado siempre a mi lado enseñándome a enfrentar la vida con una sonrisa en el rostro, y a mi compañero fiel Santiago Torres que ha estado conmigo tantos años a pesar de todo dándome su mano cuando las fuerzas se me han terminado.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser mi guía y mi más fuerte apoyo en la vida, a mis Padres que han sido mis maestros y mi mayor motivación para seguir, a mis hermanos David y Andrés por ser mis primeros amigos.

A mi mejor amiga Magus por estos 14 años de amistad y hermandad, a Dany Ch. por su apoyo incondicional este último año y por enseñarse que aun a la distancia se puede conocer seres humanos increíbles.

A mis amigos y amigas Martita, Lily, Fer, Gaby, Mony, Santiago, Hugo, Liss, Alex, Edison por enseñarme el valor de una amistad sincera y verdadera, a un gran compañero Santy T. por estar conmigo en las buenas y en las malas apoyándome .

A mi Mishi por ser mi pequeña compañía y alegría en mis desvelos y luchas, a mis sobrinos por ser la chispa de mi vida, a mis abuelitas por ser mi ejemplo de amor y perseverancia, a mis maestros Marco Chuiza y Mónica Andrade por ser más unos excelentes docentes y unos grandes amigos.

Gabriela

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Páginas</b>
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	5
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1 Mora de castilla.....	5
1.1.1 Generalidades.....	5
1.1.2 Origen.....	5
1.1.3 Taxonomía.....	6
1.1.4 Morfología.....	6
1.1.5 Requerimientos agroclimáticos.....	7
1.1.6 Importancia económica.....	8
1.1.7 Cultivo de mora en el Ecuador.....	8
1.1.8 Contenido nutricional.....	8
1.1.9 Propiedades.....	9
1.2 Secado.....	10
1.2.1 Definición.....	10
1.2.2 Formas de Realización.....	10
1.2.3 Finalidades del secado.....	10
1.2.4 La ubicación del secado en la tecnología de la Ingeniería Química.....	11
1.2.5 Parámetros involucrados en el secado.....	11
1.2.6 Factores que intervienen en el proceso de secado.....	12

<b>1.2.7</b>	<b>Clasificación de los secadores</b> .....	13
<b>1.2.8</b>	<b>Presión de vapor</b> .....	14
<b>1.2.9</b>	<b>Sólidos Insolubles</b> .....	14
<b>1.2.10</b>	<b>Humedad</b> .....	14
<b>1.2.11</b>	<b>Humedad de equilibrio</b> .....	15
<b>1.2.12</b>	<b>Humedad libre</b> .....	15
<b>1.2.13</b>	<b>Humedad ligada</b> .....	16
<b>1.2.14</b>	<b>Humedad desligada</b> .....	16
<b>1.2.15</b>	<b>Períodos de secado</b> .....	16
<b>1.2.16</b>	<b>Humedad Crítica</b> .....	17
<b>1.2.17</b>	<b>Mecanismo de secado</b> .....	17
<b>1.2.18</b>	<b>Curva de Secado</b> .....	18
<b>1.2.19</b>	<b>Curva de velocidad de secado</b> .....	18
<b>1.2.20</b>	<b>Velocidad de secado</b> .....	19
<b>1.2.21</b>	<b>Cálculo de la velocidad de secado en el período antecrítico</b> .....	19
<b>1.2.22</b>	<b>Cálculo del tiempo de secado en condiciones constantes</b> .....	20
<b>1.2.23</b>	<b>Cálculo del tiempo de secado en el período postcrítico</b> .....	20
<b>1.2.24</b>	<b>Cálculo del tiempo total de secado</b> .....	22
<b>1.2.25</b>	<b>Cálculo de la velocidad de secado en el período postcrítico</b> .....	22
<b>1.2.26</b>	<b>Transferencia de calor en secadores</b> .....	23
<b>1.3</b>	<b>Liofilización</b> .....	23
<b>1.3.1</b>	<b>Definición</b> .....	23
<b>1.3.2</b>	<b>Fundamentos de la Liofilización</b> .....	23
<b>1.3.3</b>	<b>Campos de aplicación</b> .....	24

1.3.4	<i>Razones para utilizar la liofilización</i> .....	24
1.3.5	<i>Etapas de la liofilización</i> .....	24
1.3.6	<i>Suministro de calor para la sublimación</i> .....	27
1.3.7	<i>Transferencia simultánea de calor y materia</i> .....	28
1.3.8	<i>Ventajas de la liofilización</i> .....	28
1.3.9	<i>Desventajas de la liofilización</i> .....	29
1.3.10	<i>Equipo-Liofilizador</i> .....	29
1.3.11	<i>Cámara de secado</i> .....	29
1.3.12	<i>Condensador</i> .....	29
1.3.13	<i>Sistema de vacío</i> .....	29
1.3.14	<i>Instrumentación</i> .....	30
1.3.15	<i>Tipos de liofilizadores</i> .....	30
1.3.16	<i>Datos cuantitativos acerca de liofilizadores</i> .....	30
1.4	<b>Diseño</b> .....	31
1.4.1	<i>Condiciones térmicas y de presión</i> .....	31
1.4.2	<i>Capacidad del equipo</i> .....	31
1.4.3	<i>Sistemas, componentes, funcionamiento, características</i> .....	32
1.4.4	<i>Controles</i> .....	33
1.4.5	<i>Seguridad e Higiene</i> .....	33
1.4.6	<i>Especificaciones de diseño</i> .....	33
	<b>CAPITULO II</b> .....	41
2.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	41
2.1	<b>Simulación del proceso de secado para la mora de castilla</b> .....	41
2.1.1	<i>Datos Experimentales Obtenidos</i> .....	41

2.1.2	<i>Humedad de la mora de castilla a lo largo del proceso de secado</i> .....	44
2.1.3	<i>Velocidad de secado de la mora de castilla</i> .....	44
2.1.4	<i>Datos obtenidos a través del gráfico de velocidad de secado de la mora de castilla</i> ...	46
2.1.5	<i>Cálculo del tiempo de secado en el período antecrítico</i> .....	46
2.1.6	<i>Cálculo del tiempo de secado posterítico</i> .....	47
<b>CAPITULO III</b> .....		48
3.	<b>MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> ...	48
3.1	<b>Cálculos</b> .....	48
3.1.1	<i>Dimensionamiento</i> .....	48
3.2	<b>Cálculos de ingeniería</b> .....	58
3.2.1	<i>Carga de enfriamiento</i> .....	58
3.2.2	<i>Flujo másico del refrigerante</i> .....	62
3.2.3	<i>Potencia de las resistencias</i> .....	62
3.2.4	<i>Rata de Sublimación en el condensador</i> .....	63
3.2.5	<i>Flujo de vapor en el condensador</i> .....	63
3.2.6	<i>Flujo de calor que se debe evacuar de los serpentines del condensador</i> .....	64
3.2.7	<i>Cálculo de la eficiencia térmica</i> .....	64
3.3	<b>Resultados</b> .....	65
3.3.1	<i>Resultados del Dimensionamiento</i> .....	65
3.3.2	<i>Resultados de los cálculos de ingeniería para el sistema de enfriamiento y secado del liofilizador</i> .....	66
3.4	<b>Presupuesto</b> .....	66
3.5	<b>Tasa Interna de Retorno</b> .....	67
3.5.1	<i>Presupuesto de egresos</i> .....	67
3.5.2	<i>Presupuesto de Ingresos</i> .....	68

<b>3.5.3 Datos necesarios para el cálculo del TIR</b> .....	68
<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	69
<b>CONCLUSIONES</b> .....	70
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	71
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>hb</b>	Altura de la bandeja (m)
<b>h</b>	Altura de la estantería (cm)
<b>ab</b>	Ancho de las bandejas (m)
<b>apl</b>	Ancho de las placas intercambiadoras (m)
<b>A</b>	Área expuesta al secado (m <sup>2</sup> )
<b>Ab</b>	Área de las bandejas (m <sup>2</sup> )
<b>Atc</b>	Área de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )
<b>Q</b>	Calor (kJ)
<b><math>\lambda_{sol}</math></b>	Calor latente de solidificación del producto (kJ/kg)
<b><math>\lambda</math></b>	Calor latente de sublimación (J/kg)
<b>k</b>	Conductividad de la mora de castilla (W/m <sup>o</sup> K)
<b>R</b>	Constante Universal de los gases (8,314 J/mol <sup>o</sup> K)
<b><math>\delta</math></b>	Densidad del acero AISI 316 (kg/m <sup>3</sup> )
<b><math>\rho_{Hielo}</math></b>	Densidad del hielo (kg/m <sup>3</sup> )
<b>dc</b>	Diámetro interno de la cámara (m)
<b>dec</b>	Diámetro externo de la cámara (m)
<b>U</b>	Energía Interna del aire (kJ/kg)
<b><math>t_D</math></b>	Esfuerzo de diseño (lb/pulg <sup>2</sup> )
<b>ea</b>	Espacio entre la pared de la cámara y el vértice de la estantería arriba (m)
<b>ec</b>	Espacio entre la cámara (m)
<b>ed</b>	Espacio entre la pared de la cámara y el vértice de la estantería arriba (m)
<b>edb</b>	Espacio para el desplazamiento de las bandejas (m)

<b>esp</b>	Espaciamiento entre bandejas (cm)
<b>ep</b>	Espesor de las placas (cm)
<b>ehc</b>	Espesor del hielo formado sobre el condensador (cm)
<b>emp</b>	Espesor mínimo del producto (m)
<b>t</b>	Espesor del material del que están fabricadas las bandejas (pulg)
<b>tc</b>	Espesor de la lámina al interior de la cámara (m)
<b>fs</b>	Factor de seguridad
<b>q</b>	Flujo de calor que atraviesa las paredes con aislamiento ( $W/m^2$ )
<b>Qs</b>	Flujo de calor que se debe evacuar de los serpentines del condensador (J/kg)
<b>Ms</b>	Flujo de vapor en el condensador (kg/s)
<b>P</b>	Fuerza máxima a la que estarán sometidas las bandejas (lb/pulg <sup>2</sup> )
<b>g</b>	Gravedad ( $9,8 m/s^2$ )
<b>Xc</b>	Humedad crítica
<b>Xf</b>	Humedad Final
<b>Xi</b>	Humedad inicial
<b>X*</b>	Humedad de equilibrio
<b>Xbs</b>	Humedad en base seca (kg agua/ kg sólido seco)
<b>Xbh</b>	Humedad en base húmeda (kg agua/ kg sólido húmedo)
<b>H<sub>L</sub></b>	Humedad libre
<b>X</b>	Humedad media
<b>J</b>	Joules
<b>lob</b>	Longitud de las bandejas (m)
<b>lc</b>	Longitud de la cámara (m)
<b>lcd</b>	Longitud de los condensadores (m)

<b>lcc</b>	Longitud de la curvatura de los condensadores (m)
<b>S</b>	Masa del sólido seco (kg)
<b>m</b>	Masa del producto a procesar (kg)
<b><math>m_{Aire}</math></b>	Masa del Aire presente en la cámara (kg)
<b>Mb</b>	Masa de la bandeja (kg)
<b>Mm</b>	Masa molecular del aire (kg/mol)
<b>nb</b>	Número de bandejas
<b>np</b>	Número de placas
<b>P</b>	Presión atmosférica (Pa)
<b>Q</b>	Potencia de las resistencias (kW)
<b>rc</b>	Radio de la cámara (m)
<b>rcc</b>	Radio de la curvatura de los condensadores (m)
<b><math>t_t</math></b>	Resistencia a la tracción del acero AISI 316 (lb/pulg <sup>2</sup> )
<b>Vb</b>	Volumen de las bandejas (m <sup>3</sup> )
<b>V1</b>	Volumen de la base de la bandeja (m <sup>3</sup> )
<b>V2</b>	Volumen del pretil ancho de la bandeja (m <sup>3</sup> )
<b>V3</b>	Volumen del pretil largo de la bandeja (m <sup>3</sup> )
<b>Vc</b>	Volumen de la Cámara (m <sup>3</sup> )
<b>vp</b>	Volumen de producto en cada bandeja (m <sup>3</sup> )
<b>Ve</b>	Volumen específico del aire al iniciar el proceso (kg/m <sup>3</sup> )
<b>UPAs</b>	Unidad de Producción agropecuaria
<b>W</b>	Velocidad de secado (kg/hm <sup>2</sup> )
<b>T</b>	Temperatura (°C)
<b><math>\theta_a</math></b>	Tiempo de secado en condiciones constantes (h)

- $\theta_p$**  Tiempo de secado en el período postcrítico (h)
- $\theta_T$**  Tiempo total de secado (h)
- $W_c$**  Velocidad de secado constante (kg/hm<sup>2</sup>)
- $W_f$**  Velocidad total de secado decreciente (kg/hm<sup>2</sup>)
- $W$**  Watt

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Páginas</b>
<b>Cuadro 1-1</b> Taxonomía de la mora de castilla.....	6
<b>Cuadro 2-1</b> Requerimientos agroclimáticos.....	7
<b>Cuadro 3-1</b> Contenido nutricional de la mora de castilla.....	9
<b>Cuadro 4-1</b> Clasificación de los secadores.....	13
<b>Cuadro 5-1</b> Relación entre el tamaño y la potencia consumida por los liofilizadores.....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Páginas</b>
<b>Figura 1-1</b> Mora de castilla.....	5
<b>Figura 2-1</b> Curva de de secado.....	18
<b>Figura 3-1</b> Curva de velocidad de secado.....	19
<b>Figura 4-1</b> Etapas de la liofilización.....	25
<b>Figura 4-1</b> Fases del secado primario .....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Páginas</b>
<b>Tabla 1-2</b> Datos experimentales del proceso de secado de mora de castilla.....	41
<b>Tabla 2-2</b> Datos experimentales obtenidos.....	42
<b>Tabla 3-2</b> Resultados de la velocidad de secado.....	44
<b>Tabla 4-2</b> Datos obtenidos en la gráfica de velocidad de secado.....	46
<b>Tabla 1-3</b> Consideraciones necesarias para el dimensionamiento del liofilizador.....	48
<b>Tabla 2-3</b> Resultados del dimensionamiento de la cámara de liofilización.....	65
<b>Tabla 3-3</b> Resultado del dimensionamiento de las placas .....	65
<b>Tabla 4-3</b> Resultados del dimensionamiento de las bandejas.....	65
<b>Tabla 5-3</b> Resultados del dimensionamiento de los condensadores.....	66
<b>Tabla 6-3</b> Resultados de los cálculos para el sistema de enfriamiento y calefacción.....	66
<b>Tabla 7-3</b> Requerimiento de presupuesto para la construcción del liofilizador.....	67
<b>Tabla 8-3</b> Egresos.....	67
<b>Tabla 9-3</b> Ingresos.....	68
<b>Tabla 10-3</b> Datos para el cálculo del TIR.....	68

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	<b>Páginas</b>
<b>Gráfico 1-2</b> Humedad de la mora de castilla vs tiempo.....	44
<b>Gráfico 2-2</b> Velocidad de secado vs humedad media.....	46

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A.** VARIACIÓN DEL ASPECTO DE LA MORA DE CASTILLA A LO LARGO DEL SECADO
- ANEXO B.** CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS AISLANTES
- ANEXO C.** CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL POLIURETANO
- ANEXO D.** ESPESOR DEL AISLANTE
- ANEXO E.** PROPIEDADES DEL TRICLOROETILENO
- ANEXO F.** PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316
- ANEXO G.** PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316
- ANEXO H.** PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MORA
- ANEXO I.** PROPIEDADES DEL AIRE
- ANEXO J.** DISEÑO DEL LIOFILIZADOR
- ANEXO K.** DESPIECE DEL LIOFILIZADOR
- ANEXO L.** VISTAS DEL LIOFILIZADOR

## RESUMEN

El diseño de un Liofilizador de mora de castilla previo a su industrialización en la comunidad Corazón de Jesús de la parroquia Punin se realizó con el fin de aprovechar los conocimientos en operaciones unitarias para realizar un trabajo de vinculación con la comunidad que desea incurrir en la industrialización de la mora de castilla para evitar las pérdidas en la cosecha de la misma, para la realización del diseño se revisó de forma extensa bibliografía relacionada con el tema para realizar los cálculos pertinentes, posteriormente se realizó una experiencia de secado en el laboratorio para lograr adquirir datos de secado de la mora. Como resultados en el dimensionamiento se obtuvo que el Liofilizador tendrá una cámara cilíndrica con un diámetro externo de 0,84 m y una longitud de 1,21 m y 6 bandejas de 0,35 m de ancho y 1,10 metros de largo, en cuanto a los requerimientos de calor el equipo debe trabajar con una potencia de 1857,59 kW y un flujo de refrigerante de 0,40 kg/s para la etapa de congelación y una potencia de 40,74 kW para la etapa de sublimación y el flujo de calor que se debe retirar de los serpentines del condensador es de 480,55 kW. La investigación nos permitió diseñar el equipo de liofilización obteniéndose en primera instancia las variables críticas del proceso como son la temperatura, que debe ser de  $-50^{\circ}\text{C}$  en la etapa de congelación y de  $60^{\circ}\text{C}$  en la etapa de sublimación, y la presión que debe alcanzar los 0,01 mmHg ya que a este valor la velocidad de secado para por un máximo. Se recomienda al constructor del equipo implementar el diseño propuesto y a los operadores del mismo no sobrepasar los rangos de temperatura del equipo que son  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ .

**Palabras clave:** <EQUIPO> <MORA> <LIOFILIZADOR> <DIMENSIÓN>

<CONGELACIÓN> <SUBLIMACIÓN> <TEMPERATURA> <PRESIÓN> <POTENCIA>

## ABSTRACT

The design of a freeze castile mulberry prior to industrialization in the Heart of Jesus community at Punin parish was performed in order to use the knowledge in unit operations to perform work in connection with the community you want to incur industrialization mulberry castile to avoid losses in the harvest of it, to realize the design was revised literature extensively related to the subject to perform the necessary calculations, then an experience of drying was performed in the laboratory to data acquisition mulberry drying. As result was obtained dimensioning the cylindrical chamber will Lyophilizer with an outer diameter of 0,84 m and a length of 1,21 m, 6 trays 0,35 m wide and 1,10 m long; requirements as to heat the computer must work 1857, 59 kW power and a refrigerant flow 0,40 kg/s for the freezing step and a power of 40 kW for sublimation step and the heat flow to be withdraw from the condenser coils is 480,55 kW. The research led us to design the lyophilization equipment in the first instance obtaining the critical process variables such as temperature, to be from -50°C to the freezing step and 60 °C in the sublimation step, and the pressure to be 0,01 mmHg reach this value as the drying rate goes through a maximum. The builder of the equipment is recommended to implement the proposed design and the same operators not exceed the temperature ranges of equipment that are -50°C to 60°C.

**Keywords:** <EQUIPMENT> <MULBERRY> <LYOPHILIZER> <SIZE> <FREZZE> <SUBLIMATION> <TEMPERATURE> <PRESSURE> <POWER>

## INTRODUCCIÓN

La demanda de productos procesados que conserven íntegras sus virtudes y propiedades y se conserven durante una mayor cantidad de tiempo se incrementa día a día, la tecnología ha permitido crear equipos llamados Liofilizadores que permitan lograr estos objetivos.

La presente investigación en la cual se propone utilizar la liofilización para procesar el sobrante de mora de Castilla producida en la comunidad Corazón de Jesús de la parroquia Punin promete ser una fuente de ingresos para los moradores de esa comunidad y por lo tanto para la economía de nuestra provincia.

La Liofilización se ha vuelto popular en países desarrollados en los cuáles debido al ritmo de vida el consumo de productos deshidratados se ha vuelto prácticamente diario, por otra parte en los países tercermundistas como el Ecuador la Liofilización se utiliza muy poco debido a la falta de conocimiento sobre este proceso y al alto costo de inversión que se requiere.

Se espera que el diseño del Liofilizador para mora de castilla y la posterior construcción del mismo en la comunidad Corazón de Jesús sea el inicio del uso de esta tecnología en la industria de alimentos en nuestra provincia y país, en la cual su aplicación sería sumamente beneficiosa, e incluso podrían abrirse nuevas líneas de investigación con el fin de tener más información acerca de esta forma especial de secado.

Para la simulación del proceso de Liofilización se utilizó un secador de bandejas eléctrico del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH en vista de la falta de Liofilizadores disponibles para simular el proceso, en el secado se obtuvieron datos importantes acerca de la humedad y la velocidad de secado de la mora de castilla.

En el diseño del Liofilizador se obtuvo datos de dimensionamiento y requerimientos de calor indispensables para la construcción del equipo, así como también se identificó las variables críticas del proceso como son la temperatura y la presión que deben ser cuidadosamente controladas durante el proceso.

El proceso de liofilización tiene sus orígenes en el Imperio Inca, Allí los pobladores realizaban y continúan realizando un producto denominado Chuño, resultado de la deshidratación de la papa. Con el paso de los años se desarrolló industrialmente esta técnica de conservación que integra dos métodos confiables: la congelación y la deshidratación.

El desarrollo comercial de este proceso se produjo durante la Segunda Guerra Mundial, donde se utilizó para conservar plasma sanguíneo y en la preparación de los primeros antibióticos de penicilina.

Años después, alrededor de 1960, comenzó a utilizarse la misma tecnología sobre una gran variedad de productos, entre ellos los alimentos. Actualmente se aplica principalmente en las industrias farmacéuticas, químicas, y de los alimentos.

Desde hace un tiempo se comercializan liofilizados tanto como ingredientes industriales como para el consumidor en general, ampliándose así el mercado de estos productos de alto valor agregado.

Se han realizado en Ecuador varios estudios sobre este método y lo eficiente que es ya que permite la estabilización de productos perecederos y lograr así productos de altísima calidad, extendidos en el tiempo sin perder sus propiedades, es por ello que en nuestro país la liofilización de productos como el café es muy popular y conocida.

La liofilización está cada vez más en auge en nuestro país en especial ahora que el gobierno apoya el uso de nuevas tecnologías para industrializar sectores agrícolas que antes no considerados esenciales.

Por otro lado, en nuestra Ciudad la liofilización no es muy conocida ni empleada y en la parroquia Punin se conoce muy poco de este proceso y sus beneficios, sin embargo sabemos que en este sector la producción de mora registra una expansión constante, lo que hace suponer que sus perspectivas son promisorias y que puede convertirse en una excelente alternativa para diversificar las exportaciones, por lo que al darle un valor agregado a la misma, como es un mayor tiempo de vida útil mediante la liofilización, sabemos que las oportunidades de exportación serán mucho mayores en un futuro cercano.

La parroquia Punin del cantón Riobamba se caracteriza principalmente por sus tierras y costumbres que hace de ella una zona productiva y comercial de productos agrícolas como cereales, hortalizas, tubérculos, frutas, entre otras, las mismas que en su mayoría son comercializadas en la ciudad de Riobamba, estos productos son de consumo local y nacional, teniendo como destino ciudades del país como Quito, Guayaquil, Ambato, entre otras.

Punin al tener mayor apoyo del gobierno sería una de las parroquias rurales que brinden espacios y requerimientos para la generación de pequeñas y medianas empresas que contribuyan al desarrollo socio-económico local.

Por estas razones, a principios del año pasado, el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca, a través de la Dirección Provincial de Chimborazo, realizó una nueva entrega de insumos orgánicos a productores de los sectores de la parroquia Punin en Chimborazo, entre ellos la Comunidad de Corazón de Jesús.

Debido a la creciente producción de mora en el sector agrícola, es importante empezar a considerar un proceso que permita darle un valor agregado a este producto.

La liofilización es una excelente alternativa de industrialización de alimentos debido a que presenta beneficios únicos como larga vida útil, almacenamiento a temperatura ambiente, economía en el transporte, eliminación de la cadena de frío, facilidad de manejo durante la producción, rehidratación instantánea y una excelente microbiología.

Es por eso que en vista de la cada vez mayor demanda de productos liofilizados y el deseo de los productores de mora de la parroquia Punin de aprovechar el cambio de la matriz productiva para incurrir en la industrialización de sus productos, se ha diseñado un liofilizador de mora de castilla como aporte a la comunidad, para de esa manera aprovechar y aplicar nuestros conocimientos de ingeniería en el desarrollo de la economía del sector agropecuario de nuestra ciudad, provincia y país y de esa manera adquirir destrezas necesarias para contribuir con el cambio que propone en nuestro país.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Diseñar un Liofilizador para mora de castilla previo a su industrialización en la comunidad Corazón de Jesús de la parroquia Punin.

### **ESPECÍFICOS**

- Simular la operación unitaria de Liofilización en el laboratorio.

- Identificar las variables de proceso previo al diseño.
- Realizar los cálculos de ingeniería necesarios para la construcción del equipo.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1 Mora De Castilla

#### 1.1.1 Generalidades

Es una planta que pertenece a la familia de las rosáceas cuyo fruto es una vaya elipsoidal rica en vitamina C y con alto contenido de agua. La mora de castilla pertenece al género *Rubus* el cual es uno de los de mayor número de especies en el Reino Vegetal. Una planta produce aproximadamente desde cuando tiene un año, hasta los 12 a 20 años de vida.



**Figura 1-1** Mora de castilla  
Fuente: Cultivo de mora, 2005.

#### 1.1.2 Origen

Fue descubierta por el botánico alemán Karl Theodor Hartweg y descrita por el botánico inglés George Bentham. La mora de castilla es originaria de las zonas altas tropicales de América en especial Colombia, Ecuador, Panamá, Guatemala, Honduras, México y Salvador, sin embargo se han reportado especies de gran similitud en África. El género *Rubus* al que pertenece se encuentra diseminado en todo el mundo, con excepción de las zonas desérticas.

### 1.1.3 Taxonomía

**Cuadro 1-1:** Taxonomía de la Mora de Castilla

<b>Reino</b>	Vegetal
<b>Clase</b>	Angiospermae
<b>Subclase</b>	Dicotyledoneae
<b>Orden</b>	Rosae
<b>Familia</b>	Rosaceae
<b>Género</b>	Rubus
<b>Especie</b>	Rubus Glaucus

Fuente: Cultivo de mora, 2005

### 1.1.4 Morfología

Es una planta herbácea anual de vegetación perenne, de porte arbustivo semi-erecto que posee las siguientes características:

**Raíz:** Posee una raíz principal pivotante y raíces secundarias que no profundizan, se encuentran entre los 10 y 20 centímetros en suelos francos. . El sistema radicular es profundo y puede llegar a profundizar más de un metro dependiendo del suelo y el subsuelo en que se encuentre.

**Tallo:** está conformada por varios tallos espinosos que pueden crecer hasta tres metros y cuyo diámetro oscila entre 1 y 2 centímetros. Se clasifican en tallos primarios del cual se desprenden ramas primarias, secundarias y terciarias. El tallo primario es herbáceo y recto. Los tallos están cubiertos por un polvo blanquecino.

**Hojas:** Son Elípticas, oblongas enteras, puntiagudas, de largo pecíolo, tienen tres foliolos, ovoides de 4 a 5 centímetros de largo con espinas ganchudas, su cara inferior es más clara, y sus bordes pueden ser enteros o discretamente dentados y ondulados. Las hojas al igual que los tallos están cubiertas por un polvo blanquecino.

**Flores:** Blancas, pequeñas, en inflorescencias laterales, su ancho es de 6-11 milímetros, poseen un pedúnculo corto, cáliz de cinco partes, son lanceoladas y lineales, la corola tiene cinco segmentos lobulados, poseen estambres desiguales y son de estilo largo simple.

**Semilla:** Son diminutas, de color café claro, pubescentes cuyo diámetro polar oscila de 1.2 a 1.3 milímetros y su diámetro ecuatorial de 1.0 a 1.1 milímetros. La semilla está clasificada dentro

del grupo de las ortodoxas. Las plantas que se encuentran bien desarrolladas pueden producir hasta 130,000 semillas.

Fruto: es una baya esférica o elipsoidal su tamaño puede variar de 1,5 a 2.5 centímetros en su diámetro más ancho, es de color verde cuando se están formando, pasando por un color rojo hasta morado oscuro cuando se encuentra madura, sin embargo es posible que las bayas se encuentren en su madurez aun poseyendo un color rojo.

Está formado por pequeñas drupas adheridas a un receptáculo que al madurar es blanco y carnoso y hace parte del mismo, Individualmente pesan de 3 a 5 gramos, cada fruto tiene alrededor de 100 a 120 semillas diminutas.

Es rico en vitamina C, calcio y fósforo, y es de sabor agridulce tierno a dulce cuando se encuentra maduro, su pulpa es rojiza. El fruto es altamente perecedero por lo que debe cosechar inmediatamente después de que el fruto ha llegado a su madurez comercial es decir cuando presenta color escarlata con suficiente dureza y contextura que eviten que el producto se deteriore.

### **1.1.5 Requerimientos agroclimáticos**

**Cuadro 2-1: Requerimientos Agroclimáticos**

<b>Clima</b>	Precipitación de 600 a 800 mm repartidos al año. Bastante sol.
<b>Temperatura</b>	12 a-18°C
<b>Altitud</b>	2500-3100 sobre el nivel del mar
<b>Humedad Relativa</b>	80-90%
<b>Suelo</b>	Franco arenoso y negros
<b>pH del suelo</b>	5.5-7.5

Fuente: Cultivo de mora, 2005

### ***1.1.6 Importancia Económica***

La mora tiene gran aceptación para el consumo en fresco y procesado por su exquisito sabor y la facilidad de la agro industrialización. En el mercado internacional, la mora es comercializada como fruta de mesa y como materia prima de uso industrial. Cerca del 90% del consumo es destinado al procesamiento y únicamente el 10% se consume como fruta de mesa. Su uso principal está en la fabricación de jugos, pulpas, conservas, compotas, néctares y concentrados. La especie *Rubus* se ha convertido en una fruta muy popular en pastelería ya sea para la preparación de postres, mermeladas, jaleas y, a veces, zumos, vinos y licores.

En nuestro país el cultivo de mora de Castilla se ha incrementado considerablemente en los últimos años, debido al aumento en la demanda de la fruta tanto para el consumo humano y agroindustrial de alimentos, como para la exportación, de esta manera se constituye en una alternativa de producción generadora de ingresos para los pequeños y grandes productores.

### ***1.1.7 Cultivo de mora en el Ecuador***

La mora es cultivada en el callejón Interandino, en las provincias de Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar; Chimborazo, Pichincha, Imbabura y Carchi.

El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en el tercer censo nacional agropecuario, reportó que en Ecuador el cultivo de mora de Castilla comprende aproximadamente 4046 hectáreas agrícolas en monocultivo, distribuidas en 10909 UPAs (unidad de producción agropecuaria), con un total de producción de 10283 toneladas por año censal y 1201 hectáreas agrícolas en cultivo asociado, distribuido en 3637 UPAs, con un total de producción de 1211 toneladas por año censal.

Por ser una fruta de consumo diario su demanda es alta especialmente en la costa, los principales mercados de exportación son: Estados Unidos, España y Antillas Holandesas, Alemania y Holanda.

### ***1.1.8 Contenido Nutricional***

Cada 100 gramos de mora de castilla contiene lo que se describe en el siguiente cuadro, para nuestro proyecto es importante saber que estas cantidades no deben variar mucho, excepto el agua que el componente que queremos desprender para obtener un producto liofilizado.

**Cuadro 3-1:** Contenido Nutricional de la Mora de Castilla

Compuesto	Cantidad	Unidad
Agua	92.8	g
Calorías	23	cal
Proteína	0.6	g
Grasa	0.1	g
Carbohidratos	5.6	g
Cenizas	0.4	g
Fibra	0,5	g
Ácido Ascórbico	8	mg
Calcio	42	mg
Fósforo	10	mg
Hierro	1,7	mg
Niacina	0,3	mg
Tiamina	0.02	mg
Riboflavina	0.05	mg
Sodio	3.7	mg
Potasio	196-208	mg
Vitamina C	8	mg
Vitamina E	13.3	mg
Vitamina E	177	UI

Fuente: Cultivo de mora, 2005

### ***1.1.9 Propiedades***

Algunas de las propiedades más importantes de la mora de castilla son:

- Poseen bajo valor calórico por su escaso aporte en hidratos de carbono.
- Poseen abundantes pigmentos naturales (antocianos y carotenoides), de acción antioxidante.
- Las antocianinas les confieren su color característico.
- Son muy ricas en vitamina C y E.
- Poseen altos contenidos de pectina.

- Son ricas en hierro asimilable por lo que son muy recomendadas para tratamientos contra la anemia.
- Son ricas en fibra por lo se utilizan frecuentemente para el mejoramiento del tránsito intestinal.
- Aportan además calcio, hierro, potasio, ácidos orgánicos y taninos de acción astringente.
- Las cantidades de potasio que contiene ayudarán a la generación y transmisión del impulso nervioso así como también a personas con grandes actividades musculares.
- Contienen bajo contenido calórico por lo que pueden ser ingeridas en dietas y en personas con obesidad.

## **1.2 Secado**

### ***1.2.1 Definición***

Es la separación parcial o total del o los líquidos que acompañan al sólido mediante evaporación en una corriente gaseosa. En la mayor parte de los casos el líquido que se separa es el agua, mientras que la corriente gaseosa es el aire. La evaporación casi siempre es parcial, excepto en el secado al vacío, reduciéndose la humedad desde un valor inicial hasta un valor final.

### ***1.2.2 Formas de Realización***

El secado puede realizarse por Contacto Directo o Indirecto, en el secado por contacto directo el calor necesario para la vaporización del agua es suministrado por el aire mediante convección, mientras que en el secado indirecto el calor es suministrado por conducción usando una fuente térmica a través de una superficie metálica en contacto con el objeto a secar.

### ***1.2.3 Finalidades del secado***

- Facilita el manejo de los productos.
- Permite el empleo satisfactorio de los productos.
- Reduce el costo de transporte.
- Aumenta la capacidad de los equipos.

- Preserva los productos durante el almacenamiento y transporte.
- Aumenta la utilidad de los productos residuales.

#### ***1.2.4 La ubicación del secado en la tecnología de la Ingeniería Química***

El secado de sólidos tiene gran importancia en la mayoría de industrias tanto de forma práctica como económica. Se sabe que se elimina diez millones de toneladas de agua al año en los procesos de secados realizados en la industria de alimentos y de procesos de Gran Bretaña y que para este mismo fin se emplean más de cinco millones de toneladas de carbón al año. Por lo tanto es evidente que el secado de sólidos es de suma importancia en la Ingeniería química la misma que está vinculada de manera directa con las industrias alimenticias y de procesos que tanto utilizan este método para conseguir sus productos.

#### ***1.2.5 Parámetros involucrados en el secado***

##### **A. Transferencia de calor**

- Transferencia de calor desde el medio de calefacción a la superficie líquida.
- Transferencia de calor en la película de líquido adherida al sólido
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- Transferencia de calor del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- Transferencia de calor desde el medio de calefacción a la zona del sólido seco.
- Conductividad térmica del líquido.
- Conductividad térmica del sólido Húmedo.
- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- Calor latente del líquido.
- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.

##### **B. Atmósfera de Secado**

- Presión y temperatura de la atmósfera de secado.
- Composición de la atmósfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del proceso de secado.
- Velocidad relativa de la atmósfera de secado respecto a la superficie a secar.

- Presión de vapor efectiva del líquido, considerando los cambios en la elevación de la temperatura de ebullición durante el proceso de secado.
- Grado de saturación de la atmósfera de secado dentro del lecho sólido.

#### C. Propiedades físicas generales del sistema sólido- líquido

- Tensión interfacial entre el sólido y el líquido.
- Espesor de la película adherida al sólido.
- Relación entre el área superficial y el volumen del líquido contenido en los poros.
- Coeficiente de difusión del vapor en los poros.
- Succión capilar de líquidos dentro de los poros.
- Gradientes de concentración de líquidos en los poros.
- Presencia de materiales fibrosos o cavidades en el seno del sólido.
- Tamaño de la molécula de líquido.
- Contenido máximo de impurezas solubles que pueden tolerarse en el líquido residual presente en el material húmedo.

#### D. Propiedades del sólido

- Tamaño de partículas
- Área efectiva del sólido
- Porosidad
- Solubilidad del sólido en el líquido cuando el líquido es parte estructural del sólido.
- Dureza superficial de barros al secar, cuando producen una superficie prácticamente no porosa, y la relación de este efecto con la velocidad de secado.
- Formación de tortas durante el secado de polvos, resistencia de los aglomerados.
- Resistencia del material seco a la fricción.
- Máximo contenido de líquido tolerable en el producto seco.

#### ***1.2.6 Factores que intervienen en el proceso de secado***

- Temperatura del aire. Para elegir la temperatura se considera la especie que se va a someter al secado. Estos niveles diversos de temperatura se mantienen durante el proceso técnico de secado. Durante el secado se forma un gradiente de temperatura con respecto

al espesor del material, mismo que va reduciéndose conforme disminuye el contenido de humedad.

- **Humedad Relativa del Aire:** La humedad del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Se expresa en porcentaje (%) y a medida que incrementa la temperatura aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.
- **Velocidad del Aire:** Tiene dos funciones importantes, la primera transmitir la energía necesaria para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y la segunda, transportar la humedad saliente del material. Para obtener un secado rápido y uniforme es recomendable una circulación de aire a regular.

### 1.2.7 Clasificación de los Secadores

Existen muchas clasificaciones, sin embargo tomaremos en cuenta la de Cronshaw la misma que se basa en la forma en que es manejado el material durante el proceso de secado:

**Cuadro 4-1:** Clasificación de los secadores

Materiales en hojas o masas transportados por bandejas o transportadores	Continuos	De departamentos a la presión atmosférica
		De bandeja al vacío
	Discontinuos	De Túnel
Materiales Granulares o Suelos	Secadores Rotativos	Rotativos Normales
		Roto- Louvre
	Turbosecadores	-----
	Secadores de Transportador	-----
	Combinación de secador- filtro	-----
Materiales en hojas continuas	Cilindros secadores	-----
	Secadores de festón	-----
Pastas, lodos o tortas cristalinas	Secador Agitador	Atmosféricos
		Al vacío
Materiales en solución	Tambores secadores	Atmosféricos
		Al vacío
	Secadores por pulverización	-----

Métodos especiales	Por rayos infrarrojos	-----
	Por calentamiento dieléctrico	-----
	Por Liofilización	-----

Fuente: BADGER y BANCHERO, 1980.

### 1.2.8 Presión de vapor ( $P_v$ )

Es la presión que ejerce el vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor es conocida como presión de vapor saturado ( $P_{vs}$ ).

### 1.2.9 Sólidos Insolubles

En presencia de un líquido volátil estos pueden comportarse como sólidos húmedos o como sólidos higroscópicos.

- Sólidos Húmedos: son aquellos en los que la presión del vapor de agua que acompaña al sólido es igual a la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura. El sólido húmedo es totalmente inerte al agua que lo acompaña.
- Sólidos Higroscópicos: son aquellos en los que la presión del vapor del agua que acompaña al sólido es menor que la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. El sólido higroscópico modifica la presión de vapor del agua que contiene.

A humedades altas el sólido tiende a ser húmedo y a humedades bajas tiende a ser higroscópico. Los sólidos húmedos son más fáciles de secar.

### 1.2.10 Humedad

El contenido de humedad de un sólido puede expresarse sobre base seca o base húmeda. En los cálculos de secado es recomendable utilizar a la humedad a base seca pues esta permanece constante durante el proceso de secado.

- Humedad en base seca: es el contenido de agua que acompaña a la masa del sólido seco, Ecuación 1.

$$X_{bs} = \frac{m H_2O}{m_{ss}}$$

Dónde:

$X_{bs}$  = Contenido de Humedad en base seca (kg agua/ kg sólido seco)

$m H_2O$  = Masa de agua contenida en el sólido (kg)

$m_{ss}$  = Masa del sólido seco (kg)

- Humedad en base Húmeda: se calcula mediante la Ecuación 2.

$$X_{bh} = \frac{m H_2O}{m_{sh}}$$

Dónde:

$X_{bh}$  = Contenido de Humedad en base húmeda (kg agua/ kg sólido húmedo)

$m H_2O$  = Masa de agua contenida en el sólido (kg)

$m_{sh}$  = Masa del sólido húmedo (kg)

### **1.2.11 Humedad de Equilibrio ( $X^*$ )**

Cuando un sólido húmedo está en contacto con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes, se alcanzan las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire.

Por lo tanto se denominará humedad de equilibrio en el sólido a la humedad alcanzada por el mismo en equilibrio con el aire en las condiciones dadas, es decir la humedad de equilibrio es el límite al que puede llevarse la humedad de un sólido al contacto con el aire.

### **1.2.12 Humedad Libre**

Es aquella humedad que puede perder un sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire en condiciones dadas. Por lo tanto queda definida como la diferencia entre

la humedad del sólido y la humedad de equilibrio, la humedad libre varía durante todo el proceso de secado. Ecuación 3.

$$H_L = X - X^*$$

Dónde:

$H_L$  = Humedad Libre (%)

$X$  = Humedad del sólido (%)

$X^*$  = Humedad de equilibrio (%)

### ***1.2.13 Humedad Ligada***

Es la humedad mínima necesaria para que un sólido deje de comportarse como higroscópico o a su vez la humedad mínima de equilibrio con el aire saturado. La separación de esta humedad por evaporación se sujeta a leyes diferentes a las de evaporación del agua en un recipiente abierto.

### ***1.2.14 Humedad Desligada***

Esta humedad es propia de sólidos húmedos y se define como la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. También se la conoce como la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada.

### ***1.2.15 Períodos de secado***

En el secado se reconocen dos períodos:

- Período antecrítico: Es el período de tiempo en el que la velocidad de secado es constante, este período empieza con la humedad inicial y se extiende hasta la humedad crítica.
- Período postcrítico: Es el período de tiempo en el que la velocidad de secado disminuye hasta llegar a un valor de cero. Este período empieza con la humedad crítica y va hasta la humedad de equilibrio. En muchos casos pueden existir dos períodos de velocidad decreciente, en el primero la velocidad varía linealmente con la humedad (primer período post- crítico), en el segundo se pierde aquella relación (segundo período post-crítico).

### ***1.2.16 Humedad Crítica ( $X_c$ )***

Es aquella humedad que define el cambio de velocidad de secado del período constante al período de caída, este valor es determinado de manera experimental en la mayoría de los casos. Esta humedad varía con las condiciones del aire de secado y con el espesor del material, así:

La humedad crítica aumenta ligeramente con la temperatura y la velocidad del aire, paralelamente al aumento mucho mayor de la velocidad de secado antecrítico con los mismos factores.

La humedad crítica aumenta con el espesor de la capa que se somete al secado y lo hace en mayor o menor proporción según el tipo de material.

### ***1.2.17 Mecanismo de secado***

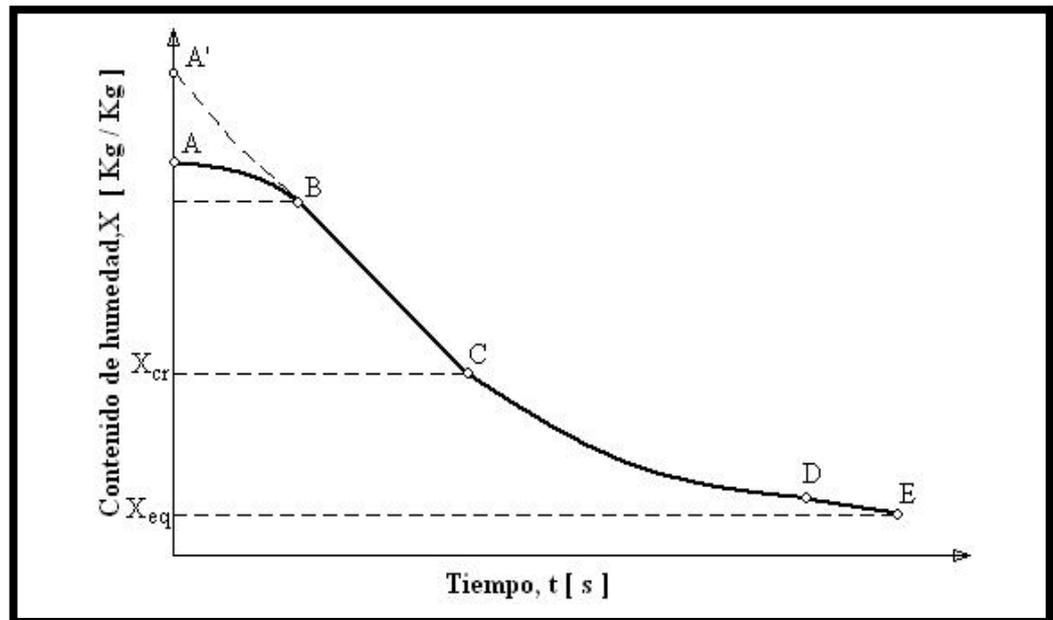
En el proceso de secado se debe separar del sólido la humedad que existe sobre su superficie como también la existente en su interior. Si la humedad es suficientemente grande la evaporación se da sobre la superficie mojada mientras líquido va renovándose por difusión desde el interior. En este momento se tiene el período de velocidad de secado constante. Si el sólido a secar no recibe calor por otros medios, la temperatura de su superficie se mantiene constante a un valor muy cercano a la temperatura húmeda, esto ocurre hasta llegar a la humedad crítica.

Cuando la humedad media del sólido es inferior a la crítica, la difusión desde el interior no puede suministrar todo el líquido que se evapora en la superficie, por lo tanto la velocidad de evaporación disminuye y en la superficie aparecen zonas secas de tamaño cada vez mayor. Transcurre entonces el primer período de velocidad decreciente, al no estar saturada la superficie, la temperatura asciende y tiende a aproximarse a la temperatura seca del aire, este período termina cuando la superficie del sólido queda libre de líquido, sin embargo, la humedad media puede tener un período apreciable.

Durante el segundo período post-crítico la velocidad de secado sigue bajando, en muchos casos la evaporación se da en un plano interior que va alejándose de la superficie del sólido a medida que transcurre el secado.

### 1.2.18 Curva de Secado

Muestra la humedad que tiene el sólido a lo largo del proceso de secado, Como se ve en la figura, la humedad disminuye desde un valor inicial A y al final se va a aproximando como límite a la humedad de equilibrio la cual corresponde a las condiciones constantes del aire.

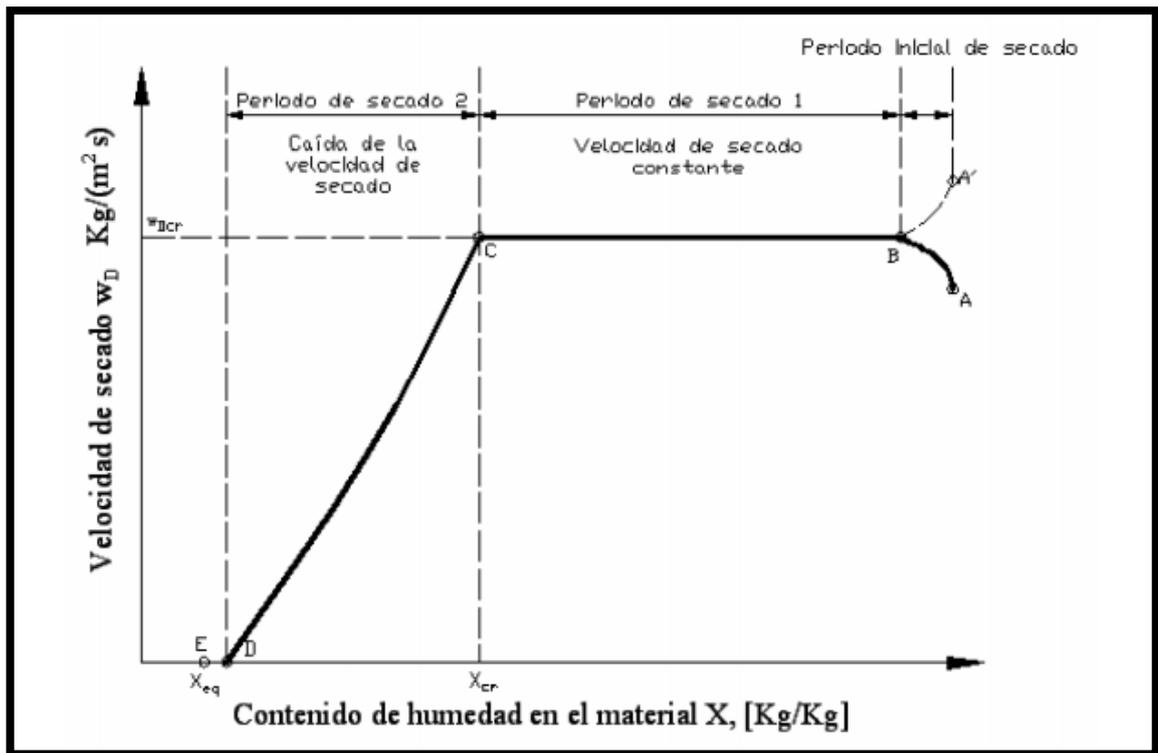


**Figura 2-1** Curva de secado

Fuente: BARBOSA G, 2000.

### 1.2.19 Curva de Velocidad de secado

Esta curva nos muestra la velocidad con que se seca el sólido. En la figura se puede observar el tramo AB que puede ser inexistente o presentar variaciones es una período de inducción o ajuste debido a que en él el mecanismo de secado no ha llegado a estabilizarse, el tramo BC corresponde al período de velocidad de secado constante, el mismo termina al alcanzar la humedad crítica representada por el punto C a partir del cual la velocidad de secado empieza a disminuir.



**Figura 3-1** Curva de velocidad se secado  
Fuente: BARBOSA G, 2000.

### 1.2.20 Velocidad de secado

Se define como la pérdida de humedad del sólido por unidad de tiempo, trabajando en condiciones constantes de secado (presión, temperatura, humedad del aire).

### 1.2.21 Cálculo de la velocidad de secado en el período antecrítico

Para definir cuantitativamente la velocidad debemos referir ésta a la unidad de área de superficie del sólido expuesta al secado, Ecuación 4.

$$W = \frac{S}{A} - \frac{dx}{d\theta}$$

Dónde:

$W$  = Velocidad de secado ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado ( $\text{m}^2$ )

$dx$  = Diferencia de humedades crítica- final (kg agua/kg sólido seco)

$d\theta$  =Diferencia de temperaturas (°C)

### **1.2.22 Cálculo del tiempo de secado en condiciones constantes**

Se refiere al tiempo de operación en condiciones contantes de secado, Ecuación 5.

$$\theta_a = \frac{S}{A} \frac{X_i - X_c}{W_c}$$

Dónde:

$\theta_a$  = Tiempo de secado en condiciones constantes (h)

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

$X_i$  = Humedad inicial del sólido (kg agua/kg sólido seco)

$X_c$  = Humedad crítica (kg agua/kg sólido seco)

$W_c$  = Velocidad de secado constante (kg/hm<sup>2</sup>)

### **1.2.23 Cálculo del tiempo de secado en el período postcrítico**

Existen dos maneras de realizar este cálculo, el primero es la aplicación del método gráfico el cual se aplicará en caso de no conocer la relación  $W = f(x)$ . Para el cálculo de esta manera se realizará la gráfica de  $1/W$  vs  $X$  (humedad media) y se utilizará el resultado del área bajo la curva, Ecuación 6.

$$\theta_p = \frac{S}{A} \int_{x_i}^{x_c} \frac{dx}{W}$$

Dónde:

$\theta_p$  = Tiempo se secado en el período postcrítico (h)

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

$X_i$  = Humedad inicial del sólido (kg agua/kg sólido seco)

$X_c$  = Humedad crítica (kg agua/kg sólido seco)

$\frac{dx}{w}$  = Área bajo la curva (kg/hm<sup>2</sup>)

Existe además el método analítico para este cálculo:

- Si la velocidad varía linealmente con la humedad desde la humedad crítica hasta la humedad final. Entonces se obtiene la siguiente la Ecuación 7.

$$\theta_p = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_f}{W_c - W_f} \ln \frac{W_c}{W_f}$$

Dónde:

$\theta_p$  = Tiempo de secado en el período postcrítico (h)

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

$X_f$  = Humedad final del sólido (kg agua/kg sólido seco)

$X_c$  = Humedad crítica (kg agua/kg sólido seco)

$W_c$  = Velocidad total de secado constante (kg/hm<sup>2</sup>)

$W_f$  = Velocidad total de secado decreciente (kg/hm<sup>2</sup>)

- Si la velocidad de secado varía linealmente desde la humedad crítica a la humedad de equilibrio se obtiene la Ecuación 8.

$$\theta_p = \frac{S}{A} \frac{X_c - X^*}{W_c} \ln \frac{(X_c - X^*)}{(X_f - X^*)}$$

Dónde:

$\theta_p$  = Tiempo de secado en el período postcrítico (h)

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

$X_f$  = Humedad final del sólido (kg agua/kg sólido seco)

$X^*$  = Humedad de equilibrio (kg agua/kg sólido seco)

$X_c$  = Humedad crítica (kg agua/kg sólido seco)

$W_c$  = Velocidad total de secado constante (kg/hm<sup>2</sup>)

#### **1.2.24 Cálculo del tiempo total de secado**

El tiempo total de secado será la suma de los tiempos de secado en período antecrítico y postcrítico, Ecuación 9.

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p$$

Dónde:

$\theta_T$  = Tiempo total de secado (h)

$\theta_a$  = Tiempo de secado en el período antecrítico (h)

$\theta_p$  = Tiempo de secado en el período postcrítico (h)

#### **1.2.25 Cálculo de la velocidad de secado en el período postcrítico**

Se calcula mediante la ecuación 10.

$$W_p = \frac{S (X_c - X_f)}{A \theta_p}$$

Dónde:

$W_p$  = Velocidad de secado en el período postcrítico.

$S$  = Masa del sólido seco (kg)

$A$  = Área expuesta al secado (m<sup>2</sup>)

$X_f$  = Humedad final del sólido (kg agua/kg sólido seco)

$X_c$  = Humedad crítica (kg agua/kg sólido seco)

$\theta_p$  = Tiempo de secado en el período postcrítico (h)

### ***1.2.26 Transferencia de calor en secadores***

El secado de sólidos Húmedos es un proceso térmico, aunque muchas veces la difusión en el sólido a través del gas se complica es posible secar muchos materiales solamente calentándolos por encima de la temperatura de ebullición del líquido. En la mayoría de procesos de secado adiabático la difusión ocurre en la fase gaseosa o sólida, pero frecuentemente las velocidades de secado suele depender más de los coeficientes de transferencia de calor que de los de transferencia de materia. El cálculo del consumo de calor se aplica a un secador con los siguientes objetivos:

- Calentar la alimentación hasta la temperatura de vaporización.
- Vaporizar el Líquido.
- Calentar los Sólidos hasta su temperatura final.
- Calentar el vapor hasta su temperatura final.

## **1.3 Liofilización**

### ***1.3.1 Definición***

Es la desecación producida al sublimar un sólido en un recipiente evacuado a una presión absoluta aproximada a un milibar.

### ***1.3.2 Fundamentos de la Liofilización***

El fundamento la liofilización es la extracción de agua de un producto previamente congelado, en forma de vapor; es decir se produce el fenómeno denominado sublimación en el cual el hielo en estado sólido en condiciones de baja presión pasa a vapor sin pasar por el estado líquido intermedio. Para acelerar el proceso se utilizan ciclos de congelación-sublimación con los que se consigue eliminar prácticamente la totalidad del agua libre contenida en el producto original, pero preservando la estructura molecular de la sustancia liofilizada.

### ***1.3.3 Campos de aplicación***

Se utiliza principalmente en la industria de alimentos para conservación de los alimentos y en la farmacéutica para la conservación de medicamentos, aunque también puede usarse para fabricar materiales como el aerogel o hacer más conveniente el transporte de ciertos productos por reducción del peso, Aunque es una técnica bastante costosa tiene muy buenos resultados que no pueden ser conseguidos de otra manera como una mayor calidad, especialmente en la industria alimenticia ya que permite obtener alimentos secos sin que los mismos pierdan sus propiedades nutritivas y organolépticas como vitaminas, aminoácidos, proteínas, carbohidratos, antioxidantes, minerales, etc.

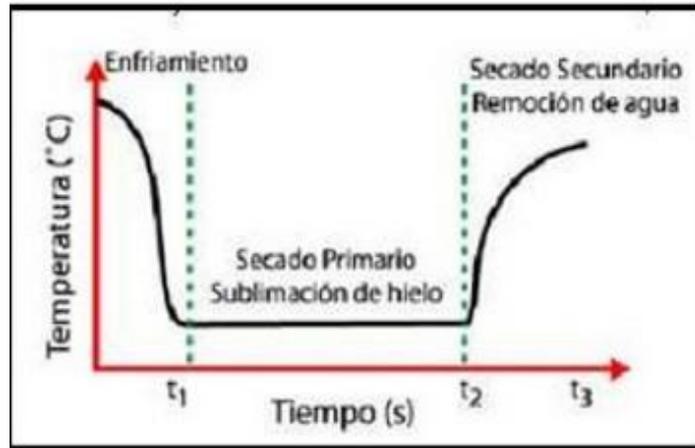
### ***1.3.4 Razones para utilizar la Liofilización***

- A bajas temperaturas es posible evitar los cambios no deseados en el material a secar, como la formación de películas, la contaminación bacteriana y los cambios químicos.
- Durante la liofilización se suprimen los efectos de la tensión superficial, así el producto tiende a mantener una estructura con los poros abiertos que permitirán una reabsorción inmediata de agua cuando se requiera.
- Se aprovecha los cambios de volatilidades relativas con la temperatura de liofilización del material a secar, evitando así la pérdida de otro componente, el cual se evaporaría junto con el agua si se utilizara una temperatura mayor que la de liofilización.

### ***1.3.5 Etapas de la Liofilización***

La liofilización involucra varias etapas:

- A. Congelación (y acondicionamiento en algunos casos) a bajas temperaturas.
- B. Secado por sublimación del hielo del producto congelado, se estudia en dos etapas, a saber: etapa primaria y secundaria de secado.
- C. Almacenamiento del producto seco en condiciones controladas.



**Figura 4-1** Etapas de la Liofilización  
Fuente: EUGENE G, 1992.

A. Congelación: Cada producto debe congelarse de una manera tal que garantice que sufrirá pocas alteraciones en el proceso posterior de sublimación. Se requiere que el producto congelado posea una estructura sólida sin intersticios en los que haya líquido concentrado para propiciar que todo el secado ocurra por sublimación.

Si se trata de alimentos pueden obtenerse distintas mezclas de estructuras luego de la congelación que incluyen cristales de hielo, eutécticos, mezclas de eutécticos y zonas vítreas amorfas. Estas últimas son propiciadas por la presencia de azúcares, alcoholes, cetonas, aldehídos y ácidos, y por las altas concentraciones de sólidos en el producto inicial.

Debido a que el agua en ese estado vítreo está aún en forma líquida, la presión de vapor del agua en el vidrio, según la Ley de Raoult, tenderá a ser menor que la del hielo a la misma temperatura. Como resultado de la baja velocidad de evaporación del agua, el sistema vítreo puede fundirse cuando la temperatura aumenta, es decir, la movilidad del agua será mayor que cero, sin implicar ninguna cantidad significativa de calor de fusión.

Un congelamiento rápido nos dará los siguientes resultados:

- Formación de cristales de hielo más pequeños, que permiten reducir el daño de las paredes de las células y además aumenta la velocidad de sublimación y disminuye las tensiones debidas a la expansión dentro del recipiente contenedor de la sustancia.
- Disminuye el riesgo de obtener soluciones altamente concentradas, las cuales pueden causar desecación osmótica de las células o producir una reacción química, antes de que el congelamiento termine.

En la etapa de congelación otro factor a tomar en cuenta es la porosidad del producto debido a que la difusión de vapor aumenta con la porosidad, es por eso que si la velocidad de congelación del producto es lenta la velocidad de secado será rápida ya que los cristales formados son voluminosos y se transforman en poros después de la sublimación. Los cristales formados durante la congelación son más pequeños en cuanto mayor es el extracto seco inicial. Por lo tanto, la velocidad de liofilización disminuye cuando aumenta el extracto seco del producto.

## B. Secado por sublimación de hielo

### B1. Secado Primario por Sublimación de Hielo

En condiciones de vacío el proceso difusivo es más eficiente. El paso de hielo a vapor requiere gran cantidad de energía que es suministrada en alto vacío pues la interfase de secado se mueve hacia el interior de la muestra y el calor tiene que atravesar capas congeladas o secas, generándose un considerable riesgo de fusión del material intersticial o quemar la superficie del producto que ya está seco.



**Figura 5-1** Fases del Secado Primario.

Fuente: EUGENE G, 1992.

Las tres fases que se distinguen en la figura son:

Fase 1: Llamada etapa conductiva. Debido al calentamiento de la muestra al inicio del proceso, la velocidad de sublimación aumenta rápidamente hasta llegar a un máximo. Esta fase concluye en un tiempo corto y en ella se produce la mayor parte de remoción de agua del producto (75-90 %). el mecanismo dominante en esta fase es la transferencia de calor por conducción.

Fase 2: Primera etapa difusiva. Se produce una gran disminución en la velocidad de sublimación por la formación de una capa porosa de material seco que opone resistencia creciente al flujo de calor y al vapor a medida que procede el secado.

Fase 3: Segunda etapa difusiva. En esta fase la velocidad de sublimación sigue disminuyendo hasta aproximarse a cero. Esto ocurre porque el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación. En esta etapa se puede incrementar la temperatura de la calefacción y del producto hasta valores del orden de 50°C, dependiendo del material que se trate. En la transferencia de calor y masa se combinan la acción de la temperatura y los gradientes de presión como fuerzas impulsoras, que deben vencer las resistencias puestas por el espesor de la muestra y sus características físicas. El espesor es importante: mientras este es más delgado hay menor resistencia para que el flujo de calor y masa pase a través de la muestra.

## B2. Secado Secundario

La humedad remanente en el producto después del proceso de secado primario se absorbe por el material o se adsorbe por la superficie del mismo.

## C. Almacenamiento del producto seco en condiciones controladas

Los productos liofilizados y empacados de manera correcta se pueden guardar durante largos períodos de tiempo ya que en buena medida retienen las propiedades físicas, químicas, biológicas y organolépticas de sus estados frescos.

La liofilización, reduce las pérdidas de calidad que se deben al deterioro por reacciones químicas, causado por degradación enzimática y no enzimática. El único problema importante a considerar en este tipo de productos es la oxidación de lípidos, inducida por los bajos niveles de humedad a los que lleva el producto durante el secado, para evitar estos problemas se debe empacar los productos liofilizados en recipientes impermeables al oxígeno.

Por otra parte para evitar la degradación no enzimática debe existir una rápida transición de alto a bajo contenido de humedad. Por último el uso de rangos bajos de temperatura también evita la desnaturalización de proteínas en los productos liofilizados.

### ***1.3.6 Suministro de calor para la sublimación***

La máxima velocidad de secado se obtiene cuando el sólido tiene un pequeño espesor y una gran superficie, la velocidad de secado también depende de la presión del vapor saturado sobre el sólido a secar, su temperatura no debe ser más baja de lo necesario y el flujo de calor puede ser controlado por esta temperatura.

El suministro de calor a sólidos se lo hace por conducción desde la bandeja y muchas veces desde una cubierta, lográndose un mejor contacto si se comprimen entre la bandeja y la

cubierta. En la práctica se ha visto que con hojas de metal expandido que dejan libre una gran superficie para la sublimación se obtiene buenos resultados.

### ***1.3.7 Transferencia simultánea de calor y materia***

Los fenómenos de transferencia de materia y calor durante la liofilización se pueden resumir en términos de difusión de vapor de agua del frente de sublimación y la radiación y conducción del calor de la placa radiante.

La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca del producto bajo la acción de una diferencia de presión, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande.

Como en todo proceso de secado, coexisten los fenómenos de transferencia de calor y materia, la curva de transferencia de calor en función del tiempo se obtiene multiplicando la cantidad de agua sublimada por su correspondiente calor de sublimación o desorción. (MARTÍNEZ R y PRADA O, 2008, Pp 35)

### ***1.3.8 Ventajas de la Liofilización***

- Mantiene mejor la estructura y el aspecto original del alimento.
- Inhibe el deterioro del color y sabor por reacciones químicas y las pérdidas de propiedades fisiológicas.
- La humedad residual es baja.
- El tiempo de conservación es largo.
- La retención de los aromas es muy alta.
- Valorización y potenciación de las producciones primarias.
- Ausencia de temperaturas altas, por lo que previene el daño térmico.
- Fácil transporte y almacenamiento de los productos.
- Inhibición del crecimiento de microorganismos, estabilidad microbiológica.
- Recuperación de las propiedades del alimento al rehidratarlo.
- Ausencia de aditivos y/o conservantes.
- Mantenimiento del valor nutricional del alimento.
- Empleo de vacío, estabilidad química.

### ***1.3.9 Desventajas de la Liofilización***

- Largo tiempo de procesamiento.
- Alto consumo de energía, en algunos casos.  
Costo de inversión inicial alto.

### ***1.3.10 Equipo- Liofilizador***

La principal función del liofilizador es crear el entorno adecuado para el proceso de liofilización. Generalmente estos equipos constan de los siguientes elementos.

- Cámara de secado
- Condensador
- Sistema de vacío  
Instrumentación

### ***1.3.11 Cámara de Secado***

La cámara del secador tiene las siguientes funciones:

- Proporcionar un entorno limpio y a veces estéril para el proceso
- Proporcionar las temperaturas y presiones necesarias para congelar y secar el producto.

### ***1.3.12 Condensador***

El condensador es el encargado de eliminar los vapores condensables antes de que entren en el sistema de bombeo de vacío, es decir, recoge el vapor de agua producto de la sublimación, y lo desublima.

### ***1.3.13 Sistema de vacío***

El sistema de vacío, está conectado a la cámara del condensador y se encarga de proporcionar las presiones necesarias para las fases de secado primario y secundario. Los dos rasgos principales de un sistema de vacío que requieren consideración son la tubería de comunicación con el condensador y la naturaleza de la bomba de vacío.

### 1.3.14 Instrumentación

La instrumentación asociada con liofilizador es muy importante. El logro de un óptimo producto requiere un sistema de control que reproduzca el proceso de liofilización, siempre que esté dentro de los límites del equipamiento y de un sistema de recolección de datos que verifique la consistencia del proceso.

### 1.3.15 Tipos de Liofilizadores

Se ha clasificado los Liofilizadores en tres tipos principales:

- Liofilizadores con recipientes rotatorios: se utilizan únicamente para secar líquidos.
- Liofilizadores múltiples: son utilizados para secar el contenido de una gran cantidad de recipientes pequeños, su desventaja es que la ruptura del vacío en un solo recipiente destruye el vacío en todos los demás.
- Liofilizadores de armario con estantes: son los más comunes y son utilizados para tratar una gran variedad de sustancias.

### 1.3.16 Datos cuantitativos acerca de Liofilizadores

Los siguientes valores pueden servir como una guía indicativa en el diseño de Liofilizadores:

- El vacío usado se encuentra generalmente en el rango de 0,01 a 1 mmHg
- Las bandejas son enfriadas a -50 °C y los serpentines de condensación a -70°C.
- La duración típica del ciclo de secado en alimentos es de 5 a 10 horas.

**Cuadro 5-1:** Relación entre el tamaño y la potencia consumida por los liofilizadores.

Modelo	Peso (t)	Capacidad (litros)	Potencia al eje (kW)	Calefacción (kW)	Área del suelo (m <sup>2</sup> )
Pequeño de laboratorio	¼	0,1	0,2	0,2	1
De pequeña producción	2 ½	20	4	5	13
De gran producción	40	500	75	50	150

Fuente: MOSS A y NONHEBEL G, 1979.

## **1.4 Diseño**

Para el desarrollo del diseño de un equipo liofilizador, los factores más importantes que se han de tener en cuenta son los siguientes:

- Condiciones térmicas y de presión.
- La capacidad del equipo.
- Sistemas componentes, funcionamiento y características.
- Controles.
- Seguridad e higiene.

Para la determinación de algunos de estos factores fue necesario realizar de manera práctica la experiencia de secado de la mora de castilla en el laboratorio con los cual pudimos hallar variables como la velocidad y el tiempo de secado y las diferentes humedades.

### ***1.4.1 Condiciones térmicas y de presión***

El liofilizador debe diseñarse para trabajar a presiones de vapor inferiores a la del punto triple del agua; esto implica que el producto a liofilizar debe colocarse en una cámara que pueda soportar el vacío, conservando condiciones de hermeticidad y buena resistencia a la presión atmosférica externa.

La temperatura de entrada del producto sin congelar a la cámara de liofilización puede estar en un rango de 15°C y 20°C y la temperatura del proceso debe ser de aproximadamente -50°C. la presión a la que se trabaja es generalmente de 0.5mm de Hg, y para lograr mantener las presiones requeridas, el sistema de condensación deberá operar a una temperatura de -70°C, de tal manera que todo el vapor producido se condense en ese sistema, y permitiendo que el vacío se conserve durante todo el proceso de liofilización.

### ***1.4.2 Capacidad del equipo***

- La capacidad del aparato no es el único criterio a tomar en consideración del punto de vista de la producción. Por consiguiente:
- La duración de la liofilización debe reducirse al máximo para aumentar la productividad del aparato, para lo cual se requiere una instalación de regulación adecuada.

- La fiabilidad del aparato y sus componentes debe ser muy grande. Problemas con el compresor, la bomba de vacío, o la regulación del calentamiento pueden provocar la pérdida de cargamentos completos de un valor muy importante.

Equipos de liofilización de dimensión inferior, pero con la posibilidad de rentabilidad más grande son mucho mejores en varios aspectos a otros aparatos de talla mediana.

### ***1.4.3 Sistemas, componentes, funcionamiento, características***

Un equipo para liofilización discontinuo donde el proceso se lleva a cabo dentro de una cámara sin ningún movimiento del producto a liofilizar, consta básicamente de:

Una cámara construida en acero inoxidable que cuenta con una puerta basculante de cierre hermético. En su interior se encuentran distribuidas las placas o bandejas que van a contener el producto a liofilizar.

Las placas que sostienen las bandejas deben ir conectadas por una parte al equipo o sistema de refrigeración y de calentamiento. El intercalar un condensador entre la cámara y la bomba de vacío es de vital importancia, ya que dicho condensador se encarga de recoger el vapor de agua que procede de la cámara y que a la bomba en ningún momento debe llegar.

- A. Un condensador que se intercala entre la cámara y la bomba de vacío y que también se conecta al sistema de refrigeración.
- B. El sistema de refrigeración o de enfriamiento seleccionado, diseñado y calculado para trabajar a determinadas condiciones de temperatura y presión.
- C. Un grupo de vacío, formado por lo general por una bomba (a paletas de doble efecto), la cual será seleccionada según las condiciones del proceso. Dicha bomba está conectada a la cámara o al condensador externo y a un conjunto de electroválvulas, controles de presión y de temperatura necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

Las características de los equipos de liofilización son en general, las siguientes:

- Sistema de refrigeración a base de un refrigerante capaz de alcanzar temperaturas comprendidas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $-70^{\circ}\text{C}$ .

- Sistema para el calentamiento de las bandejas, a base de resistencias eléctricas o circulación de líquidos calientes, los cuales permiten alcanzar temperaturas que suministren el calor necesario para la sublimación del hielo.
- Sistema para vacío, que oscila entre 50 a 100 m<sup>3</sup>/h para equipos de nivel de laboratorio y de 1500 m<sup>3</sup>/h en los de tipo industrial, que alcanzan niveles de vacío de 0.01 a 1 mmHg.
- Sistema condensador, refrigerado por el mismo sistema de refrigeración que enfría las placas. Disponen de superficies de condensación que varían desde algunos decímetros cuadrados hasta varios metros cuadrados, dependiendo de las condiciones de diseño.
- Armario con instrumentos de control, desde donde se regulan los parámetros (la temperatura y la presión) del proceso.

En el diseño y cálculo de cada uno de los componentes del equipo liofilizador, se tomarán datos básicos que se han mencionado y que servirán como medio de comparación con las características generales del equipo ya mencionadas.

#### ***1.4.4 Controles***

En los equipos de Liofilización se usan aparatos que controlen la presión y la temperatura, este control será programable y registrado para su revisión

#### ***1.4.5 Seguridad e higiene***

La construcción y montaje de un equipo liofilizador están influenciados por el lugar donde será montado y las condiciones tecnológicas tales como ventilación, iluminación, protección contra vibraciones y ruidos.

Es de gran importancia para el diseño del equipo las condiciones climatológicas, el grado de humedad, presión, temperaturas ambientales y la presencia de mezclas explosivas de gas, vapor, polvo o aire dentro de la zona de funcionamiento del equipo.

#### ***1.4.6 Especificaciones de Diseño***

- Material: *El CODEX ALIMENTARIUS* establece que todo equipo y utensilios que va a ser utilizados en el procesado y manipulación de alimentos deben ser de un material que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores, además debe ser resistente a la limpieza, desinfección y corrosión y sus superficies deben ser lisas, sin poros ni grietas.

En la Industria de alimentos el material más recomendado a utilizarse es el acero inoxidable que cumple todas las características expuestas, en este marco los aceros más usados son los AISI 304 y 316, entre estos dos se ha elegido para el diseño del equipo el ACERO AISI 316 pues es más resistente al ataque corrosivo de los ácidos láctico y cítrico.

- Forma de la cámara: Para este factor se debe tener en cuenta:
  - a) Función de la cámara.
  - b) Resistencia requerida para soportar los cambios de presión.
  - c) Forma en la cual el material pueda conseguirse en el mercado.
  - d) Facilidades Instrumentales para la construcción del cuerpo de la cámara y la comodidad para el mantenimiento.

La cámara puede ser de dos formas principales Cúbica y cilíndrica, en nuestro caso se ha elegido para el diseño la forma Cilíndrica pues es la más adecuada para el vacío por ofrecernos las ventajas de tener la mayor relación volumen contenido/aire exterior del recipiente y la sección circular tiene mejor resistencia a la presión exterior que es la presión atmosférica máxima.

Además esta forma requiere el empleo de menor área de material en su elaboración, y debido a la resistencia de la sección transversal, el menor espesor, gracias a lo cual se emplea un menor volumen de material, lo cual es muy importante cuando se construye el cilindro a partir de una lámina, por otra parte el costo del material disminuye ya que depende del volumen empleado. Por último esta geometría hará que el peso de la cámara disminuya significativamente.

- Tamaño de la cámara: depende de los siguientes factores:
  - a) Capacidad de la Cámara
  - b) Número de placas
  - c) Espesor de las placas
  - d) Número de bandejas
  - e) Longitud de las bandejas
  - f) Espesor de las bandejas.
  - g) Espacio entre placas
  - h) Volumen de la cámara
  - i) Diámetros de la Cámara.
  
- Espesor de las paredes de la cámara: para soportar una presión externa de 630 mmHg que es lo a lo que usualmente se encuentra la parroquia Punin, el material del cual está hecho el

equipo (ACERO AISI 316) requiere un espesor de 0,108 pulgadas, sin embargo para fines de doblado y soldadura se recomienda usar un espesor de 0,138 pulgadas, es decir 0,35 cm, calibre 10.

- Tapa de la cámara: se recomienda utilizar capas abombadas, ya sean esféricas o elipsoidales ya que son más económicas y ligeras que las planas. En nuestro caso se ha seleccionado la forma elipsoidal para las tapas de la cámara.
- Espesor de las tapas de la cámara: para soportar una presión externa de 630 mmHg que es lo a lo que usualmente se encuentra la parroquia Punin, el material del cual está hecho el equipo (ACERO AISI 316) requiere un espesor de 0,065 pulgadas, sin embargo para fines de doblado y soldadura se recomienda usar un espesor de 0,138 pulgadas, es decir 0,35 cm, (calibre 10).
- Cantidad de producto a Liofilizar: En la temporada de cosecha de moras, se estima que las pérdidas por producto no vendido son el 10 % de la producción. Mensualmente se cosechan 480 kg de mora de castilla en la comunidad corazón de Jesús de la Parroquia Punin, lo cual nos da una producción de 120 Kg a la semana, por lo el 10 % perdido por falta de ventas que será destinado al proceso de liofilización será de 12 kg, valor que se utilizará como base para la capacidad del liofilizador.
- Espesor del producto: se ha establecido que el espesor de la mora que va a ser sometida a liofilización sea de 0,05 cm para que de esa manera la velocidad de liofilización sea más rápida, ya que se sabe que la velocidad de liofilización es directamente proporcional al cuadrado del espesor del producto, no se recomienda que el producto a liofilizar sea de un espesor menor debido a que no se aprovechara bien la capacidad del equipo que se va a diseñar.
- Placas intercambiadoras de calor: estas placas serán diseñadas de ACERO AISI 316 que soportará la circulación de refrigerantes corrosivos dentro de sí. En cuanto a las dimensiones, el ancho de las placas se lo determinará mediante cálculo, mientras que la longitud será la misma que la de las bandejas, lo cual permitirá que exista una mayor superficie de contacto, cada placa contará con un número determinado de canales dependiendo del ancho de las placas, estos canales tendrán una separación de 2 cm entre sí.

- Número de placas intercambiadoras de calor: el liofilizador estará formado por 7 placas intercambiadoras de calor que se encontrarán dentro de la cámara, por estas placas circulará el fluido de transferencia de calor, sobre las 6 primeras placas estarán ubicadas las bandejas, mientras que la séptima placa será la encargada de proporcionar energía radiante a la sexta para que exista homogeneidad en la transferencia de calor en las seis bandejas.
- Distancia entre las placas: se ha establecido una distancia entre placas de 10 cm lo cual permitirá que exista un mejor flujo de vapor de agua retirado del producto a los condensadores.
- Espesor de las placas intercambiadoras de calor: las placas intercambiadoras de calor tendrán un espesor de 2 cm, el cual proporcionará un área transversal adecuada que permitirá el flujo del refrigerante que circulará por las placas.
- Altura de las bandejas: será de 3 cm lo cual permitirá contener bien el producto a liofilizar sin evitar que se desperdigue, además mejorará la manipulación de las bandejas, en cuanto a agarre, por parte de los operadores de la máquina.
- Condensadores: el Liofilizador estará formado por dos condensadores laterales de forma semiesférica al interior de la cámara, esto permitirá aprovechar el espacio sobrante en la cámara que no estará ocupado por las placas y bandejas. Los condensadores estarán contruidos por tubos de 5/8 doblados. En el diseño del condensador se requiere saber la cantidad de vapor de agua que se necesita congelar en la superficie del condensador, es decir, el flujo de vapor proveniente de la sublimación y desorción del agua y el calor que debe absorber el refrigerante para congelar ese flujo de vapor.

La temperatura mínima requerida en el condensador para que se condense el vapor de agua, es de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . la rata máxima de sublimación en el liofilizador está definida por la densidad de flujo de vapor de agua durante la primera etapa, esta se hallará para una temperatura máxima de la placa de  $0^{\circ}\text{C}$  para evitar la fusión máxima de la sustancia.

Los condensadores deben tener la capacidad de condensar esta máxima cantidad de flujo de vapor durante la primera etapa de la liofilización.

- Aislamiento de la Cámara: Con el fin de mantener la temperatura de trabajo ya establecida en la práctica, es necesario aislar la cámara del ambiente exterior por medio de un material aislante que proporcione una alta resistencia al flujo de calor del exterior al

interior de la cámara. La eficacia del aislante depende de factores como su naturaleza, espesor, densidad y la forma en que el mismo sea aplicado.

Algunos de los más usados aislantes son: la fibra de vidrio, el poliestireno expandido o extruido, el poliuretano y la lana mineral. Las características básicas de los materiales aislantes que se deben conocer son: la conductividad térmica, la permeabilidad al vapor de agua, la estabilidad dimensional, la resistencia a la compresión

El material que se escoja como aislante debe ofrecer una gran resistencia al flujo de calor, de acuerdo al ANEXO II en el que se muestra la conductividad de algunos aislantes, el que necesita un menor espesor para impedir un flujo de calor no mayor a  $8 \text{ W/m}^2$  (máximo flujo de calor permisible según Barrera, 1996, 30) es el poliuretano. Además se escogió este material como aislante porque es muy resistente a los microorganismos y no favorece a su desarrollo.

Según el ANEXO III la densidad del poliuretano que más se ajusta a las condiciones de la cámara es de  $40 \text{ kg/m}^3$  pues es a la cual el mismo tendrá mayor resistencia a la compresión, menor deformación y menor permeabilidad, es decir bastante resistencia al paso de vapor de agua, lo cual es muy importante en el equipo, además a esta densidad la conductividad de este aislante es la más baja lo cual impedirá de mejor manera la transferencia de calor del exterior al interior de la cámara. Para esta densidad según el ANEXO IV se requiere un espesor de 19,32 cm.

- Presión de trabajo: Este valor determina el tipo de bomba que se utilizará. La presión mínima requerida para el proceso de liofilización propuesta para el diseño del equipo es de 0,05 mmHg, ya que se sabe que la velocidad de secado en función de la presión pasa por un máximo a una presión comprendida generalmente entre 0,01 a 1 mmHg.
- Tiempo para obtener una presión dada: al incorporar el sistema de refrigeración en la cámara no es necesario escoger una bomba de gran capacidad, pues un tiempo suficiente para que la bomba reduzca la presión en la cámara de secado hasta 0,01 es de 15 a 30 minutos en los cuales el producto no corre el riesgo de descongelarse en las bandejas.
- Tomas de vacío: se deberán situar dos tomas de vacío, una a cada lado del liofilizador, de forma que los condensadores estén situados entre la cámara y la bomba de vacío y no permitan que el agua ingrese a la bomba.

- Sistema de refrigeración para la congelación del producto: es necesario refrigerar las placas donde se colocará el producto y los condensadores, para lo cual se empleará un sistema de refrigeración para cada uno. En la primera etapa del proceso en el cual los condensadores no estarán funcionando se utilizará ambos sistemas para la refrigeración de las placas. En el diseño del sistema de refrigeración se debe conocer la carga de enfriamiento, es decir, la cantidad de calor necesaria para alcanzar la temperatura requerida, la cual es de 20 °C por debajo del punto eutéctico.

En nuestro caso la temperatura mínima requerida para la congelación de la mora es de -50°C , por lo tanto el refrigerante que se elija debe tener una temperatura de evaporación de -50°C

- Refrigerante primario: existen varios refrigerantes que trabajan a la temperatura requerida de -50 °C, el que hemos escogido es el R404A debido a que es el más fácil de encontrar en el mercado.
- Refrigerante secundario: En muchos casos el calor es transferido no por el refrigerante primario, sino por el refrigerante secundario, que puede ser cualquier líquido enfriado por el refrigerante primario.

En los equipos de liofilización se utilizan principalmente tricloroetileno, aceite de silicona y lexsol como refrigerantes secundarios, de entre ellos se ha escogido el Tricloroetileno, cuyas propiedades se muestran en el ANEXO V, se lo seleccionó debido a que a -50°C este refrigerante no se evapora, además como su punto máximo de ebullición es de 87°C puede utilizarse también como medio calefactor, lo cual hace que no se requieran resistencias calefactoras dentro de la cámara. Otra ventaja es su limpieza en frío, su estabilidad y su aplicación desengrasante en los sistemas en los que se utiliza.

- Carga de enfriamiento: Esa la suma de las cargas térmicas de diferentes fuentes como son el producto, el aire presente en la cámara, las bandejas y la estantería y el calor que pasa de exterior a la cámara de liofilización a través de las paredes, todos estos aportes de calor se deben calcular para diseñar el sistema de refrigeración.
- Carga del producto: es el calor que debe extraerse del producto refrigerado a fin de que su temperatura baje hasta el nivel que se desea. Debido a que el producto será congelado a una temperatura menor de la de su punto de congelación, esta carga se calcula en tres partes: 1) Calor cedido por el producto al enfriarse desde la temperatura de entrada hasta su

congelación. 2) calor cedido por el producto durante su congelación. 3) Calor cedido por el producto al enfriarse desde su temperatura de congelación hasta la temperatura final.

- Sistema de calefacción de las placas del producto: el calor es suministrado al producto congelado con el fin de obtener la migración de agua del producto hacia el condensador, esta aplicación de calor al producto, en este caso la mora de castilla, suministra la energía requerida para retirar estos vapores y elevar la temperatura del producto, en la parte inicial el volumen total del producto estará congelado y permitirá un suministro de calor alto, a medida que el producto se va secando ofrecerá una mayor resistencia a la salida del vapor, por lo cual se deberá suministrar una menor cantidad de calor para evitar la fusión del producto, sin embargo hay que tener en cuenta que en la parte final del proceso de secado se deberá suministrar una mayor cantidad de calor para retirar las moléculas de agua restantes.

Como vemos el calor que se suministra al producto en las diferentes etapas de secado debe ser controlado para lo cual se aplicará alternadamente el calor y la refrigeración en el sistema. El rango de control debe estar entre  $-50^{\circ}\text{C}$  y  $65^{\circ}\text{C}$ . para lograr este objetivo de debe medir continuamente la temperatura del producto.

El dispositivo que se utilizará para el calentamiento deberá suministrar aproximadamente 700 calorías por gramo de hielo sublimado. Para tener un mejor control en la temperatura del producto es necesario mantener en funcionamiento el sistema de refrigeración del tricloroetileno, para ello una vez que el mismo salga de intercambiador de calor pasará por un banco de resistencias, el cual transferirá el calor necesario para que el tricloroetileno suministre calor latente al producto y éste se deshidrate.

- Dispositivo utilizado para el calentamiento: se utilizarán resistencias eléctricas. El cálculo de las resistencias de inmersión para el calentamiento depende de la cantidad de calor necesario para calentar el tricloroetileno de  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta una temperatura máxima de  $60^{\circ}\text{C}$ , con el fin de evitar la fusión del hielo formado durante el enfriamiento.
- Sistema de Refrigeración para los condensadores: la función de los condensadores es retirar el vapor de agua de los gases dentro de la cámara, para ello se debe colocar el condensador de manera que los gases choquen con la superficie del condensador, además la temperatura de la superficie del condensador debe ser tal que la presión de vapor del hielo depositado sea significativamente más baja que la presión parcial de vapor de agua en los gases.

Si la presión de vapor del hielo en el condensador es mayor que la presión en la cámara del condensador entonces la sublimación ocurre, pero el vapor se puede difundir y entrar en la bomba de vacío. Por esta razón la temperatura del condensador deberá ser menor que la del producto para que exista un gradiente de presión que permitirá que el flujo de vapor de agua se realice sobre el condensador y se forme una capa de hielo sobre él.

- Sistema de Control del Liofilizador: el equipo constará de
  - 1) Control de presión sobre la bomba de vacío con motor de; controlando una presión de 0,01 Torr, mediante un sistema ON/OFF sobre la bomba.
  - 2) Control de temperatura sobre los intercambiadores de placas (entre -50 y 60 °C) mediante ocho termopares ubicados, dos sobre las placas y seis sobre el producto.
  - 3) Control de temperatura sobre los condensadores mediante dos termopares, la temperatura de debe mantener entre -70°C y 20°C, con sistema ON/OFF sobre el motor de la unidad.
  - 4) Control de temperatura (entre -50 y 60°C) sobre el tricloroetileno a la entrada del sistema del sistema de calefacción para determinar el funcionamiento de las resistencias eléctricas.
  - 5) Tablero eléctrico con encerramiento.
  - 6) Breaker general de fuerza.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1 Simulación del proceso de secado para la mora de castilla

Para la simulación del proceso de secado por liofilización de la mora de castilla fue necesario realizar un secado convencional utilizando un secador de bandejas eléctrico ubicado en el laboratorio de OPERACIONES UNITARIAS de la ESPOCH.

Se utilizaron moras frescas proporcionadas por el productor de mora de castilla solicitante del tema de tesis, las moras fueron lavadas y cortadas de manera longitudinal de manera que las mismas tengan las siguientes dimensiones largo 0,5 cm; alto 2,5 cm; espesor 0,5 cm. Estos trozos fueron colocados a lo largo de la bandeja previamente forrada con papel aluminio y se colocaron con una separación de 3 cm entre ellas. Enseguida se procedió a realizar el secado a una temperatura de 65 °C, durante el mismo cada 10 minutos se sacó la bandeja para pesar hasta que el peso fue constante durante 5 ocasiones.

##### 2.1.1 Datos experimentales obtenidos

Después de 6 horas, tiempo que duró el proceso de secado de la mora de castilla, se obtuvo los siguientes datos experimentales:

**Tabla 1-2:** Datos Experimentales del proceso de secado de mora de castilla

Tiempo (h)	Masa (kg)
0	0,0772
0,16	0,0725
0,33	0,0665
0,5	0,0617
0,66	0,057
0,83	0,054
1	0,0505
1,16	0,0475
1,33	0,0445
1,5	0,0415
1,66	0,0395

1,83	0,037
2	0,0335
2,16	0,0315
2,33	0,0295
2,5	0,0275
2,66	0,0255
2,83	0,0242
3	0,023
3,16	0,0215
3,33	0,020
3,5	0,019
3,66	0,018
3,83	0,0165
4	0,0155
4,16	0,0147
4,33	0,0135
4,5	0,013
4,66	0,0125
4,83	0,012
5	0,0115
5,16	0,0112
5,33	0,011
5,5	0,0108
5,66	0,0107
5,83	0,0106
6	0,0105

**Realizado por:** Gabriela Elizabeth Campos Mera

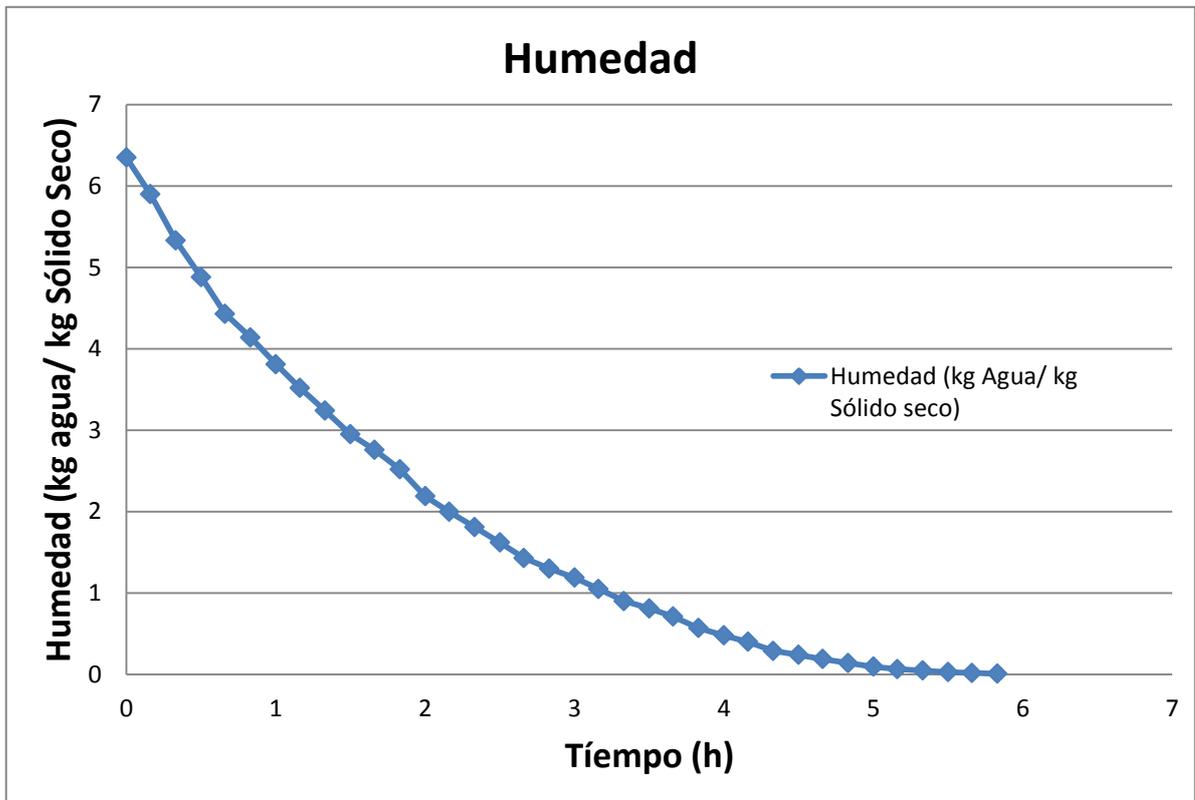
**Tabla 2-2:** Datos Experimentales obtenidos

Tiempo (h)	Masa de Agua (kg)	Humedad (kg Agua/kg sólido seco)
0	0,0667	6,35
0,16	0,062	5,90
0,33	0,056	5,33
0,5	0,0512	4,88
0,66	0,0465	4,43
0,83	0,0435	4,14
1	0,04	3,81
1,16	0,037	3,52
1,33	0,034	3,24
1,5	0,031	2,95
1,66	0,029	2,76
1,83	0,0265	2,53

2	0,023	2,19
2,16	0,021	2
2,33	0,019	1,81
2,5	0,017	1,62
2,66	0,015	1,43
2,83	0,0137	1,30
3	0,0125	1,19
3,16	0,011	1,05
3,33	0,0095	0,90
3,5	0,0085	0,81
3,66	0,0075	0,71
3,83	0,006	0,57
4	0,005	0,48
4,16	0,0042	0,4
4,33	0,003	0,29
4,5	0,0025	0,24
4,66	0,002	0,19
4,83	0,0015	0,14
5	0,001	0,095
5,16	0,0007	0,066
5,33	0,0005	0,048
5,5	0,0003	0,029
5,66	0,0002	0,019
5,83	0,0001	0,0095

**Realizado por:** Gabriela Elizabeth Campos Mera

### 2.1.2 Humedad de la mora de castilla a lo largo del proceso de secado



**Gráfico 1-2:** Humedad de la mora de castilla vs tiempo  
Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera.

### 2.1.3 Velocidad de secado de la mora de castilla

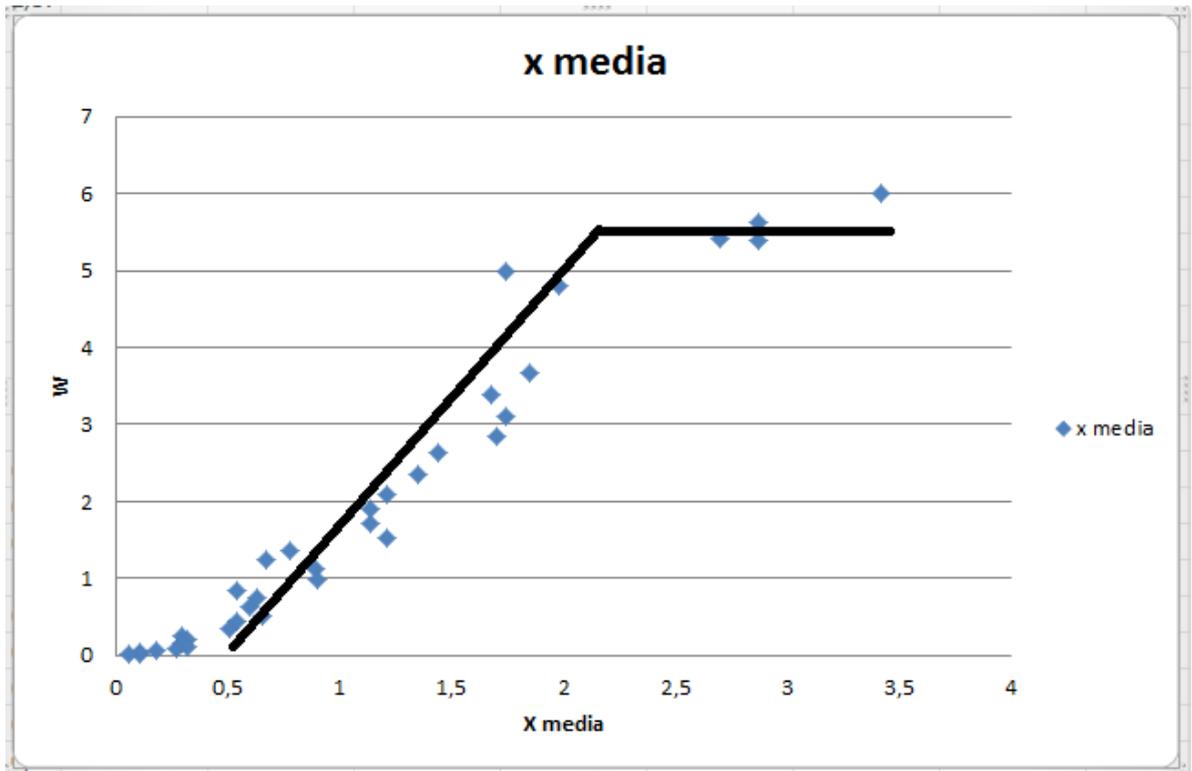
Para obtener la velocidad de secado se encontraron los datos necesarios y se aplicó la ecuación (4) y teniendo un área de 0,0103 y una masa de sólido seco de 0,0105, los resultados de la velocidad de secado se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3-2:** Resultados de la Velocidad de Secado

X (kg agua/kg sólido seco)	W (kg agua/m <sup>2</sup> h)
6,125	3,42
5,615	2,87
5,105	2,7
4,655	2,87
4,285	1,98
3,975	1,74
3,665	1,80
3,38	1,68

3,095	1,74
2,855	1,80
2,64	1,88
2,355	1,44
2,095	1,21
1,905	1,14
1,715	1,14
1,525	1,21
1,365	0,78
1,245	0,67
1,12	0,89
0,975	0,90
0,855	0,54
0,76	0,63
0,64	0,80
0,525	0,54
0,44	0,51
0,345	0,60
0,265	0,30
0,215	0,32
0,165	0,30
0,117	0,32
0,081	0,27
0,057	0,18
0,039	0,11
0,024	0,11
0,014	0,06

**Realizado por:** Gabriela Elizabeth Campos Mera



**Gráfico 2-2:** Velocidad de Secado vs Humedad Media

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

**2.1.4 Datos Obtenidos a través del gráfico de velocidad de secado de la mora de castilla**

**Tabla 4-2:** Datos Obtenidos en el Gráfico de velocidad de secado

<b>Humedad Crítica</b>	X <sub>c</sub>	2,19 kg agua/ kg Sólido seco
<b>Humedad de equilibrio</b>	X*	0,095 kg agua/ kg sólido seco
<b>Velocidad constante de secado</b>	W <sub>c</sub>	1,21 (kg agua/m <sup>2</sup> h)

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

**2.1.5 Cálculo del tiempo de secado en el período antecrítico**

Utilizando la ecuación 5 se calcula el tiempo de secado en el período antecrítico, así:

$$\theta_a = \frac{0,0105 \text{ kg sólido seco}}{0,0103 \text{ m}^2} \frac{6,35 - 2,19 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}}}{1,21 \frac{\text{kg agua}}{\text{m}^2 \text{h}}}$$

$$\theta_a = 3,50 \text{ h}$$

### ***2.1.6 Cálculo del tiempo de secado postcrítico***

Aplicando el método gráfico y la ecuación (6), se tuvo que el tiempo postcrítico es de 3,01 horas.

El tiempo total de secado será por lo tanto 6, 51 horas

## CAPÍTULO III

### 3 MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Cálculos

##### 3.1.1 Dimensionamiento

Las ecuaciones utilizadas para el dimensionamiento fueron tomadas de ARCHILA Stella. Propuesta de diseño de un equipo de liofilización para el laboratorio de operaciones unitarias, Pp 36-58

**Tabla 1-3:** Consideraciones necesarias para el dimensionamiento del Liofilizador

Capacidad de la Cámara	12 kg
Densidad de la mora de castilla	1.01 Kg/L
Volumen máximo de 12 kg de mora de castilla	11,88 L
Número de niveles	6
Capacidad por bandeja	2 kg
Volumen del producto en cada nivel	1,98 L
Número de placas	7
Espacio entre placas	10 cm
Altura de las Bandejas	3 cm
Espesor de las placas intercambiadoras de calor	2 cm
Espesor mínimo de la mora de castilla	0,5 cm
Espesor máximo de la mora de castilla	1 cm
Tipo de condensador	2 condensadores internos laterales

**Realizado Por:** Gabriela Elizabeth Campos Mera

- Altura de la estantería, Ecuación 11

$$h = (np \times ep) + (nb + esp)$$

$$h = 7 \times 2 \text{ cm} + (6 \times 10 \text{ cm})$$

$$h = 74 \text{ cm} = 0,74 \text{ m}$$

Dónde:

$h$  = Altura de la estantería (cm)

$np$  = Número de placas

$ep$  = Espesor de las placas (cm)

$nb$  = Número de bandejas

$esp$  = Espaciamiento entre bandejas (cm)

La estantería contará con soportes que tendrán un espesor de 2 cm por lo tanto la altura total de la estantería será de 76 cm.

- Diámetro interno de la cámara, Ecuación 12

$$dc = h + ea + ed$$

$$dc = 0,74 \text{ m} + 0,05 \text{ m} + 0,05 \text{ m}$$

$$dc = 0,84 \text{ m}$$

Dónde:

$dc$  = Diámetro interno de la cámara (m)

$h$  = Altura de la estantería (m)

$ea$  = Espacio entre la pared de la cámara y el vértice de la estantería arriba (m)

$ed$  = Espacio entre la pared de la cámara y el vértice de la estantería abajo (m)

- Radio de la cámara, Ecuación 13

$$rc = dc/2$$

$$rc = 0,84 \text{ m} / 2$$

$$rc = 0,42 \text{ m}$$

Dónde:

$rc$  = Radio de la cámara (m)

$dc$  = Diámetro interno de la cámara (m)

- Diámetro externo de cámara, Ecuación 14

$$dec = dc + 2tc$$

$$dec = 0,84 \text{ m} + 2 (0,0035 \text{ m})$$

$$dec = 0,847 \text{ m}$$

Dónde:

$dec$  = Diámetro externo de la cámara (m)

$dc$  = Diámetro interno de la cámara (m)

$tc$  = Espesor de la lámina al interior de la cámara (m)

- Ancho de las placas intercambiadoras, Ecuación 15

$$apl = 2 \sqrt{rc^2 - \frac{ht^2}{2}}$$

$$apl = 2 \sqrt{0,42 \text{ m}^2 - \frac{0,76 \text{ m}^2}{2}}$$

$$apl = 0,357 \text{ m} \cong 0,4 \text{ m}$$

Dónde:

$apl$  = Ancho de las placas intercambiadoras de calor (m)

$rc$  = Radio de la cámara (m)

$ht$  = Altura total de la estantería (m)

Cada placa tendrá 20 canales con una separación de 2 cm entre ellos.

- Ancho de las bandejas, Ecuación 16

$$ab = apl - edb$$

$$ab = 0,4 \text{ m} - 0,05 \text{ m}$$

$$ab = 0,35 \text{ m}$$

Dónde:

$ab$  = Ancho de las bandejas (m)

$apl$  = Ancho de las placas intercambiadoras de calor (m)

$edb$  = Espacio para el desplazamiento de las bandejas (m)

- Longitud de las bandejas, Ecuación 17

$$vp = ep \times ab \times lob$$
$$lob = \frac{vp}{emp \times ab}$$

$$lob = \frac{0,00198 \text{ m}^3}{0,005 \text{ m} \times 0,35 \text{ m}}$$

$$lob = 1,13 \text{ m} \cong 1,10 \text{ m}$$

Dónde:

$lob$  = Longitud de las bandejas (m)

$ab$  = Ancho de las bandejas (m)

$emp$  = Espesor mínimo del producto (m)

$vp$  = Volumen de producto en cada bandeja ( $\text{m}^3$ )

- Área de las bandejas, Ecuación 18

$$Ab = ab \times lob$$
$$Ab = 0,35 \text{ cm} \times 1,10 \text{ m}$$

$$Ab = 0,385 \text{ m}^2$$

Dónde:

$Ab$  = Área de las bandejas ( $\text{m}^2$ )

$ab$  = Ancho de las bandejas (m)

$lob$  = Longitud de las bandejas (m)

- Espesor de las bandejas, Ecuación 19

$$t_D = \frac{P \times d^2}{t^2}$$

Dónde:

$t_D$  = Esfuerzo de diseño (lb/pulg<sup>2</sup>)

$t$  = Espesor del material del que están fabricadas las bandejas (Acero AISI 316)

$d$  = Ancho de las bandejas (pulg)

$P$  = Fuerza máxima a la cual estarán sometidas las bandejas (lb/pulg<sup>2</sup>)

Ecuación 20

$$P = \frac{Cb \times g}{ab \times lob}$$

$$P = \frac{2 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2}{0,35 \text{ m} \times 1,10 \text{ m}}$$

$$P = 50,91 \frac{N}{m^2} = 0,0074 \text{ lb/pulg}^2$$

Dónde:

$P$  = Fuerza máxima a la cual estarán sometidas las bandejas (lb/pulg<sup>2</sup>)

$g$  = Gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$ab$  = Ancho de las bandejas (m)

$lob$  = Longitud de las bandejas (m)

Ecuación 21

$$t_D = \frac{t_t}{fS}$$

El valor de  $t_t$  se lo toma del ANEXO VI en la cual se encuentra la resistencia a la tracción del acero que va a ser utilizado para la construcción de las bandejas que es el AISI 316 de cuyo rango se ha escogido el menor valor (460) y se ha transformado a  $\frac{lb}{pulg^2}$  por motivos de facilitar el cálculo.

Por otro lado el factor de seguridad ha sido tomado de ARCHILA Stella. Propuesta de diseño de un equipo de liofilización para el laboratorio de operaciones unitarias, 2002. Pp 49.

Ecuación 22

$$t_D = \frac{66718,4 \frac{lb}{pulg^2}}{1,8}$$

$$t_D = 37065,77 \frac{lb}{pulg^2}$$

Dónde:

$t_D$  = Esfuerzo de diseño (lb/pulg<sup>2</sup>)

$t_t$  = Resistencia a la tracción del acero AISI 316 (lb/pulg<sup>2</sup>)

$fs$  = Factor de seguridad.

Reemplazando en la ecuación 22 y despejando  $t$  se tiene:

$$t^2 = \frac{0,0074 \text{ psi} \times (15,75 \text{ pulg})^2}{37065,77 \text{ psi}}$$

$$t^2 = 0,0000495 \text{ pulg}^2$$

$$t = 0,0070 \text{ pulg} = 0,017 \text{ cm} \cong 0,02 \text{ cm}$$

Para una carga de 2 kg en bandejas de 0,35 m por 1,10 m, un espesor de 0,02 cm será suficiente, sin embargo por razones técnicas de soldadura y doblado se recomienda fijar el espesor de las placas de las bandejas en 1/16 de pulgada es decir 0,16 cm para evitar problemas al momento de construir las bandejas con láminas de acero.

- Volumen de las bandejas, Ecuación 23

$$Vb = V1 + V2 + V3$$

Dónde:

$Vb$  = Volumen de las bandejas (m<sup>3</sup>)

$V1$  = Volumen de la base de la bandeja (m<sup>3</sup>)

$V2$  = Volumen del pretil ancho de la bandeja (m<sup>3</sup>)

$V3$  = Volumen del pretil largo de la bandeja (m<sup>3</sup>)

Ecuación 24

$$V1 = ab \times lob \times eb$$

$$V1 = 0,35 \text{ m} \times 1,10 \text{ m} \times 0,0015875 \text{ m}$$

$$V1 = 0,000611 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V1 =$  Volumen de la base de la bandeja ( $m^3$ )

$ab =$  Ancho de la bandeja (m)

$lob =$  Longitud de la bandeja (m)

$eb =$  Espesor de la bandeja (m)

Ecuación 25

$$V2 = ab \times hb \times eb$$

$$V2 = 0,35 \text{ m} \times 0,03 \text{ m} \times 0,0015875 \text{ m}$$

$$V2 = 0,00001667 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V2 =$  Volumen del pretil ancho de la bandeja ( $m^3$ )

$ab =$  Ancho de la bandeja (m)

$hb =$  Altura de la bandeja (m)

$eb =$  Espesor de la bandeja (m)

Ecuación 26

$$V3 = lob \times hb \times eb$$

$$V3 = 1,10 \text{ m} \times 0,03 \text{ m} \times 0,0015875 \text{ m}$$

$$V3 = 0,0000523875 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V2 =$  Volumen del pretil largo de la bandeja ( $m^3$ )

$lob =$  Longitud de la bandeja (m)

$hb =$  Altura de la bandeja (m)

$eb =$  Espesor de la bandeja (m)

Reemplazando en la ecuación 26 se tiene que:

$$Vb = 0,000611 \text{ m}^3 + 0,00001667 \text{ m}^3 + 0,0000523875 \text{ m}^3$$

$$Vb = 0,0006800575 \text{ m}^3 = 680,0575 \text{ cm}^3$$

- Masa de las bandejas, Ecuación 27

$$\delta = \frac{Mb}{Vb}$$

$$Mb = \delta \times Vb$$

$$Mb = 8030 \frac{kg}{m^3} \times 0,0006800575 m^3$$

$$Mb = 5,46 \text{ kg}$$

Dónde:

$\delta$  = Densidad del acero AISI 316 (kg/m<sup>3</sup>) (ANEXO VII)

$Mb$  = Masa de la bandeja (kg)

$Vb$  = Volumen de la bandeja (m<sup>3</sup>)

- Longitud de la cámara, Ecuación 28

$$lc = lob + 0,10 lob$$

$$lc = 110 \text{ cm} + 0,10 (110 \text{ cm})$$

$$lc = 121 \text{ cm} = 1,21 \text{ m}$$

Dónde:

$lc$  = Longitud de la cámara (m)

$lob$  = Longitud de las bandejas (m)

- Área de la Cámara, Ecuación 29.

$$Ac = 2\pi \times rc \times lc + 2\pi \times rc^2$$

$$Ac = 2\pi \times 0,42 \text{ m} \times 1,21 \text{ m} + 2\pi (0,42 \text{ m})^2$$

$$Ac = 3,19 \text{ m}^2 + 1,1084 \text{ m}^2$$

$$Ac = 4,30 \text{ m}^2$$

Dónde:

$Ac$  = Área de la cámara (m<sup>2</sup>)

$rc$  = Radio de la cámara (m)

$lc$  = Longitud de la cámara (m)

- Volumen de la cámara, Ecuación 30

$$Vc = \pi \times rc^2 \times lc$$

$$Vc = \pi \times (0,42 \text{ m})^2 \times 1,20 \text{ m}$$

$$V_c = 0,665 \text{ m}^3$$

Dónde:

$V_c$  = Volumen de la cámara ( $\text{m}^3$ )

$r_c$  = Radio de la cámara (m)

$l_c$  = Longitud de la cámara (m)

- Longitud de los condensadores, Ecuación 31

$$l_{cd} = l_c - 0,5 \text{ m}$$

$$l_{cd} = 1,21 \text{ m} - 0,05 \text{ m}$$

$$l_{cd} = 1,16 \text{ m}$$

Dónde:

$l_{cd}$  = Longitud de los condensadores (m)

$l_c$  = Longitud de la cámara (m)

- Radio de la curvatura de los condensadores, Ecuación 32

$$r_{cc} = r_c - e_c$$

$$r_{cc} = 0,42 \text{ m} - 0,02 \text{ m}$$

$$r_{cc} = 0,40 \text{ m}$$

Dónde:

$r_{cc}$  = Radio de la curvatura de los condensadores (m)

$r_c$  = Radio de la cámara (m)

$e_c$  = Espacio entre la cámara (m)

- Longitud de la curvatura de los condensadores, Ecuación 33

$$l_{cc} = \frac{2}{4} \pi \times r_{cc}$$

$$l_{cc} = \frac{2}{4} \pi \times 0,40 \text{ m}$$

$$l_{cc} = 0,63 \text{ m}$$

Dónde:

$l_{cc}$  = Longitud de la curvatura de los condensadores (m)

$r_{cc}$  = Radio de la curvatura de los condensadores (m)

- Área de transferencia de calor, Ecuación 34

$$A_{tc} = l_{cd} \times l_{cc}$$

$$A_{tc} = 1,16 \text{ m} \times 0,63 \text{ m}$$

$$A_{tc} = 0,73 \text{ m}^2$$

Dónde:

$A_{tc}$  = Área de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ )

$l_{cd}$  = Longitud de los condensadores (m)

$l_{cc}$  = Longitud de la curvatura de los condensadores (m)

- Espesor del hielo formado sobre el condensador (para 12 kg de hielo), Ecuación 35.

$$e_{hc} = \frac{m \times A_{tc}}{\rho_{\text{Hielo}-70^\circ\text{C}}}$$

$$e_{hc} = \frac{12 \text{ kg} \times 0,73 \text{ m}^2}{924,2 \text{ kg/m}^3}$$

$$e_{hc} = 0,0095 \text{ m} = 0,95 \text{ cm}$$

Dónde:

$e_{hc}$  = Espesor del hielo formado sobre el condensador (cm)

$m$  = Masa del producto a procesar (kg)

$A_{tc}$  = Área de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ )

$\rho_{\text{Hielo}-70^\circ\text{C}}$  = Densidad del hielo a  $-70^\circ\text{C}$  ( $\text{kg/m}^3$ )

### 3.2 Cálculos de Ingeniería

Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de ingeniería fueron tomadas de ARCHILA Stella. Propuesta de diseño de un equipo de liofilización para el laboratorio de operaciones unitarias. Pp 58-82.

#### 3.2.1 Carga de Enfriamiento

- Calor cedido por el producto al enfriarse desde la temperatura de entrada a la temperatura de congelación (20 °C a -2,5 °C), Ecuación 36.

$$Q1 = m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q1 = 12 \text{ kg} \times 3,549 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times 22,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q1 = 958,23 \text{ kJ}$$

Dónde:

$Q1$  = Calor necesario para calentar el producto (kJ)

$m$  = Masa de producto a procesar (kg)

$Cp$  = Capacidad calorífica del producto sin congelar (kJ /kg °C) (ANEXO VII)

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas (°C)

- Calor cedido por el producto durante su solidificación, Ecuación 37

$$Q2 = m \times \lambda_{sol}$$

$$Q2 = 12 \text{ kg} \times 283 \text{ kJ/kg}$$

$$Q2 = 3396 \text{ kJ}$$

Dónde:

$Q2$  = Calor cedido por el producto durante su solidificación (kJ)

$\lambda_{sol}$  = Calor latente de solidificación del producto (kJ/kg)

- Calor cedido por el producto al enfriarse desde su temperatura de congelación hasta la temperatura final (-2,5 °C hasta -50°C), Ecuación 38

$$Q_3 = m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q_3 = 12 \text{ kg} \times 1,9631 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times (-2,5 - -50^\circ\text{C} )$$

$$Q_3 = 1118,967 \text{ kJ}$$

Dónde:

$Q_3$  = Calor cedido por el producto al enfriarse desde su temperatura de congelación hasta la temperatura final (Kcal)

$m$  = Masa de Producto a secar (kg)

$Cp$  = Capacidad calorífica del producto congelado (kcal / kg°C)

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas (°C)

- Calor Total a retirar del producto

$$Q_{\text{producto}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{\text{producto}} = 958,23 \text{ kJ} + 3396 \text{ kJ} + 1118,967 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{producto}} = 5473,197 \text{ kJ}$$

- Calor cedido por el aire presente en la cámara, Ecuación 40

$$Q_{\text{Aire}} = m_{\text{Aire}} (U_2 - U_1)$$

Dónde:

$Q_{\text{Aire}}$  = Calor cedido por el aire presente en la cámara (kJ)

$m_{\text{Aire}}$  = Masa de aire presente en la cámara (kg)

$U_1$  = Energía interna del aire a -50 °C (kJ/kg) (ANEXO IX)

$U_2$  = Energía interna del aire a 20 °C (kJ/kg) (ANEXO IX)

Ecuación 41.

$$m_{Aire} = \frac{V_c}{V_e}$$

Dónde:

$m_{Aire}$  = Masa de aire presente en la cámara (kg)

$V_c$  = Volumen de la cámara ( $m^3$ )

$V_e$  = Volumen específico del aire al iniciar el proceso ( $kg/m^3$ )

Ecuación 42.

$$V_e = \frac{RT}{P M_m}$$

$$V_e = \frac{8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \times 293,15 \text{ } ^\circ K}{83993,112 \text{ Pa } (0,02884 \text{ kg/mol})}$$

$$V_e = 1,006 \text{ m}^3/kg$$

Dónde:

$V_e$  = Volumen específico del aire al iniciar el proceso ( $kg/m^3$ )

$R$  = Constante universal de los gases ( $8,314 \text{ J/mol } ^\circ K$ )

$T$  = Temperatura inicial ( $^\circ K$ )

$P$  = Presión atmosférica ( $630 \text{ mmHg}$ ) (Pa)

$M_m$  = Masa molecular del aire ( $kg/mol$ )

Ecuación 43.

$$m_{Aire} = \frac{0,665 \text{ m}^3}{1,006 \text{ m}^3/kg}$$

$$m_{Aire} = 0,661 \text{ kg}$$

$$Q_{Aire} = 0,661 \text{ kg } (209,17 - 159,08) \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Aire} = 33,11 \text{ kJ}$$

- Calor cedido por las bandejas, Ecuación 44

$$Q_{bandeja} = Mb \times C_{p_b} \times \Delta T$$

$$Q_{bandeja} = 5,46 \text{ kg} \times 0,461 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ C} \times 20 - -50 \text{ } ^\circ C$$

$$Q_{bandejas} = 176,1942 \frac{kJ}{bandeja} \times 6 bandejas$$

$$Q_{bandejas} = 1057,1652 kJ$$

Dónde:

$Q_{bandeja}$  = Calor total cedido por las bandejas (kJ)

$M_b$  = Masa de la bandeja (kg)

$C_{p_b}$  = Capacidad calorífica del ACERO AISI 316 (kJ/kg °C) (ANEXO VII)

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas (°C)

- Calor cedido por las paredes del Liofilizador, Ecuación 45

$$Q_{paredes} = q \times A_c$$

$$Q_{paredes} = 8 \frac{W}{m^2} \times 4,30 m^2$$

$$Q_{paredes} = 34,4 \frac{J}{s} = 123,84 kJ/h$$

Dónde:

$Q_{paredes}$  = Calor cedido por las paredes del Liofilizador (kJ/h)

$q$  = Flujo de calor que atraviesa las paredes con aislamiento (W/m<sup>2</sup>)

$A_c$  = Área de la cámara de liofilización (m<sup>2</sup>)

- Calor Total Cedido, Ecuación 46

$$Q_{total} = Q_{producto} + Q_{aire} + Q_{bandejas} + Q_{paredes}$$

$$Q_{total} = 5473,197 kJ + 33,11 kJ + 1057,1652 kJ + 123,84 kJ$$

$$Q_{total} = 6687,3122 kJ$$

Dónde:

$Q_{total}$  = Calor total cedido (kJ)

$Q_{producto}$  = Calor total a retirar del producto (kJ)

$Q_{aire}$  = Calor cedido por el aire presente en la cámara (kJ)

$Q_{bandejas}$  = Calor cedido por las bandejas (kJ)

$Q_{paredes}$  = Calor cedido por las paredes del Liofilizador (kJ)

Asumiendo un tiempo de enfriamiento de una hora, tenemos la Ecuación 47.

$$Q_t = \frac{Q_{total}}{tiempo}$$

$$Q_t = \frac{6687,3122 \text{ kJ}}{1h}$$

$$Q_t = 1857,59 \text{ W}$$

Dónde:

$Q_t$  = Calor a retirar por unidad de tiempo (W)

$Q_{total}$  = Calor total cedido (kJ)

### 3.2.2 *Flujo másico del Refrigerante*, Ecuación 48

$$Q_t = M_{refrig} \times C_{p_{refrig}} \times \Delta T$$

Despejando la masa del refrigerante se tiene:

$$M_{refrig} = \frac{Q_t}{C_{p_{refrig}} \times \Delta T}$$

$$M_{refrig} = \frac{1857,59 \text{ J/s}}{926 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \times 228,15 - 223,15 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$M_{refrig} = 0,40 \text{ kg/s}$$

Dónde:

$M_{refrig}$  = Flujo másico del refrigerante (kg/s)

$Q_t$  = Calor a retirar en el proceso de congelamiento (W)

$C_{p_{refrig}}$  = Capacidad calorífica del refrigerante (J/kg °C) (ANEXO V)

$\Delta T$  = Diferencia entre la temperatura de entrada y salida del refrigerante (50°C-40°C)

### 3.2.3 *Potencia de las resistencias*, Ecuación 49

$$Q = M_{refrig} \times C_{p_{refrig}} \times \Delta T$$

$$Q = 0,40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 926 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 60 - (-50) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q = 40744 \text{ W} = 40,74 \text{ kW}$$

Dónde:

$Q$  = Potencia de las resistencias (kW)

$M_{refrig}$  = Flujo másico del refrigerante (kg/s)

$Cp_{refrig}$  = Capacidad calorífica del refrigerante (J/kg °C) (ANEXO V)

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas (°C)

### 3.2.4 Rata máxima de sublimación en el condensador, Ecuación 50

$$M_{max} = \frac{k (T_2 - T_1)}{\lambda x}$$
$$M_{max} = \frac{1,8137 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 273,15 - -296,15 \text{ } ^\circ K}{2843540 \frac{J}{kg} \times 0,005 m}$$

$$M_{max} = 0,073 \text{ kg / s m}^2$$

Dónde:

$M_{max}$  = Rata máxima de sublimación en el condensador (kg/sm<sup>2</sup>)

$k$  = Conductividad térmica de la mora de castilla (W/m°K) (ANEXO VIII)

$\lambda$  = Calor latente de sublimación (J/kg).

$T_2$  = Temperatura de la placa. (°K)

$T_1$  = Temperatura de sublimación (°K)

### 3.2.5 Flujo de Vapor en el condensador, Ecuación 51

$$M_s = M_{max} \times A_b \times n_b$$
$$M_s = 0,073 \frac{kg}{sm^2} \times 0,385 m^2 \times 6$$

$$M_s = 0,169 \text{ kg/s}$$

Dónde:

$M_s$  = Flujo de vapor en el condensador (kg/s)

$M_{max}$  = Rata máxima de sublimación en el condensador (kg/sm<sup>2</sup>)

$A_b$  = Área de las bandejas (m<sup>2</sup>)

$nb$  =Número de bandejas.

### 3.2.6 *Flujo de Calor que se debe evacuar de los serpentines del condensador*, Ecuación 52

$$Q_s = M_s \times \lambda$$

$$Q_s = 0,169 \frac{kg}{s} \times 2843540 \frac{J}{kg}$$

$$Q_s = 480558,36 J/s = 480,55 kJ/s$$

Dónde:

$Q_s$  = Flujo de calor que se debe evacuar de los serpentines del condensador (kJ/s)

$M_s$  = Flujo de vapor en el condensador (kg/s)

$\lambda$  = Calor latente de sublimación (J/kg)

### 3.2.7 *Cálculo de la eficiencia Térmica*, Ecuación 53

$$e = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c}$$

Dónde:

$e$  = Eficiencia térmica (%)

$Q_c$  =Calor que se absorbe (kJ)

$Q_f$  = Calor que se cede (kJ)

En nuestro caso  $Q_f$  corresponde al calor máximo que se debe ceder en el proceso, en este caso este calor corresponde al que deben proporcionar las resistencias y es de 40,74 kJ y  $Q_c$  será el calor que se absorbe o el calor total que es cedido.

Aplicando la ecuación se obtiene que:

$$e = \frac{6687,3122 kJ - 407,4 kJ}{6687,3122 kJ}$$

$$e = 0,94 \times 100\% = 94\%$$

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 Resultados del Dimensionamiento

**Tabla 2-3:** Resultados del Dimensionamiento de la cámara

<b>Cámara de Liofilización</b>			
<b>Cálculo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Diámetro Interno	dc	0,84	m
Diámetro externo	dec	0,847	m
Longitud	lc	1,21	m
Área	Ac	4,30	m <sup>2</sup>
Volumen	Vc	0,665	m <sup>3</sup>

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

**Tabla 3-3:** Resultados del dimensionamiento de las placas

<b>Placas Intercambiadoras</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Ancho	Apl	0,4	m
Longitud	Lpl	1,10	m

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

**Tabla 4-3:** Resultados del Dimensionamiento de las bandejas

<b>Bandejas</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Ancho	ab	0,35	m
Longitud	lob	1,10	m
Espesor	t	0,16	cm
Área	Ab	0,385	m <sup>2</sup>
Volumen	Vb	680,0575	cm <sup>3</sup>

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

**Tabla 5-3:** Resultados del dimensionamiento de los condensadores

<b>Bandejas</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Longitud	lcd	1,16	m
Radio de la curvatura	rcc	0,40	m
Longitud de la curvatura	lcc	0,63	m
Área de transferencia de calor	Atc	0,73	m <sup>2</sup>

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

### 3.3.2 Resultado de los cálculos de Ingeniería para el sistema de refrigeración y secado del Liofilizador

**Tabla 6-3:** Resultados de los cálculos para el sistema de refrigeración y calefacción.

<b>Cálculo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Calor a Retirar del producto por unidad de tiempo	Qt	1857,59	W
Flujo másico del refrigerante	Mrefrig	0,40	kg/s
Potencia de las resistencias	Q	40,74	kW
Flujo de calor que se debe evacuar de los serpentines del condensador	Qs	480,55	kJ/s
Eficiencia térmica	e	94	%

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

### 3.4 Presupuesto

En la siguiente tabla se muestra el requerimiento de presupuesto para la construcción del Liofilizador para mora de castilla.

**Tabla 7-3:** Requerimiento de presupuesto para la construcción del Liofilizador.

<b>Objeto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario (\$)</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Condensador de vapor	2	1200,00	2400,00
Intercambiador de calor de placas	7	160,00	1120,00
Cámara de Liofilización	1	20000,00	20000,00
Bandejas	6	70,00	420,00
Estructura	1	200,00	200,00
Termopares	12	40,00	440,00
Tablero de control	1	200,00	200,00
Bomba de vacío	1	1280,00	1280,00
<b>Valor total</b>			<b>\$ 26060,00</b>

Fuente: Ing: Marcelo Rochi, EQUIPOS Y PRUEBAS S.A.

### 3.5 Tasa Interna de Retorno

#### 3.5.1 Presupuesto de Egresos

Para el presupuesto de egresos se tomó en cuenta los factores enumerados en la siguiente tabla, tomando en cuenta la economía de nuestro país

**Tabla 8-3:** Egresos

<b>Concepto/años</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Costo de Producción	13485,21	14298,73	14773,45	15263,93	15770,69
Mano de obra directa	8496,00	8778,07	9069,50	9370,61	9681,71
Materia Prima	1857,23	1918,89	1982,60	2048,42	2116,43
Insumos	36,82	42,34	43,74	45,20	46,70
Servicios Básicos	2975,16	3421,43	3535,03	3652,39	3773,65
Mantenimiento					
Maquinaria	12000	138,00	142,58	147,32	152,21

Servicio de la Deuda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Intereses	0,00	0,00	0,00	0,00	
Depreciación	462,60	462,60	462,60	462,60	462,60
Amortización	754,00	754,00	754,00	754,00	754,00
<b>TOTAL</b>	<b>14701,81</b>	<b>15515,33</b>	<b>15990,05</b>	<b>16480,53</b>	<b>16987,29</b>

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

### 3.5.2 *Presupuesto de Ingresos*

Para el presupuesto de ingresos se tomó en cuenta que el valor del kilogramo de mora de castilla al primer año será de 15 dólares y aumentará en un valor de 0,50 centavos de dólar cada año, además el primer año la producción semanal de mora liofilizada será de 20 kg en el primer año, 28 kg en el segundo año, 40 kg en el tercer año, 48 kg en el cuarto año y 56 kg en el quinto año, con estos valores se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 9-3: Ingresos**

<b>PRODUCTO/AÑOS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Mora Liofilizada	14400,00	20832,00	30720,00	38016,00	45696,00

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

### 3.5.3 *Datos necesarios para el cálculo del TIR*

Para calcular el TIR se utilizaron los datos anteriormente mencionados de ingresos y egresos con los cual se obtuvo los siguientes resultados de flujo de caja.

**Tabla 10-3: Datos para el cálculo del TIR**

<b>Año</b>	<b>Cobros</b>	<b>Pagos</b>	<b>Flujo de caja</b>
0			- 26060
1	14400	14701,81	301,80
2	20832	15515,33	5316,70
3	30720	15990,05	14729,90
4	38016	16480,53	21535,50
5	45696	16987,29	45679,00

Realizado por: Gabriela Elizabeth Campos Mera

Con estos datos recurrimos a una calculadora electrónica del TIR y se obtuvo un valor de 34.06%

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Debido a la falta de disponibilidad de Liofilizadores y a la constante confusión de estos equipos con secadores al vacío no se pudo realizar la simulación del este proceso, sin embargo se pudo realizar un secado convencional de la mora de castilla en el laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH utilizando un secador de bandejas eléctrico, mediante este secado se obtuvieron datos como la humedad de la mora de castilla, y el tiempo de secado de la misma, sin embargo los mismos no fueron trascendentales para los cálculos de diseño, pues no se utilizan en las ecuaciones de dimensionamiento y requerimientos de calor y potencia del Liofilizador.

Para el diseño del Liofilizador primero se identificaron las variables críticas como son la temperatura y la presión, en cuanto a la temperatura el equipo debe alcanzar una temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  en la etapa de congelación y una de  $60^{\circ}\text{C}$  en la de sublimación, si estas temperaturas no se respetan se corre el riesgo de perder el lote de producto a procesar pues la liofilización del mismo no sucederá de manera apropiada, por esa razón las mismas deben ser cuidadosamente controladas. En relación a la presión el equipo debe alcanzar una presión de 0,01 mmHg ya que se sabe que la velocidad de secado pasa por un máximo a esta presión, la misma que deberá alcanzarse en 30 minutos en los cuales el producto no corre el riesgo de descongelarse.

Mediante el cálculo se determinó que el equipo que se diseñó para ser de tamaño mediano, debe tener una cámara de diámetro externo de 0,84 m y una longitud de 1,21 m, mientras que las bandejas serán de 0,35 m de ancho y 1,10 metros de largo y los condensadores tendrán una longitud de 1,16 con un radio y longitud de las curvaturas de 0,40 m y 0,63 m respectivamente. En los cálculos del requerimiento de calor se obtuvo que para alcanzar la temperatura de  $-50^{\circ}\text{C}$  en la etapa de congelación se debe retirar 6687,3122 kJ de calor, utilizando una potencia de 1857,59 W y un flujo de refrigerante de 0,40 kg/s, para la etapa de sublimación se debe alcanzar una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  para lo cual se necesitará una potencia de 40,74 kW, por otra parte se obtuvo que flujo de calor que se debe retirar de los serpentines del condensador es de 480,55 kJ/s. Se obtuvo además una eficiencia térmica del 94%, lo cual indica que el equipo tendrá mínimas pérdidas de calor debido a encontrarse aislado y trabajar al vacío.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó un Liofilizador para mora de castilla destinado a una producción mediana de mora liofilizada en la comunidad Corazón de Jesús de la parroquia Punin , para lo cual se realizaron cálculos tanto de dimensionamiento como de requerimientos de temperatura, presión y energía para equipo.
- Se pudo simular la operación de secado de la mora de castilla en el laboratorio, en el cual se obtuvo que la humedad inicial de la mora de castilla es de 6,35 kg agua/ kg sólido seco y la de equilibrio es de 0,095 kg agua/ kg sólido seco , además se observó una velocidad de secado constante de 1,21 kg agua/m<sup>2</sup>h y el tiempo total de secado fue de 6,51 horas.
- Las variables críticas en la Liofilización son la temperatura y la presión. En la primera etapa de la liofilización que es la congelación se determinó que se debe alcanzar una temperatura de -50°C y en la etapa de sublimación se deberá tener una temperatura máxima de 60°C estas temperaturas deberán ser controladas, especialmente la de calefacción para evitar la fusión del hielo formado durante el enfriamiento de la mora de castilla. La presión a la cual se va a trabajar es 0,01 mmHg ya que se sabe que la velocidad de secado en función de la presión pasa por un máximo a una presión comprendida generalmente entre 0,01 a 1 mmHg, esta presión deberá obtenerse en máximo 30 minutos en los cuales el producto no corre el riesgo de descongelarse.
- El Liofilizador está diseñado para procesar 12 kg de mora de castilla, y constará de una cámara de secado de diámetro externo de 0,84 m y una longitud de 1,21 m, mientras que las bandejas serán de 0,35 m de ancho y 1,10 m de largo y los condensadores tendrán una longitud de 1,16 m con un radio y longitud de las curvaturas de 0,40 m y 0,63 m respectivamente. Además para que en la cámara de secado se alcance la temperatura de -50°C requerida en la etapa de congelación se debe retirar del alimento 6687,3122 kJ de calor, utilizando una potencia de 1857,59 W y un flujo de refrigerante de 0,40 kg/s, y para la etapa de sublimación del hielo en la cual se debe alcanzar una temperatura de 60 °C se necesitará una potencia de 40,74 kW, el flujo de calor que se debe retirar de los serpentines del condensador es de 480,55 kJ/s.

## RECOMENDACIONES

- Es importante no sobrepasar la carga que se va procesar en el Liofilizador para evitar daños en el sistema de refrigeración, calefacción y vacío del mismo, así como también el desgaste del material con el que está elaborado el equipo.
- Debido a que los cálculos fueron realizados para liofilizar mora de castilla de un espesor de 0,005 m se recomienda respetar este espesor al momento de colocar el producto, de lo contrario la Liofilización no se producirá de manera adecuada y se correrá el riesgo de sobrecalentar el equipo y, con el tiempo, dañarlo.
- Implementar el diseño propuesto.
- Al operar el equipo no se debe sobrepasar los rangos de temperatura propuestos para evitar así la pérdida de lote del producto por fusión del mismo.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

**1. ARCHILA Stella.** *Propuesta de diseño de un equipo de liofilización para el laboratorio de operaciones unitarias.* (TESIS) (Pregrado) (Ingeniero de Producción Agroindustrial). Universidad de la Sabana. Facultad de Ingeniería. Escuela de Producción agroindustrial. Santa Fé de Bogotá- Colombia. 2002. Pp 36-82.

**2. BADGER y BANCHERO.** *Introducción a la Ingeniería Química.* 2da Edición. México DF- México. Editorial MC Graw Hill. 1980. Pp 484,485,504-520.

**3. BARBOSA G.** *Deshidratación de Alimentos.* Zaragoza-España. 2000. Editorial Acribia. Pp 15-24.

**4. BARRERA M.** *Cámaras Frigoríficas.* Barcelona- España. 1996. Editorial Ceac. Pp 120-126.

**5. CULTIVO DE MORA [Consulta: 2015, 04, 12]**

Disponible en: [http://www.infoagro.com/documentos/el\\_cultivo\\_mora\\_\\_parte\\_i\\_.asp](http://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_mora__parte_i_.asp)

**6. EL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN [Consulta: 2015, 04, 16]**

Disponible en: <http://es.slideshare.net/meryfernandezromero/equipo-de-liofilizacion>

**7. ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE LA PULPA DE MORA SOMETIDA A UN PROCESO DE LIOFILIZACIÓN [Consulta: 2015, 04, 19]**

Disponible en:

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8936/1/Estudio%20de%20Factibilidad%20de%20la%20Pulpa%20de%20mora.pdf>

**8. EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN [Consulta: 2015, 04, 16]**

Disponible en: <http://es.slideshare.net/meryfernandezromero/equipo-de-liofilizacion>

**9. EUGENE F.** *Manual de Recipientes a Presión Diseño y Cálculo.* México DF- México. Editorial Limusa. 1992. Pp 178-189.

**10. LA MORA DE CASTILLA [Consulta: 2015, 04, 16]**

Disponible en:

<http://balcon.magap.gob.ec/mag01/magapaldia/HOMBRO%20A%20HOMBRO/manuales/Manual%20El%20cultivo%20de%20la%20mora.pdf>

**11. LIOFILIZACIÓN [Consulta: 2015, 04, 16]**

Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Liofilizaci%C3%B3n>

**12. LIOFILIZACIÓN DE ALIMENTOS [Consulta: 2015, 04, 16]**

Disponible en:

[http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/sectores/tecnologia/ficha\\_03\\_liofilizados.pdf](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/sectores/tecnologia/ficha_03_liofilizados.pdf)

**13. MARTÍNEZ R y PRADA O.** *Diseño y Construcción de un Liofilizador Piloto para el estudio de procesos de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío.* (En línea) (TESIS) (Pregrado) (Ingeniero Mecánico). [Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga-Colombia. 2008. Pp 1-10, 35,36.] [Consulta: 2015, 04,16]. Disponible en: <<http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/5067/1/130033.pdf>>

**14. McCABE Y SMITH.** *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* 6ta Edición. México DF- México. Editorial MC Graw Hill. 2002. Pp 835-861.

**15. MOOS, A y NONHEBEL G.** *El secado de sólidos en la industria química.* Madrid-España. Editorial Reverté S.A. 1979. Pp 1-25, 327-332.

**16. MORA DE CASTILLA [Consulta: 2015, 04, 12]**

Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Rubus\\_glaucus](http://es.wikipedia.org/wiki/Rubus_glaucus)

**17. PERFIL DE MORA [Consulta: 2015, 04, 12]**

Disponible en: <http://www.pucesi.edu.ec/pdf/mora.pdf>

**18. PRODUCCIÓN DE MORA DE CASTILLA [Consulta: 2015, 04, 12]**

Disponible en: <http://www.angelfire.com/ia2/ingenieriaagricola/mora.htm>

**19. PRODUCCIÓN DE MORA DE CASTILLA [Consulta: 2015, 04, 12]**

Disponible en: <http://asoideasdetoledo.blogspot.com/2010/11/taxonomia.html>

**20. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS, TÉRMICAS Y REOLÓGICAS DE CROMOGENADOS DE FRUTAS TROPICALES [Consulta: 2015, 04, 16]**

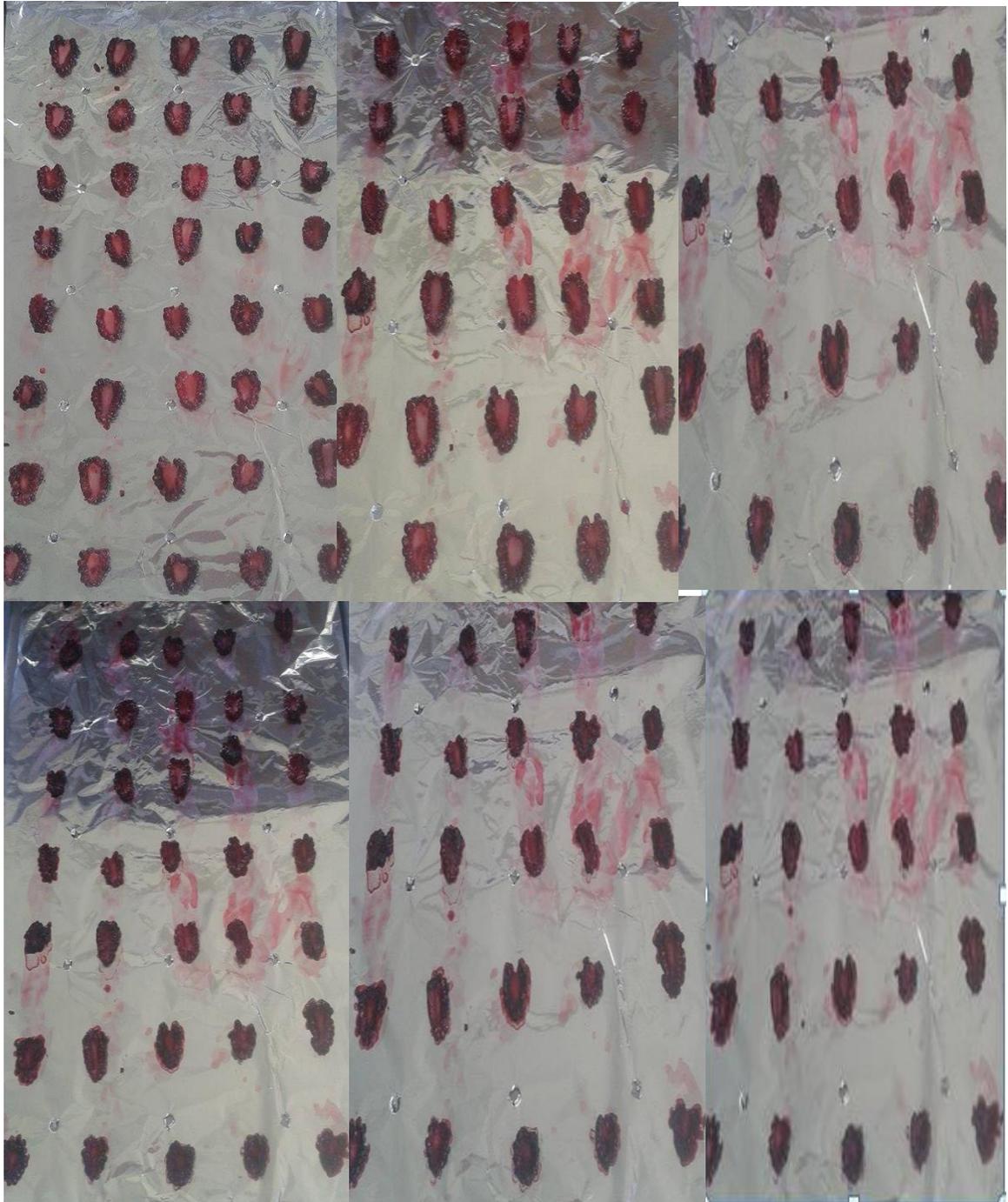
Disponible en:

[http://www.acyja.com/documentos/Comunicaciones\\_Congresos/2011/PA%20054.pdf](http://www.acyja.com/documentos/Comunicaciones_Congresos/2011/PA%20054.pdf)

**21. RODRIGUEZ D y GONZÁLEZ A. *Desarrollo, generación, adaptación e innovación de tecnología. Diseño y cálculo de un liofilizador discontinuo.* Bogotá- Colombia. 1990. Pp 90-**

13

**ANEXO A. VARIACIÓN DEL ASPECTO DE LA MORA DE CASTILLA A LO LARGO DEL SECADO**



## ANEXO B. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS AISLANTES

Material	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad [W/(mK)]
Poliestireno expandido	De 10 a 12	0.047
	De 12 a 15	0.044
	De 15 a 20	0.038
	De 20 a 25	0.035
	De 25 a 40	0.033
Poliestireno extruído	De 25 a 30	0.034
	De 30 a 50	0.027
Poliuretano	De 28 a 32	0.023
	De 32 a 40	0.020
	De 40 a 80	0.017
Espumas fenólicas	De 28 a 32	0.038
	De 32 a 40	0.035
	De 40 a 80	0.037
Corcho	De 90 a 110	0.043
	De 110 a 150	0.037
Fibra de vidrio	De 13 a 20	0.048
	De 20 a 50	0.037
	De 50 a 100	0.036
Vidrio celular	De 100 a 140	0.049
	De 140 a 200	0.050

## ANEXO C. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL POLIURETANO

Característica		Densidad Kg/m <sup>3</sup>	28-32	32-40	40-80
Conductividad		Kcal / (h.m.°C)	0.020	0.017	0.017
Resistencia compresión	Esfuerzo	Kg/cm <sup>2</sup>	1.1	1.6	5
	Deformación	%	8.2	6.7	4.5
Permeabilidad		(g.cm)/(m <sup>2</sup> .día.mmHg)	8	4.4	1.8

Fuente: ARCILLA, 2002.

**ANEXO D. ESPESOR DEL AISLANTE**

Material	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad [W/(mK)]	Espesor (cm)	
			6 W/m <sup>2</sup>	8 W/m <sup>2</sup>
<b>Poliestireno expandido</b>	De 10 a 12	0.047	157.503	88.587
	De 12 a 15	0.044	136.805	78.627
	De 15 a 20	0.038	102.010	61.145
	De 20 a 25	0.035	87.437	53.490
	De 25 a 40	0.033	78.627	48.747
<b>Poliestireno extruido</b>	De 25 a 30	0.034	82.946	51.084
	De 30 a 50	0.027	55.967	36.074
<b>Poliuretano</b>	De 28 a 32	0.023	43.553	28.780
	De 32 a 40	0.02	35.433	23.843
	De 40 a 80	0.017	28.210	19.320
<b>Espumas fenólicas</b>	De 28 a 32	0.038	102.010	61.145
	De 32 a 40	0.035	87.437	53.490
	De 40 a 80	0.037	96.961	58.518
<b>Corcho</b>	De 90 a 110	0.043	130.426	75.496
	De 110 a 150	0.037	96.961	58.518
<b>Fibra de vidrio</b>	De 13 a 20	0.048	164.959	92.106
	De 20 a 50	0.037	96.961	58.518
	De 50 a 100	0.036	92.106	55.967
<b>Vidrio celular</b>	De 100 a 140	0.049	172.711	95.730
	De 140 a 200	0.05	180.771	99.461

Fuente: RODRÍGUEZ, 1990.

## ANEXO E. PROPIEDADES DEL TRICLOROETILENO

Peso Molecular	131.4	
Punto de ebullición	87.0°C (188.6°F)	
Punto de Congelación	-86.4°C (-123.5°F)	
Gravedad específica, 25/25°C	1.456	
Libras por galón a 25°C	12.2	
Densidad del vapor (aire = 1)	4.53	
Calor específico	0.225 cal/g°C 926 J/Kg °K	
Calor de vaporización BTU/lb	103	
Calor de vaporización cal/g	57.2	
Coefficiente de expansión cúbica	0.00117	
Viscosidad a 25°C centipoises	0.58	
Tensión superficial dinas/cm 20°C	31.6	
Punto inicio saturación	100 ppm	
Máxima concentración permitida	100 ppm	
Parámetro crítico	Pc = 5.02Mpa, a 271°C	
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	1585.7 a -50°C 1464 a 20°C 1395 a 60°C 1325 a 100°C	
Coefficiente de expansión volumétrica	0.00117°C <sup>-1</sup> entre 0 y -40°C	
Conductividad Térmica W/m <sup>2</sup> K	-40°C	0.142
	20°C	0.138
	80°C	0.0099
	140°C	0.071

Fuente: RODRÍGUEZ, 1990.

**ANEXO F. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316**

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>	<b>AISI 316</b>
Límite de Fluencia (Kg/mm <sup>2</sup> )	29
Resistencia a la tracción (MPa)	460-860
Resistencia última (Kg/mm <sup>2</sup> )	58
Dureza Brinell	160-190
Módulo de elasticidad (GPa)	190-210
Porcentaje de alargamiento en 2"	50

Fuente: RODRÍGUEZ, 1990.

**ANEXO G. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316**

<b>PROPIEDADES TÉRMICAS</b>	<b>AISI 316</b>
Densidad	8.03g/cm <sup>3</sup> (0°C)
Conductividad térmica	13.8 W/m.K (0°C)
Calor específico	0.461KJ/ Kg.K (0°C)

Fuente: RODRÍGUEZ, 1990.

## ANEXO H. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MORA

Propiedades	Valor
Calor específico del producto antes de congelar ( $Cp_{nocong}$ )	3,549 KJ/Kg°C
Calor específico del producto congelado ( $Cp_{hielo}$ )	1,9631 KJ/Kg°C
Densidad ( $\rho$ )	997,66 Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica (k)	1,8137 W/m°K

Fuente: RODRÍGUEZ, 1990.

## ANEXO I. PROPIEDADES DEL AIRE

Tabla A.5. Propiedades de gas ideal del aire											
(T, K; h y u, kJ/kg; s°, kJ/kg · K; el estado estándar es 1 atm)											
T	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	s°	T	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	s°
200	199,97	0,3363	142,56	1,707,0	1,29559	460	462,02	6,245	329,97	211,4	2,13407
210	209,97	0,3987	149,69	1,512,0	1,34444	470	472,24	6,742	337,32	200,1	2,15604
220	219,97	0,4690	156,82	1,346,0	1,39105	480	482,49	7,268	344,70	189,5	2,17760
230	230,02	0,5477	164,00	1,205,0	1,43557	490	492,74	7,824	352,08	179,7	2,19876
240	240,02	0,6355	171,13	1,084,0	1,47824	500	503,02	8,411	359,49	170,6	2,21952
250	250,05	0,7329	178,28	979,0	1,51917	510	513,32	9,031	366,92	162,1	2,23993
260	260,09	0,8405	185,45	887,8	1,55848	520	523,63	9,684	374,36	154,1	2,25997
270	270,11	0,9590	192,60	808,0	1,59634	530	533,98	10,37	381,84	146,7	2,27967
280	280,13	1,0889	199,75	738,0	1,63279	540	544,35	11,10	389,34	139,7	2,29906
285	285,14	1,1584	203,33	706,1	1,65055	550	554,74	11,86	396,86	133,1	2,31809
290	290,16	1,2311	206,91	676,1	1,66802	560	565,17	12,66	404,42	127,0	2,33685
295	295,17	1,0368	210,49	647,9	1,68515	570	575,59	13,50	411,97	121,2	2,35531
300	300,19	1,3860	214,07	621,2	1,70203	580	586,04	14,38	419,55	115,7	2,37348
305	305,22	1,4686	217,67	596,0	1,71865	590	596,52	15,31	427,15	110,6	2,39140
310	310,24	1,5546	221,25	572,3	1,73498	600	607,02	16,28	434,78	105,8	2,40902
315	315,27	1,6442	224,85	549,8	1,75106	610	617,53	17,30	442,42	101,2	2,42644

Fuente: VITERI P., 2009.





ANEXO L. VISTAS DEL LIOFILIZADOR

