



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA EL SECADO DE
LA REMOLACHA AZUCARERA (*Beta vulgaris var. saccharifera*)”**

TESIS DE GRADO

**Previo a la Obtención del Título de
INGENIERO QUÍMICO**

FLORES FIALLOS LINDA MARIUXI

NUÑEZ ZUMBANA DIEGO ESTEBAN

**RIOBAMBA-ECUADOR
2014**

AGRADECIMIENTO

La presente tesis queremos agradecer en primer lugar a Dios por brindarnos el suficiente intelecto para permitirnos llegar a este punto importante en nuestras vidas, por concedernos salud, conciencia para distinguir lo bueno de lo malo y aprender de los errores.

Agradecemos a nuestras familias por haber depositado su confianza en nosotros, que con cuyos consejos y enseñanzas nos demostraron que nada en la vida es fácil, todo se alcanza con perseverancia y sobretodo con humildad.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Química, y a los grandes maestros que la conforman en particular al Ing. Mario Villacrés e Ing. Hanníbal Brito, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su filosofía y su estimulación han logrado en nosotros que podamos terminar nuestros estudios con éxito.

A todos muchas gracias, pues en el momento en que las palabras necesarias pueden expresar lo que el alma desea, rebasan un tomo, simplemente queda decir aquello que por su significado extenso y sin límite es, GRACIAS.

DEDICATORIA.

*Yo, **Linda Mariuxi Flores Fiallos** dedico primeramente a Dios por brindarme la inteligencia necesaria para terminar una meta más en mi vida, por la salud. A mis padres **Juan Eduardo y Marcia Lucia** por su apoyo y amor incondicional, por creer en mí, a quienes debo mi triunfo profesional. A mis hermanos **Sebitas y Juan José** por su apoyo y cariño absoluto, al mejor amigo del hombre **Tomas Alejandro** por pasar conmigo en mis noches de desvelo.*

*Yo, **Diego Esteban Núñez Zumbana** dedico el presente proyecto a mis padres **Juan y Amparito** por el apoyo que he recibido durante todos los años de carrera al igual que a mis hermanos **David y Miguel** que han estado junto a mí en los momentos que más los he necesitado y a **Mayra** que ha estado conmigo brindándome su apoyo incondicional.*

NOMBRE

FECHA

FIRMA

Dr. Silvio Alvares Luna
**DECANO DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS.**

.....

.....

Ing. Mario Villacrés
**DIRECTOR DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA QUÍMICA**

.....

.....

Ing. Mario Villacrés
DIRECTOR DE TESIS

.....

.....

Ing. Hanníbal Brito
ASCESOR DE TESIS

.....

.....

Ing. José Usiña
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

.....

.....

Sr. Carlos Rodríguez
**DIRECTOR DEL CENTRO
DE DOCUMENTACIÓN.**

.....

.....

“Nosotros **LINDA MARIUXI FLORES FIALLOS** y **DIEGO ESTEBAN NUÑEZ ZUMBANA**” autores y ejecutores de la presente tesis nos responsabilizamos de las ideas, pensamientos y resultados expuestos en la presente investigación, siendo la ESPOCH la dueña intelectual de la misma.

Linda M. Flores

Diego E. Núñez

INDICE DE ABREVIATURAS

X_i	Contenido de humedad inicial (kg sólido seco/kg sólido seco)
X_c	Humedad crítica (kg sólido seco/kg sólido seco)
Kg	Kilogramos
p_v	Presión de vapor (PSI)
φ	Humedad relativa (kg sólido seco/kg sólido seco)
W_c	Velocidad constante (kg/hm ²)
p_{vs}	Presión de vapor saturado (PSI)
S	Peso del sólido seco (kg)
A	Área de secado (m ²)
θ_a	Tiempo de secado anticrítico (h)
$-\frac{dx}{d\theta}$	Coefficiente diferencial
T	Temperatura (°C)
m	Metros
°C	Grados centígrados
mbar	Milibar
s	Segundo
%	Por ciento
Hp	Horsepower
q	Flujo de calor (Kcal)
at	Atmosfera
W	Watts
m ²	Metros cuadrados
°K	Grados Kelvin
T_e	Temperatura externa del gas (°C)
T_s	Temperatura del sólido seco (°C)
h	Coefficiente externo de transferencia de calor(Kcal/s)
N_A	Flujo específico del vapor de agua (m ³ /h)
P_{sw}	Presión parcial del vapor de agua en la superficie (PSI)
P_{ew}	Presión parcial del vapor de agua en la fase total externa del gas (PSI)

D'	Difusividad en la capa seca (m^2/s)
P_{fw}	Presión parcial del vapor de agua en el equilibrio con el plano congelado de sublimación (PSI)
ΔH_s	Calor latente de sublimación del hielo (Kcal)
J	Joules
θ	Velocidad de congelación (m/s)
T_0	Temperatura inicial de congelación ($^{\circ}C$)
T_f	Temperatura final de congelación ($^{\circ}C$)
Δ_t	Variación de tiempo (s)
ε	Porosidad de la remolacha
ρ_a	Densidad aparente (kg/m^3)
ρ_r	Densidad real (kg/m^3)
m^3	Metros cúbicos
x	Grosor del alimento (mm)
ρ	Densidad másica del alimento deshidratado (kg/m^3)
M_1	Contenido de agua inicial (kg agua)
M_2	Contenido de agua final (kg agua)
θ_s	Temperatura de la superficie del alimento ($^{\circ}C$)
U	Factor de transmisión de calor (Kcal)
D	Diferencia de temperatura entre los dos lados de la pared ($^{\circ}C$)
BTU	British Thermal Unit
$^{\circ}F$	Grados Fahrenheit
g	Gramos
mg	Miligramos

TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pp
CARÁTULA	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
HOJA DE FIRMAS	
HOJA DE RESPONSABILIDAD	
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	
TABLA DE CONTENIDOS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE GRÁFICOS	
INDICE DE ECUACIONES	
ÍNDICE DE ANEXOS	
RESUMEN.....	i
SUMARY.....	iii
INTRUDUCCIÓN.....	iv
ANTECEDENTES.....	v
JUSTIFICACIÓN.....	vii
OBJETIVOS.....	viii

CONTENIDO

Pp

CAPITULO I

1	MARCO TEÓRICO	1
1.1	REMOLACHA	1
1.1.1	<i>Origen.</i>	1
1.1.2	<i>Generalidades.</i>	1
1.1.3	<i>Taxonomía y Morfología.</i>	1
1.1.4	<i>Características.</i>	2
1.1.5	<i>Importancia económica y distribución geográfica.</i>	2
1.1.6	<i>Composición nutricional.</i>	2
1.1.7	<i>Contenido nutricional en la raíz.</i>	3
1.1.8	<i>Propiedades.</i> Dentro de las propiedades más importantes se tiene:	3
1.1.9	<i>Formación de azúcar en la remolacha.</i>	4
1.1.10	<i>Usos de la remolacha azucarera</i>	4
1.1.11	<i>Uso alimenticio</i>	5
1.1.12	<i>En relación con la salud.</i>	5
1.2	SECADO	6
1.2.1	<i>Generalidades.</i>	6
1.2.2	<i>Definición</i>	6
1.2.3	<i>Factores que intervienen en el proceso de secado.</i>	6
1.2.4	<i>Etapas del secado</i>	7
1.2.5	<i>Principios básicos del secado.</i>	8
1.2.6	<i>Parámetros básicos de secado.</i>	8
1.2.7	<i>Factores que intervienen en el proceso de secado.</i>	9
1.2.8	<i>Humedad.</i>	9
1.2.9	<i>Temperatura de bulbo seco.</i>	11
1.2.10	<i>Temperatura bulbo húmedo.</i>	11
1.2.11	<i>Entalpía.</i>	11
1.2.12	<i>Presión de vapor</i>	11
1.2.13	<i>Carta psicrométrica</i>	12

CONTENIDO		Pp
1.2.14	<i>Volumen específico</i>	13
1.2.15	<i>Comportamiento general del secado</i>	13
1.2.16	<i>Cinética del secado.</i>	13
1.2.17	<i>Curvas típicas de secado</i>	14
1.2.18	<i>Clases de materiales según su comportamiento en el secado</i>	19
1.2.19	<i>Transmisión de calor en los secadores</i>	20
1.2.20	<i>Clasificación de los aparatos de secado.</i>	20
1.2.21	<i>Tratamiento de sólidos en secadores.</i>	20
1.2.22	<i>Aparatos continuos y discontinuos.</i>	22
1.2.23	<i>Tipo de secadores</i>	22
1.3	LIOFILIZACIÓN	23
1.3.1	<i>Historia.</i>	23
1.3.2	<i>Generalidades.</i>	23
1.3.3	<i>Secado por liofilización.</i>	23
1.3.4	<i>Fundamentos de la liofilización</i>	24
1.3.5	<i>Ventajas de la liofilización</i>	25
1.3.6	<i>Fases del secado por sublimación</i>	26
1.3.7	<i>Procesos relacionados con la liofilización</i>	31
1.3.8	<i>Componentes principales del equipo liofilizador</i>	31
1.3.9	<i>Material auxiliar.</i>	32
1.3.10	<i>Termodinamica del proceso de liofilizacion.</i>	33
1.4	DISEÑO DE INGENIERÍA.	33
1.4.1	<i>Material de construcción</i>	34
1.4.2	<i>Formas de la cámara.</i>	35
1.4.3	<i>Tamaño de la Cámara.</i>	35
1.4.4	<i>Forma y espesor de la tapa de la cámara.</i>	36
1.4.5	<i>Aislamiento de la cámara.</i>	36
1.4.6	<i>Presión de trabajo.</i>	37
1.4.7	<i>Volumen de la cámara.</i>	37
1.4.8	<i>Bomba al vacío.</i>	37

CONTENIDO		Pp
1.4.9	<i>Manto eléctrico</i>	38
1.5	<i>PARÁMETROS DE VALORACIÓN</i>	38
CAPITULO II		
2	PARTE EXPERIMENTAL	41
2.1	<i>Simulación del proceso de secado por liofilización para la remolacha azucarera (Beta vulgaris var. saccharifera)</i>	41
2.2	<i>Datos experimentales obtenidos para el simulador de secado</i>	44
2.3	<i>Identificación de las variables de proceso</i>	49
CAPITULO III		
3	CÁLCULOS Y RESULTADOS	51
3.1	<i>Cálculos</i>	51
3.1.1	<i>Dimensionamiento y carga</i>	51
3.1.2	<i>Cálculos de Ingeniería</i>	53
3.2	<i>Resultados</i>	64
CAPITULO IV		
4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
CAPITULO V		
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
5.1	<i>Conclusiones</i>	72
5.2	<i>Recomendaciones</i>	73

INDICE DE FIGURAS

Pp

FIGURA

1.2.13-1. Carta psicométrica.....	12
1.2.17-1. Curva típica de secado.....	14
1.3.4-1. Diagrama presión-temperatura del agua.....	24
1.3.6-2. Secado por liofilización.....	26
1.3.6-2. Secado por sublimación.....	27
1.3.6-3. Mecanismo de secado durante la Liofilización.....	29
1.3.6-4. Desorción y Sublimación.....	30
1.3.8-1. Equipo de liofilización.....	31
1.3.10-1. Ciclo de la liofilización.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Pp

TABLA

2.2-1. Datos experimentales obtenidos del simulador (tiempo y peso).....	44
2.2-2. Datos experimentales obtenidos del simulador (tiempo y humedad).....	45
2.2-3. Datos experimentales obtenidos en el simulador (Velocidad de secado).....	47
3.2-1 Datos experimentales de Humedad obtenidos en el liofilizador.....	64
3.2-2. Datos experimentales de velocidad de secado obtenidos en el liofilizador.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

Pp

CUADROS

1.1.3-1. Taxonomía de la remolacha azucarera.....	1
1.1.6-1. Contenido Nutritivo de la Remolacha Azucarera.....	3
1.1.7-1. Contenido nutricional en la raíz de la Remolacha.....	3
1.2.24-1. Tipo de secadores.....	22
1.5-1. Parámetros de Valoración.....	38
2.1-1. Composición nutricional por cada 100g de remolacha.....	41
2.1-2. Contenido nutricional remolacha deshidratada.....	42
2.1-3. Determinación de la Humedad contenida en la remolacha.....	43
2.3-1. Datos obtenidos del simulador, comportamiento del secado método gráfico.....	49
2.3-2. Datos obtenidos del simulador, comportamiento del secado método analítico.....	49
3.1-1. Parámetros de dimensionamiento de la cámara cilíndrica.....	53
3.2-1 Condiciones de trabajo del Liofilizador.....	67
3.2-2 Resultado de los cálculos de diseño del Liofilizador.....	67

INDICE DE GRÁFICOS

Pp:

GRÁFICO

2.2-1. Humedad de la remolacha azucarera.....	46
2.2-2 Velocidad de secado de la remolacha.....	48
3.2-1 Curva de Humedad obtenido en el liofilizador (Toma de datos cada 15 min).....	66
3.2-2 Velocidad de secado obtenido en el liofilizador (Toma de datos cada 15 min).....	66

INDICE DE ECUACIONES

Pp

ECUACIÓN

1.2.8-1. Contenido de humedad en base seca.....	9
1.2.8-2. Contenido de humedad en base humedad.....	10
1.2.16-1. Cinética de secado.....	13
1.2.16-2. Periodo constante o anticrítico (Para calcular la velocidad constante).....	15
1.2.16-3. Tiempo de secado en condiciones constantes.....	16
1.2.16-4. Periodo poscrítico o decreciente.....	16
1.2.16-5. Tiempo total de secado.....	17
1.2.16-6. Velocidad decreciente de secado.....	17
1.2.16-7. Velocidad total de secado.....	17
1.2.16-8. Tiempo de secado en el periodo poscrítico método analítico.....	18
3.1.1-1. Altura de la estantería.....	51
3.1.1-2. Área de la bandeja del liofilizador.....	52
3.1.1-3. Volumen de la cámara del liofilizador.....	53
3.1.2-1. Calor necesario para calentar la base seca.....	56
3.1.2-2. Calor cedido por el producto a enfriar desde su entrada al congelador.....	56
3.1.2-3. Calor cedido por el producto durante la congelación.....	57
3.1.2-4. Calor a retirar del producto.....	57
3.1.2-5. Calor cedido por el aire presente en la cámara de liofilización.....	57
3.1.2-6. Entalpía en función de la energía interna.....	58
3.1.2-7. Masa del aire.....	58
3.1.2-8. Volumen específico del aire.....	59

3.1.2-9. Calor cedido por las paredes del liofilizador.....	60
3.1.2-10. Calor cedido por las bandejas.....	60
3.1.2-11. Calor total cedido.....	61
3.1.2-12. Coeficiente global de transferencia de Energía en el liofilizador.....	61
3.1.2-13. Potencia de la bomba.....	62
3.1.2-14. Eficiencia de la bomba al vacío.....	62
3.1.2-15. Eficiencia del liofilizador.....	63

INDICE DE ANEXOS

Pp

ANEXO

I. Simulación secador de bandejas.....	81
II. Producto seco en el secador de bandejas.....	82
III. Tablas propiedades del aire.....	83
IV. Condiciones de trabajo para el secador de bandejas.....	84
V. Propiedades del aire.....	85
VI. Propiedades del acero.....	86
VII. Diseño del liofilizador.....	87
VIII. Diseño del liofilizador.....	88
IX. Planos del liofilizador vista en planta.....	89
X. Planos del liofilizador vista lateral.....	90
XI. Planos del liofilizador vista frontal.....	91
XII. Validación del liofilizador.....	92
XIII. Producto antes y después de la liofilización.....	93
XIV. Análisis Bromatológicos de la remolacha secada en el secador de bandejas.....	94
XV. Análisis Bromatológicos de la remolacha secada en el liofilizador.....	95

RESUMEN

La investigación para el diseño y construcción de un Liofilizador para el secado de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* var. *Saccharifera*), fue realizada en el laboratorio de OPERACIONES INDUSTRIALES ubicado en la Escuela de Ingeniería Química, Facultad Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Con el fin de secado del material se empleó procesos físicos y químicos; los métodos utilizados fueron el método inductivo donde se recolectó la remolacha de los diferentes mercados de la ciudad. Y el método deductivo partiendo de fundamentos y cálculos para el diseño, construcción y validación del equipo. Se realizó una simulación del proceso de secado, misma que fue realizada en un secador de bandejas en el laboratorio anteriormente mencionado, donde se obtuvieron los valores que sirvieron de referencia para el diseño y construcción del Liofilizador. El equipo diseñado y construido consta de materiales resistentes a las condiciones que requiere para su funcionamiento: acero inoxidable AISI 304 Y 316 cortadas y soldadas según el diseño, un cuerpo cilíndrico con un cierre hermético de 49 cm de largo, de diámetro externo de 38,5 cm, diámetro interno de 29,5 cm, en su interior posee 3 bandejas perforadas, una bandeja pequeña de 643 cm² y dos bandejas grandes de 1026 cm², un manto eléctrico que permite el intercambio de calor de 1100 watts y 110 voltios, para obtener el vacío óptimo se emplea un motor de 110 voltios para poner en funcionamiento un termostato y la bomba de vacío de $\frac{1}{2}$ hp y 110 voltios. El equipo posee los respectivos indicadores de presión y temperatura.

El Liofilizador opera a una temperatura de 60⁰C, una carga de 5 Kg, presión de -0,6 psi, con lo cual, se obtuvo un producto seco con una humedad crítica de 0,6 kg sól seco/kg agua, velocidad de secado constante de 0,038 kg/hm², velocidad decreciente de 0,057 kg/hm², tiempo de secado anticrítico de 1,66 h, tiempo de secado poscrítico de 3,07 h. Con lo cual el rendimiento del equipo fue del 89%.

Concluimos que nuestro equipo cumple con la función de secar en menor tiempo, manteniendo las propiedades nutricionales del producto a deshidratar.

Se recomienda asegurar correctamente la tapa de sellado hermético debido a que se trabaja en condiciones de vacío, con la finalidad de evitar futuros accidentes.

SUMMARY

Research for the design construction of a freeze-dryer for the drying of sugar beet (*Beta vulgaris. Saccharifera*), was conducted at the laboratory of industrial operations, located in the Chemical Engineering School, Sciences Faculty of the Escuela Politécnica Superior de Chimborazo.

For the material drying, physical and chemical processes were employed; the methods used were: the inductive method, where the beet was collected from different markets of the city, and the deductive method, based on fundamentals and calculations for the design, construction and validation of the equipment. A simulation of the drying process was carried out, which was carried out in a tray dryer in the design and construction of the freeze-dryer. The built team consists of resistant materials to the conditions required for its operation: stainless steel ASI 304 and 316 cut and welded depending on the design, a cylindrical body with a hermetic closure of 49 cm long, external diameter of 38,5 cm, internal diameter of 29.5 cm, in its interior, it has 3 perforated trays, a small tray of 643 cm² and two large trays of 1026 cm², an electric mantle that allows the heat exchange 1100 watts and 110 volts, to obtain the ideal vacuum, an engine of 110 volts. The equipment has the respective pressure and temperature gauges.

The freeze-dryer operates a temperature of 60°C, a load of 5 Kg, pressure of -0,6 psi, with it, a dry product was obtained with a critical moisture of 0,6 Kg dry sun/Kg water, constant drying speed of 0,038 Kg/hm², decreasing speed of 0,057 Kg/hm², anti-critical drying time of 1,66 h, post-critical drying time of 3,07 h. With that, the performance of the team was 89%.

It is concluded that our team accomplishes with the function of drying in less time, while maintaining the nutritional properties of the product to dehydrate.

It is recommended to insure the hermetic sealed cover correctly, since the work is done in vacuum conditions to avoid future accidents.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas principales que siempre ha preocupado a los investigadores y expertos en la materia, es la característica que presentan un gran sinnúmero de productos de uso biológico, químico y alimenticio es que al ser fácilmente degradados, no permiten su conservación sin que sus cualidades originales sean alteradas.

Por lo tanto, mediante el presente proyecto, se busca ser un aporte para la investigación y contribuir en el análisis de métodos tradicionales para la conservación de productos, presentando una propuesta de diseño de un equipo de liofilización para el Laboratorio de Procesos Industriales de la ESPOCH.

Este equipo podrá ensamblarse como una herramienta para la experimentación y análisis de los fenómenos de transferencia de calor y de masa, en operaciones tanto de refrigeración como de secado, favoreciendo de esta manera a que los estudiantes conozcan más a fondo el proceso de liofilización.

Para esto se conoce que la liofilización es un proceso de conservación mediante sublimación utilizado con el fin de reducir las pérdidas de los componentes volátiles o termo-sensibles, favoreciendo a la conservación de los nutrientes presentes en los alimentos a secar, ayudando a preservarlos por mayor tiempo, reduciendo así los costos de producción, transporte y almacenamiento.

La liofilización no altera la estructura físico-química del material, pero permite su conservación indefinida sin cadena de frío, con menos del 15% de humedad y alta estabilidad microbiológica. A diferencia de lo que ocurre en el secado por calor, con la liofilización en alimento el encogimiento es mínimo, el aspecto, la textura, el sabor y el aroma no se pierden, se intensifican y se mantienen las características nutricionales. Es ideal para conservar productos alimenticios, farmacéuticos y biológicos, que no deben calentarse ni siquiera a temperaturas moderadas.

ANTECEDENTES

Uno de los problemas que siempre ha preocupado a los investigadores y científicos es el de la delicadeza que presentan gran número de productos biológicos, químicos, alimenticios, etc. que al ser fácilmente desnaturalizarse, no permiten su conservación sin que sus cualidades originales sean alteradas.

Una serie de factores influyen en la alteración de dichas sustancias tales como microorganismos, el agua, las enzimas, el oxígeno, la temperatura, etc. Los diferentes procedimientos empleados para la conservación de sustancias inconsistentes están muy lejos de llegar a la perfección que sería la supresión de todos los factores externos e internos que las afecten

El ideal, sería poder conservar un producto y encontrarlo absolutamente idéntico en el momento de utilizarlo, sea cual sea el tiempo transcurrido, para ello es necesario conservar su integridad física y la composición química, de los más mínimos componentes, sino también mantener el inicial reparto de estas sustancias en la masa que los contiene y en el caso de los tejidos animales o vegetales, respetar escrupulosamente su armoniosa arquitectura celular.

Los incas aprovechaban el altiplano con sus noches heladas y su insolación diurna, para transformar la papa que llevaban en sus mochilas convirtiéndose en chuno y la carne de llama en charqui, quienes posiblemente fueron los primeros productos liofilizados de la historia.

Años más tarde se vio venir la aplicación industrial de la liofilización en la escuela de medicina de Pensilvania, liofilizando los primeros productos para uso clínico a gran escala principalmente sueros y plasma humano.

Por medio de la liofilización se puede extraer más del 95% del agua contenida en un alimento, lo que se traduce en un gran beneficio con relación al costo del transporte, ya que permite cargar mayor cantidad de mercadería sin necesidad de cadena de frío (se logra un producto más estable microbiológicamente). Al finalizar el proceso de liofilización, el alimento se convierte en una estructura rígida que conserva la forma y el volumen pero con peso reducido, preservando sus características nutritivas y organolépticas. Al rehidratarlo se recuperaran la textura, el aroma y el sabor original.

En Ecuador se está poniendo en práctica el proceso de liofilización con los siguientes productos: aguacate, babaco, banana, carambola, frutilla, mango, piña, manzana, tomate de árbol, naranjilla, mora, mortiño, papaya, ónix, limón, naranja, mandarina, guayaba, guanábana, granadilla, taxo, uvilla/uchuva, brócoli, zanahoria, palmito, remolacha, tomate riñón, ajo, pesto, manzanilla, menta, hierba buena, hierba luisa, cedrón, culantro, perejil, albahaca, yemas de huevo, claras de huevo, huevo, pétalos de caléndula, capullos de lavanda.

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

En la ciudad de Riobamba se han realizado estudios de Liofilización especialmente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la Facultad de Ciencias principalmente en las Escuelas de Bioquímica y Farmacia e Ingeniería Química enfocándose en los productos de origen orgánicos.

JUSTIFICACIÓN

Las líneas de investigación que tiene la Escuela de Ingeniería Química en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se ubica el diseño y construcción de maquinarias que sirven de soporte académico para los futuros profesionales, este proyecto está enfocado al SECADO la cual es una rama de OPERACIONES UNITARIAS que se encuentra en mayor adelanto debido a los trabajos múltiples realizados en el estudio de operaciones de secado con la utilización de aire caliente y la deshidratación osmótica..

El diseño del equipo es la parte inicial del proyecto de investigación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PARA EL SECADO DE LA REMOLACHA AZUCARERA (Beta vulgaris var. saccharifera)” el cual será utilizado en el laboratorio de OPERACIONES UNITARIAS de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo estudiando la Remolacha Azucarera y de esta manera poder preservar de mejor manera las propiedades nutricionales de la misma y prolongar más su tiempo de vida.

El propósito general de este proyecto es complementar de un equipo necesarios que conforman parte del laboratorio de OPERACIONES UNITARIAS, el cual, permitirá principalmente estudiar los fenómenos de transferencia de calor y de masa relacionados con los procesos de deshidratación, los cuales constituyen una parte esencial de la formación por fundamentos del Ingeniero Químico. En conjunto este equipo apoyara la docencia del programa y permitirá continuar con la línea de investigación con respecto al secado.

OBJETIVOS

GENERAL

- Realizar el diseño detallado de un equipo Liofilizador para el secado de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris var. saccharifera*).

ESPECÍFICOS

- Establecer una simulación del proceso de liofilización para la remolacha azucarera.
- Identificar de las variables del proceso dentro de la operación de liofilización.
- Realizar el diseño de ingeniería para el proceso de liofilización (Cálculos técnicos, tamaño o dimensionamiento, tipo de materiales y controles, y presupuesto).
- Efectuar las respectivas pruebas de validación para el diseño de ingeniería.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Remolacha

1.1.1 Origen. Originaria del sur de Europa y, según una opinión más generalizada, de Italia. Crece libremente en muchas zonas marítimas del sur de Europa y al sur de África. Las remolachas fueron utilizadas desde la antigüedad, cuando no solamente se consumía la raíz sino las hojas que tienen un sabor semejante a las espinacas y que todavía siguen siendo fuente de consumo por el hombre.

1.1.2 Generalidades. Es una hortaliza de raíz redonda. Inicialmente forma la raíz principal y constituye las reservas energéticas. Esta se ramifica en un par de cotiledones, de los que se desarrollan pares de hojas que son lampiñas, de forma ovalada a cordiforme, de color verde oscuro o pardo rojizo, formando generalmente una roseta desde el tallo subterráneo.

1.1.3 Taxonomía y Morfología.

CUADRO 1.1.3-1
Taxonomía de la remolacha azucarera

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliosida
Orden:	Caryophyllales
Familia:	Quenopodiaceae
Género:	Beta
Nombre científico:	Beta vulgaris var. Vulgaris

FUENTE: TAXONOMÍA R.A, <http://www.florflores.com/la-remolacha-azucarera/> 2013

La remolacha es una planta bianual. Durante el primer año la remolacha desarrolla una gruesa raíz napiforme y una roseta de hojas, durante el segundo, emite una inflorescencia ramificada en panícula.

- Flores: poco llamativas y hermafroditas. La fecundación es generalmente cruzada, porque sus órganos masculinos y femeninos maduran en época diferentes.
- Raíz: es pivotante, casi totalmente enterrada, de piel rugosa al tacto.
- Semillas: estas son adheridas al cáliz y son algo leñosas.

1.1.4 *Características*

- Forma: Se trata de una raíz casi esférica de forma globosa, en algunas variedades plana o alargada.
- Tamaño y peso: tienen un diámetro entre 5 y 10 centímetros y puede pesar entre 80 y 200 gramos.
- Color: variable, desde rosáceo a violáceo y anaranjado rojizo hasta el marrón. La pulpa suele ser de color rojo oscuro.
- Sabor: debido a que se trata de una raíz en la que se acumulan gran cantidad de azúcares su sabor es dulce.

1.1.5 *Importancia económica y distribución geográfica.* Actualmente en nuestro país se cultiva tres veces más remolacha que hace cinco años. Nuestra provincia posee la mayor producción de remolacha, según los datos del MAG en el 2012 la producción fue de 550 Ton.

El costo de la remolacha durante este año, alcanzado un precio máximo de 40 centavos de dólar por cada kilogramo.

En varios países la remolacha representa el cultivo que más valor nutritivo produce, pues las hojas y cabezas de la remolacha es un alimento muy nutritivo para el ganado vacuno.

1.1.6 *Composición nutricional.* Cada 100 gramos de parte comestible de la raíz azucarera contienen:

CUADRO 1.1.6-1

Contenido Nutritivo de la Remolacha Azucarera.

COMPUESTO	CONTENIDO
Calorías	336-339
Agua	76.6 g
Grasas	0.1
Proteínas	1.1 g
Fibra	1.1 g
Cenizas	0.7 g
Calcio	115-182 mg
Potasio	2619-2638 mg
Riboflavina	0.32-0.39 mg

FUENTE: CONTENIDDO NUTRICIONAL., <http://www.florflores.com/la-remolacha-azucarera/> 2011

1.1.7 *Contenido nutricional en la raíz.* Los contenidos nutricionales de la raíz de la remolacha azucarera en su punto máximo de madurez son los siguientes:

Cuadro1.1.7-1

Contenido nutricional en la raíz de la Remolacha.

Agua	85-90 %
Materia seca	10-11 %
Proteínas disponibles	1,2-1,3 %
Grasas	0,1-0,3 %
Extractos anzolados	6,3-6,8 %
Fibra	0,9-1,1 %
Ceniza	1,8-2,9 %
Vitaminas	A, B2 y C

FUENTE: CONTENIDDO NUTRICIONAL., National Academy of Sciences (2008)

1.1.8 *Propiedades.* Dentro de las propiedades más importantes se tiene:

- La remolacha roja es un alimento de moderado contenido calórico, ya que tras el agua, los hidratos de carbono son el componente más abundante, lo que hace que esta sea una de las hortalizas más rica en azúcares. Es una buena fuente de fibra.

- De sus vitaminas destaca los folatos y ciertas vitaminas del grupo B, como B1, B2, B3 y B6.
- Los folatos intervienen en la producción de glóbulos rojos y blancos, en la síntesis del material genético y en la formación de anticuerpos en el sistema inmunológico.
- La vitamina B6 participa en el metabolismo celular y en el funcionamiento del sistema inmunológico.
- En relación con los minerales, es una hortaliza rica en yodo, sodio y potasio. Están presentes en menor cantidad, el magnesio, el fósforo y calcio. El calcio de la remolacha no es asimilable como es el caso de los productos lácteos.
- El yodo es un mineral indispensable para el buen funcionamiento de la glándula tiroidea, que regula el metabolismo, mientras que el potasio y el sodio son necesarios para el impulso nervioso.

1.1.9 *Formación de azúcar en la remolacha.* La remolacha se alimenta absorbiendo por los pelos de sus raíces y raicillas el agua del suelo con las materias minerales disueltas en ella. El agua llega a las hojas por los vasos leñosos y se reparten en los tejidos. En el interior de éstos, por la acción de la luz solar filtrada a través de la clorofila, se produce la fotosíntesis y se forman las materias orgánicas necesarias para la alimentación y crecimiento de las plantas. En las primeras fases de la vegetación se forman y desarrollan sus órganos, especialmente las hojas, que al llegar a su desarrollo completo alcanzan su máxima actividad. Entonces, no utilizándose ya en el crecimiento las materias formadas durante el día, sobre todo el azúcar, bajan durante la noche por los tubos fibrosos y se depositan en el tejido celular de la raíz.

1.1.10 *Usos de la remolacha azucarera.* Se utiliza para la extracción de sacarosa y fabricación de azúcar. Se pueden obtener subproductos del procesamiento de la remolacha, para la obtención de alcoholes, levaduras para la industria panadera y para la industria farmacéutica.

1.1.11 *Uso alimenticio.* El uso más común de cualquier vegetal comestible es el uso comestible, pero también es usado para otras cosas relacionadas con la alimentación tal como:

- Azúcar: de una variedad de remolacha se extrae, después de varios procesos, el azúcar, listo para ser usado.
- Colorante: de la remolacha se saca también el colorante E162, *rojo remolacha*.

1.1.12 *En relación con la salud.*

- Exceso de peso. La remolacha azucarera debido a su moderado valor calórico, se puede consumir como ingrediente de ensaladas, siendo utilizada en dietas de control de peso, si bien hay tener en cuenta la ración de consumo y la condimentación. Además gracias a su contenido de fibra brinda una buena sensación de saciedad.
- Mujeres embarazadas y niños. La remolacha es apropiada en la dieta de la embarazada gracias a su gran contenido de folatos. Ésta es una vitamina importante a la hora de asegurar el correcto desarrollo del tubo neural del feto, sobre todo en las primeras semanas de gestación.
- Prevención de enfermedades. La remolacha contiene pigmentos llamados betaninas, de acción antioxidante que le dan un color característico. Los antioxidantes bloquean el efecto dañino de los radicales libres.

1.2 Secado

1.2.1 Generalidades El secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas sólido, donde la humedad contenida en el sólido se trasfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el periodo de secado cesa.

1.2.2 Definición. El término secado, usualmente infiere la eliminación de relativamente pequeñas cantidades de agua de un sólido o de un material casi sólido. En el proceso de secado la mayor atención se presta al producto sólido. En la mayor parte de los sólidos, el secado implica la eliminación de agua a temperaturas menores a su punto de ebullición.

Esta definición distingue al secado de métodos mecánicos pero no lo diferencia del proceso usualmente conocido como evaporación el cual es llevado a cabo en evaporadores comerciales. En los evaporadores el calor es empleado para remover líquido de soluciones sólidas o suspensiones, en donde el líquido se encuentra en proporciones más grandes en comparación al secado.

Para que el secado se lleve a cabo la humedad debe ganar calor de sus alrededores y evaporarse, para ser acarreado por un gas transportador. La concentración de vapor sobre la superficie de secado influencia la velocidad de secado y la manipulación correcta de estas condiciones es crucial para el éxito del proceso.

1.2.3 Factores que intervienen en el proceso de secado.

- **Temperatura del aire.** En la práctica del secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración la especie que se va a someter al secado. Estos niveles diversos de temperatura que se mantienen durante el proceso técnico de secado. Durante el proceso de secado se forma un gradiente de temperatura con

respecto al espesor del material, mismo que tiende a reducir conforme disminuya 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. Generalmente es expresado en porcentaje (%) a medida que se incrementa la temperatura aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.
- **Velocidad del aire.** La velocidad del aire en un secador tiene como funciones principales, en primer lugar transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, trasportar la humedad saliente del material.
A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación disminuye el tiempo de secado aumenta. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación de aire a regular.

1.2.4 Etapas del secado. Varias observaciones experimentales en el desarrollo teórico de los fenómenos que rigen el secado han llevado a la división formal de dos períodos de secado:

- 1) Velocidad constante.
- 2) Velocidad decreciente de secado.

El contenido de humedad en el punto de transición entre estos dos periodos se conoce como humedad crítica. Debido a que en raras ocasiones la tasa de secado en la primera etapa es realmente constate.

1.2.5 Principios básicos del secado. El proceso de secado se ajusta a principios básicos y depende de factores o condiciones fundamentales, que incluyen necesariamente implicaciones energéticas de importancia.

Dentro de los factores se enumeran:

- Propiedades del producto a desecar como condiciones del proceso de secado.
- Mecanismo de transferencia de calor, transporte de masa y circulación interna.
- Periodos y duración de secado.

Las características de los productos a secar que deben tenerse en cuenta son:

- El tamaño, forma y peso de los productos a desecar.
- El contenido total de humedad del producto.
- La humedad residual hasta la que debe llevarse a cabo la desecación.
- Cantidad de humedad a eliminar por unidad de tiempo.
- Temperatura crítica que puede soportar el producto sin alterarse.
- La temperatura máxima de los gases a la entrada del secador.

1.2.6 Parámetros básicos de secado. Entre los parámetros básicos del secado se anotan aquellos conceptos y leyes más importantes, entre los cuales se debe saber:

- Entalpía del aire.
- Humedad del aire.
- Densidad del aire húmedo.
- Volumen específico del aire húmedo.
- Temperaturas: bulbo seco, húmedo de rocío.
- Humedad del producto inicial y final.
- Cantidad de humedad eliminada.
- Variación de la humedad diaria.

1.2.7 Factores que intervienen en el proceso de secado.

- Temperatura del aire. Para el proceso de secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo reflexionando la temperatura de la especie a desecar. Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, mismo que tiende a disminuir conforme se reduce el tiempo de humedad.
- Humedad relativa 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.
- Velocidad del aire. La velocidad del aire dentro del secador tiene funciones principales: transmitir la energía necesaria para calentar el producto, y transportar la humedad saliente del producto secado.

1.2.8 Humedad. Para estudiar el proceso de secado en sólidos es necesario conocer las proporciones existentes de agua y material sólido contenido en el mismo.

- Contenido de humedad en base seca. Se conoce como humedad en base seca al peso de agua que acompaña a la unidad de peso de sólido seco.

$$\varphi_s = \frac{M_W - M_S}{M_S}$$

Ecuación 1.2.8-1

Donde:

φ_s = Contenido de humedad en base seca (kg agua/ kg sólido seco)

M_W = Peso del sólido húmedo (kg agua)

M_S = Peso sólido seco (kg sólido seco)

Aplicaciones:

- Compara la masa de agua que contiene el material sólido con una masa seca.
- Cuando el material está constituido de material seco, y muy poca masa de agua se espera que el valor de contenido de humedad se aproxime a cero

➤ Contenido de humedad en base húmeda:

$$\varphi_W = \frac{M_W}{M_W + M_S}$$

Ecuación 1.2.8-2

Donde:

φ_W = Contenido de humedad en base humedad (kg agua/ kg producto)

M_W = Peso del sólido húmedo (kg agua)

M_S = Peso sólido seco (kg sólido seco)

Aplicaciones:

- Permite identificar de forma intuitiva el punto en el cual el material sólo está constituido por materia seca y el punto en el que sólo está constituido por agua.
- Para propósitos de calibración, desarrollo de instrumentos y operaciones comerciales es más conveniente usar la definición de humedad en base humedad ya que con ella se obtiene una escala del 0 al 100%, lo cual facilita la realización de las curvas de calibración.

1.2.8.1 Humedad de equilibrio. La tensión de vapor de agua sobre un cuerpo higroscópico dependerá de los siguientes factores: temperatura, naturaleza del cuerpo, estado de la superficie y proporción de agua. Entonces, a temperatura constante la tensión de vapor de agua aumenta continuamente con la humedad hasta alcanzar el vapor de agua pura a la misma temperatura. Cualquiera que sea la humedad, la tensión de vapor se mantendrá constante. La humedad de equilibrio dependerá del estado de la superficie del cuerpo.

1.2.8.2 Humedad libre. Humedad que puede perder un sólido después de un contacto prolongado con el aire de condiciones constantes.

1.2.8.3 Humedad ligada. Humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico. También se la conoce como la humedad mínima de equilibrio con el aire saturado.

1.2.8.4 Humedad desligada. Cuando la humedad es superior al valor de la humedad ligada. Es la humedad libre en contacto con el aire saturado.

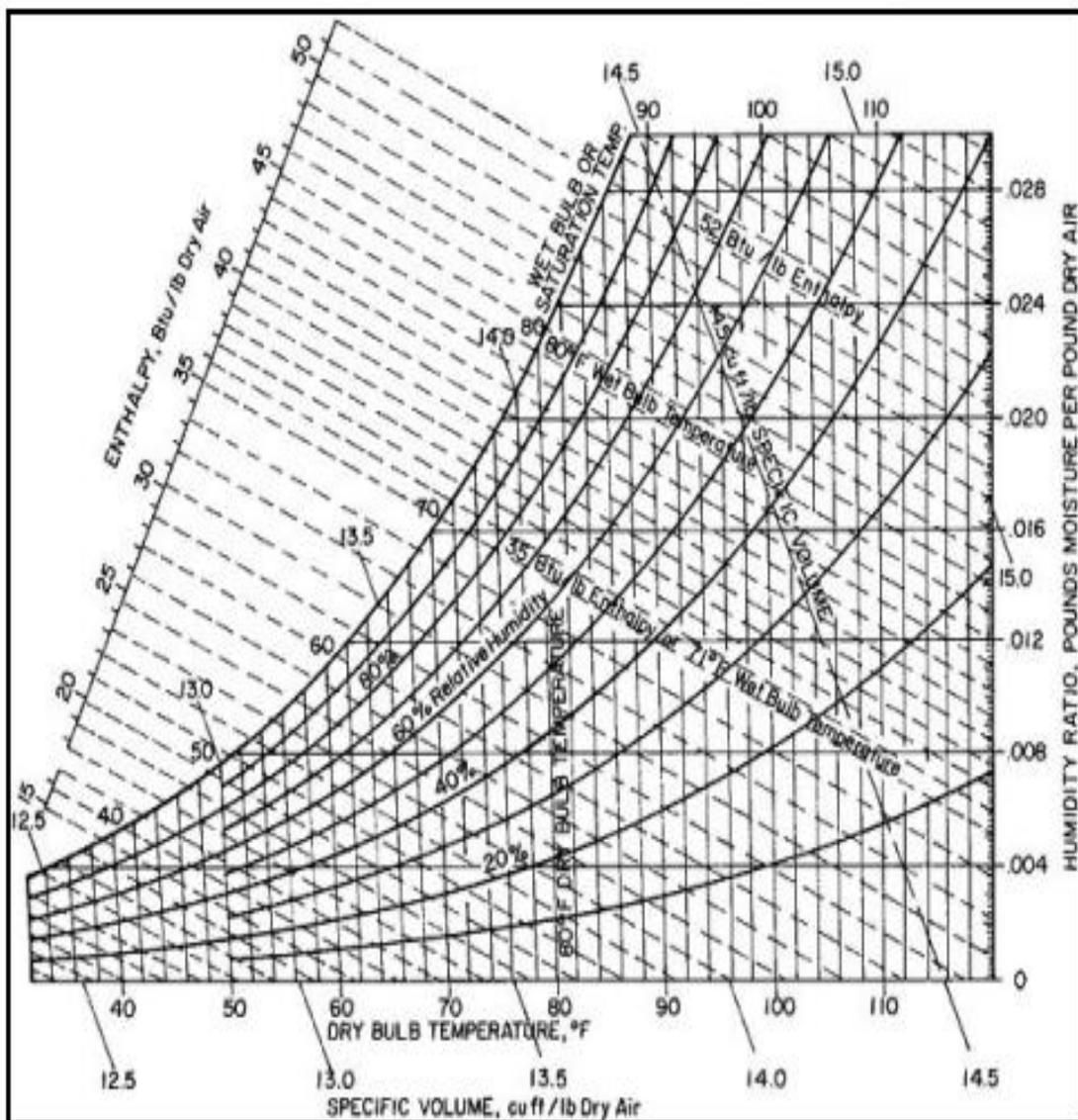
1.2.9 Temperatura de bulbo seco. La temperatura de bulbo seco, es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se le denomina sólo temperatura del aire. Es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

1.2.10 Temperatura bulbo húmedo. La temperatura termodinámica de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación. Una definición simple de este concepto es la siguiente: Es la temperatura indicada por un termómetro que tiene su bulbo humedecido e inmerso en una corriente de aire. Esta temperatura puede ser determinada de la carta psicométrica para aire húmedo, para el período de secado constante.

1.2.11 Entalpía. La entalpía de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia.

1.2.12 Presión de vapor. La presión de vapor (p_v), es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado (p_{vs}).

1.2.13 *Carta psicométrica.* Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico, se pueden presentar adecuadamente en forma de gráfico, con el nombre de *carta psicométrica*, el cual se construye según una presión atmosférica determinada., aunque suele haber curvas de corrección para otras presiones.



FUENTE: CARTA PSICROMÉTRICA, www.sc.edu/es/nmwmigaj/CartaPsy.htm 2013

Fig. 1.2.13-1. Carta Psicométrica

1.2.14 Volumen específico. El volumen específico del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco. La masa específica del aire húmedo no es igual al recíproco de su volumen específico. La masa específica del aire húmedo es la relación entre la masa total de la mezcla y el volumen que ella ocupa.

1.2.15 Comportamiento general del secado. Al secar un sólido húmedo con un gas a una temperatura y humedad fija, siempre aparece un patrón general de comportamiento. Inmediatamente después del contacto entre la muestra y el medio de secado, la temperatura del sólido se ajusta hasta alcanzar un estado estable. La temperatura del sólido y la velocidad de secado pueden aumentar o disminuir para alcanzar esa condición de estado estable. A estado estable, un medidor de temperatura determinará que la temperatura que la superficie sólida húmeda es igual a la temperatura de bulbo húmedo del medio de secado. Las temperaturas dentro del sólido sometido al secado también tenderán a igualarse con la temperatura de bulbo húmedo del gas, pero en este caso, la concordancia puede ser imperfecta debido al retraso en el movimiento de masa y calor. Una vez que estas temperaturas alcanzan la temperatura de bulbo húmedo del gas, se mantienen casi estables y la velocidad de secado también permanece constante. Esto se conoce como *Periodo de velocidad constante de secado*. Este periodo termina cuando el sólido alcanza el *Contenido crítico de humedad*. Después de este punto, la temperatura de la superficie aumenta y la velocidad de secado decae con rapidez.

1.2.16 Cinética del secado. Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, exactamente por el coeficiente diferencial $\frac{dx}{d\theta}$ operando en condiciones constantes de secado. Analíticamente la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, entonces de acuerdo con la ecuación:

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

Ecuación 1.2.16-1

Donde:

S = Peso del sólido seco (Kg)

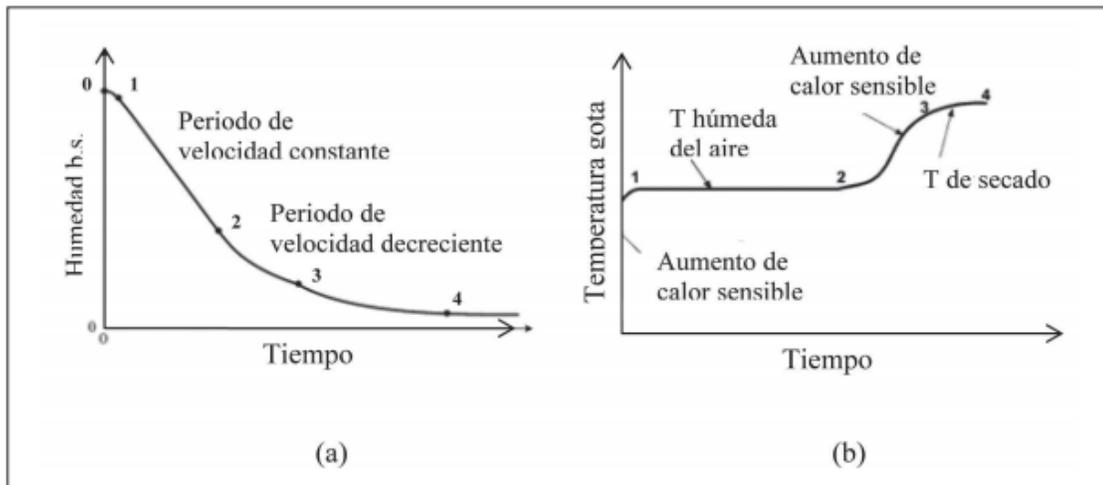
A = Área de la superficie expuesta (m^2)

W = Velocidad de secado (kg/hm^2)

Aplicaciones:

- Recuperación de aire caliente procedente de los hornos.
- Se ha conseguido establecer los criterios para la selección de los secadores rápidos industriales, su optimización, así como, el diseño de las instalaciones de secado y la remodelación de los existentes.

1.2.17 Curvas típicas de secado. Las curvas típicas de secado están relacionadas con el mecanismo de verificación del proceso.



FUENTE: CURVAS DE SECADO, catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/...s.../capitulo5 2013

Fig. 1.2.17-1. Curvas típicas de secado.

El periodo de secado representado por el segmento AB, es el lapso de estado inestable durante el cual la temperatura del sólido alcanza su valor de estado estable. El segmento BC es el periodo de velocidad constante, donde la superficie total expuesta está saturada de agua. La temperatura de la superficie alcanza la temperatura del bulbo húmedo. En el segmento C, el contenido de humedad del sólido es escasamente adecuado para la totalidad de la superficie.

En los segmento CD de la figura 1.2.17-1 se conoce como “primer periodo de velocidad descendente”, la superficie comienza a agotarse de líquido debido a que la velocidad de movimiento del líquido hacia la superficie es menor que la velocidad de transferencia de masa desde la superficie, hasta que en el segmento D no existe un área significativa de superficie saturada de líquido. La parte de la superficie que está saturada se seca por transferencia convectiva de calor desde la corriente de gas secante y transferencia de masa hacia la misma. A medida que el contenido de humedad continúa disminuyendo, la trayectoria para la difusión de calor y masa crece más.

Las ecuaciones que se utilizan son las siguientes:

- **Periodo constante o anticrítico (Para calcular la velocidad constante).** Se define la velocidad de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial $(-\Delta x/\Delta\theta)$ operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire a las condiciones de temperatura, presión, humedad y velocidad constantes en el tiempo.

$$W_c = \frac{S}{A} - \frac{\Delta x}{\Delta\theta}$$

Ecuación 1.2.16-2

Donde:

S = peso sólido seco (kg)

A = área de secado (m^2)

Δx = diferencia de humedades crítica – final (kg agua/kg sól seco)

$\Delta\theta$ = diferencia de temperaturas ($^{\circ}C$)

- **Para calcular el tiempo de secado en condiciones constantes.** Se define como el tiempo de operación en condiciones constantes de secado.

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

Ecuación 1.2.16-3

Donde:

S = peso sólido seco (kg)

A = área de secado (m^2)

X_i = humedad inicial (kg agua/kg sól seco)

X_c = humedad crítica (kg agua/kg sól seco)

W_c = velocidad constante de secado (kg/hm^2)

Aplicaciones:

➤ Dependiendo del material, este define las características de la curva de secado.

- **Periodo poscrítico o decreciente.**

Se utilizará el método de integración gráfica, utilizando el área bajo la curva Humedad media vs $1/W$.

Sustituyendo en la ecuación:

$$\theta_p = \frac{S}{A} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{W}$$

Ecuación 1.2.16-4

Donde:

S = peso sólido seco (kg)

A = área de secado (m^2)

X_i = humedad inicial (kg agua/kg sól seco)

X_c = humedad crítica (kg agua/kg sól seco)

$\frac{dx}{W}$ = área bajo la curva (kg/m^2h)

Aplicaciones:

- Dependiendo del material, este define las características de la curva de secado.

El tiempo total de secado se realizará:

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

Ecuación 1.2.16-5

Donde:

θ_T = tiempo total de secado (h)

θ_a = tiempo anticrítico de secado (h)

θ_p = tiempo poscrítico de secado (h)

Se tendrá la velocidad decreciente de secado.

$$W_d = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_f}{\theta_p}$$

Ecuación 1.2.16-6

Donde:

S = peso sólido seco (kg)

A = área de secado (m²)

X_f = humedad final (kg agua/kg sól seco)

X_c = humedad crítica (kg agua/kg sól seco)

θ_p = tiempo poscrítico de secado (h)

La velocidad total de secado es:

$$W_T = W_c + W_d$$

Ecuación 1.2.16-7

Donde:

W_T = velocidad total de secado (kg/hm^2)

W_c = velocidad total de secado constante (kg/hm^2)

W_d = velocidad total de secado decreciente (kg/hm^2)

- **Método Analítico.**

Tomando en cuenta la línea de secado de los puntos C y D de la figura 3, se puede calcular el tiempo de secado en el periodo poscrítico.

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

Ecuación 1.2.16-8

Donde:

S = peso sólido seco (kg)

A = área de secado (m^2)

X_f = humedad final (kg agua/kg sól seco)

X_c = humedad crítica (kg agua/kg sól seco)

W_c = velocidad total de secado constante (kg/hm^2)

W_f = velocidad total de secado decreciente (kg/hm^2)

- **El tiempo total de secado es el siguiente:**

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

Ecuación 1.2.16-5

Donde:

θ_T = tiempo total de secado (h)

θ_a = tiempo anticrítico de secado (h)

θ_p = tiempo poscrítico de secado (h)

El valor calcula es considerablemente igual al encontrado en la gráfica, se considera que el proceso está correctamente realizado.

1.2.18 Clases de materiales según su comportamiento en el secado. Los materiales pueden dividirse en dos clases principales según su comportamiento en el secado. Los sólidos granulares o cristalinos que contienen humedad en los intersticios entre partículas. En estos materiales, el movimiento de la humedad es relativamente libre y ocurre como resultado de la interrelación entre las fuerzas gravitacionales y de tensión superficial. Los segundos materiales son los sólidos orgánicos estos se presentan en forma de gel o fibrosos, son amorfos. Estos materiales retienen humedad como parte integral de la estructura sólida o atrapada al interior de poros finos.

Las capas de la superficie tienden a secarse con mayor rapidez que el interior. Si la velocidad de secado es alta, puede originar diferencias del contenido de humedad a través de la muestra, que pueden provocar un destrozamiento.

En otros casos puede dar lugar a la formación de una capa relativamente impermeable que inhibe el secado del interior y puede acentuar la desigualdad del contenido de humedad a través de la muestra y, en consecuencia, contribuir al deterioro del sólido.

1.2.19 Transmisión de calor en los secadores. El secado de sólidos húmedos es, por definición, un proceso térmico. Aunque con frecuencia se complica por la difusión e el sólido a través del gas, es posible secar muchos materiales simplemente calentándolos por encima de la temperatura de ebullición del líquido.

1.2.20 Clasificación de los aparatos de secado. Existen numerosos aparatos de secado, que se ajustan a diversos materiales y las diferentes condiciones que han de someterse. La clasificación de los aparatos puede efectuarse con arreglo a varios criterios:

- Tipo de materiales tratados.
 - Métodos de calefacción.
 - Modo de funcionamiento.
- **Naturaleza de la sustancia a desecar.-** Es indudable que el modo en que se dispone el secado dependerá en primer término del tipo de materia que va a someterse a la desecación. El secado de una materia granular es distinto que otra que se presenta en forma pastosa. En cada caso se emplea métodos y formas diferentes.
- **Métodos de calefacción.-** Las radiaciones infrarrojas se emplean frecuentemente para el secado rápido de adhesivos, pinturas, películas, superficies metálicas. Por medio de un reflector parabólico de baja temperatura sobre el cuerpo a secar.

1.2.21 Tratamiento de sólidos en secadores. La mayor parte de secadores industriales operan con partículas de sólidos durante todo o una parte del ciclo de secado, aunque, por supuesto, algunos secan grandes piezas individuales.

En los secadores adiabáticos los sólidos están expuestos al gas de alguna de estas formas:

- El gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina del sólido, o bien sobre una o ambas caras de la lámina. Este proceso se llama *Secado con circulación superficial*.

- El gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que están soportados sobre un rejilla. Recibe el nombre de *Secado con circulación a través*.
- Los sólidos descienden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, dando lugar a un arrastre no deseado.
- El gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho, produciéndose el arrastre de partículas más finas.
- Los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad transportada desde un equipo de mezcla hasta un separador neumático.

En los secadores no adiabáticos el único gas a separar es el agua, o disolvente que se vaporiza, aunque en ocasiones se hace circular a través de la unidad una pequeña cantidad de gas de barrido (frecuentemente aire o nitrógeno). Estos secadores difieren en la que los sólidos se exponen a la superficie caliente. Pudiendo ser:

- Los sólidos se esparcen sobre una superficie horizontal estacionaria que se desplaza horizontalmente donde se cuecen hasta que se secan. La superficie puede calentarse eléctricamente o mediante un fluido de transmisión de calor tal como el vapor de agua o agua caliente.
- Los sólidos se mueven sobre una superficie caliente, generalmente cilíndrica, por medio de un agitador.
- Los sólidos deslizan por gravedad una superficie inclinada caliente o bien son transportados en sentido ascendente por la superficie y deslizándose posteriormente hasta una nueva localización.

1.2.22 Aparatos continuos y discontinuos. En el secado continuo el producto se desplaza con movimiento uniforme desde el extremo de entrada al de salida, y las condiciones en cualquier punto del aparato se mantienen constantes con el tiempo.

1.2.23 Tipo de secadores. Se utilizan dependiendo del producto seco partiendo siempre del contenido de humedad, así se tendrá:

**CUADRO 1.2.24-1
Tipo de secadores.**

Secadores Directos.		Secadores infrarrojos de calor radiante.	Secadores Indirectos.	
Directos continuos	Directos por lotes		Indirectos continuos	Indirecto por lotes
Continuo de bandejas	Directos por lotes de circulación directa		Indirectos de cilindro	Indirecto agitado
Continuo de material dosificado en un capa	Directos por lotes de bandejas y compartimientos		Indirectos de tambor	Por lotes en congelación
Continuo de transportación neumática	Directo por lechos fluidos		Indirectos de bandejas vibratorias	Por lotes en bandejas al vacío
Continuos rotatorios			Indirecto de tipo especial	
Continuos por aspersión				
Continuos de circulación directa				
Continuos de túnel				
Continuo de lecho fluido				

FUENTE: LABORATORIO OPERACIONES UNITARIAS ESPOCH ., FLORES, L., / NUNEZ, D., 2013

1.3 LIOFILIZACIÓN

1.3.1 Historia.El proceso de liofilización tiene sus orígenes en el Imperio Inca, en el altiplano andino a 4000 metros sobre el nivel del mar. Allí los pobladores realizaban y continúan realizando un producto denominado Chuño, resultado de la deshidratación de la papa.

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

1.3.2 Generalidades.La conservación de productos biológicos o de sustancias destinadas a la alimentación de origen animal o vegetal, fueron y siguen siendo hoy un problema de difícil resolución.

Por medio de la liofilización se puede extraer más del 95% del agua contenida en un alimento, lo que se traduce en un gran beneficio con relación al costo del transporte, ya que permite cargar mayor cantidad de mercadería sin necesidad de cadena de frío (se logra un producto más estable microbiológicamente).

1.3.3 Secado por liofilización. Este tipo de secado es por lote con calentamiento indirecto, el cual consta de una cámara hermética al vacío, construida casi de hierro o placas de acero, en ocasiones con bandejas de soporte calentadas dentro de la cámara, una fuente al vacío y, por lo común, un condensador.

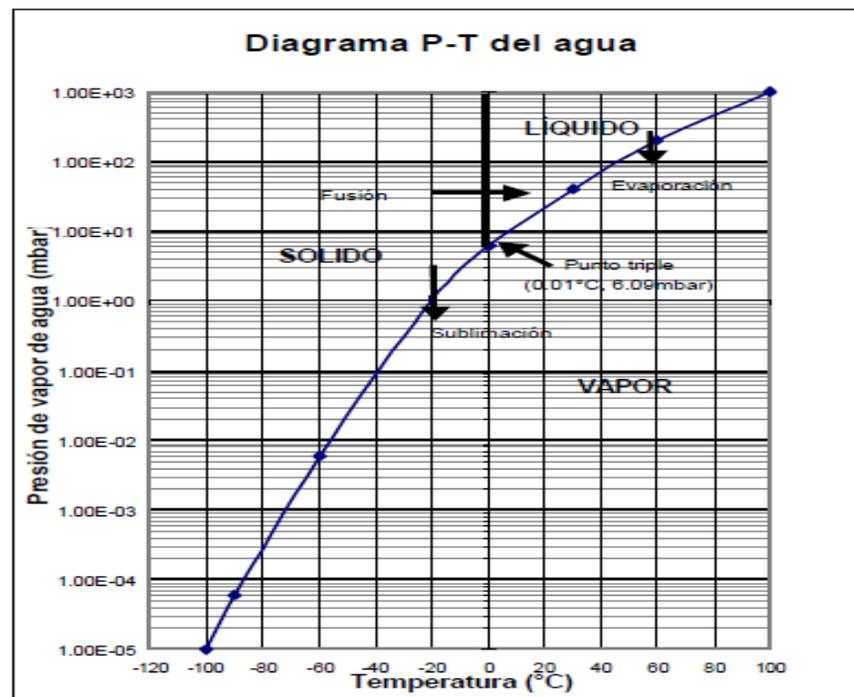
Las bandejas hechas con placas planas de acero se sujetan en el interior de la cámara al vacío y se conectan en paralelo a los cabezales de entrada y salida

Este método de desecación en el que se elimina agua por congelación del producto húmedo y posterior sublimación del hielo en condiciones de vacío. Al suministrar calor el hielo se sublima y se evita el paso por la fase líquida. Dicha técnica constituye un efectivo sistema

de preservación de elementos biológicos como células, enzimas, vacunas, levaduras, frutas, vegetales y alimentos en general.

1.3.4 Fundamentos de la liofilización. Es un proceso de secado mediante la sublimación, el cual ha sido desarrollado con el fin de reducir los compuestos responsables de la pérdida de sabor y aroma en los alimentos, lo cuales se pierden durante los métodos convencionales de secado. El proceso de liofilización consta de dos pasos: el primero el cual consiste en congelar el alimento y el segundo paso en donde el producto es secado por sublimación directa del hielo bajo presión reducida.

Existe un punto crítico de temperatura y presión, en la cual la transformación de gas en líquido y viceversa es instantánea. Igualmente sucede con el agua en estado sólido, es decir, el hielo. El hielo sublima a una temperatura inferior de $0,01^{\circ}\text{C}$ y a una presión inferior de 0,6 mbar, tal como se muestra en el diagrama.



FUENTE: DIAGRAMA PRESIÓN TEMPERATURA, onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tema6 2013

Fig. 1.3.4-1. Diagrama presión-temperatura del agua.

Al someter hielo a una temperatura inferior a la presión máxima del vapor de agua, el hielo sublima y se transforma directamente en vapor sin pasar por la fase líquida. En esto radica la gran ventaja de la liofilización. Se congela el agua contenida en los productos y después se elimina por sublimación, con lo cual solo se extrae el agua en forma de vapor, pero no las sustancias que aquella contenía, puesto que estas, al no ser líquidas no se evaporan. El producto así obtenido exento de agua, es un polvo fino en el que están concentradas todas las sustancias que lo integran y que puede conservarse a temperaturas normales.

La eliminación del agua constituyente del producto se realiza desde el estado congelado. Es suficiente con efectuar un alto vacío en la cámara donde se encuentra la sustancia congelada, disponer de una fuente de frío donde se depositara el hielo sublimado y calentar el producto a medida que la sublimación del hielo tienda a bajar demasiado su temperatura.

Es necesario seguir la operación haciendo variar los factores presión y la temperatura del producto a deshidratar, en función uno de otro. En efecto, las condiciones para efectuar la sublimación, dependen de la creación y manutención de una diferencia de presión de vapor del hielo o masa congelada y del ambiente circulante.

1.3.5 *Ventajas de la liofilización.* Dentro de las ventajas más importantes, se las puede resumir:

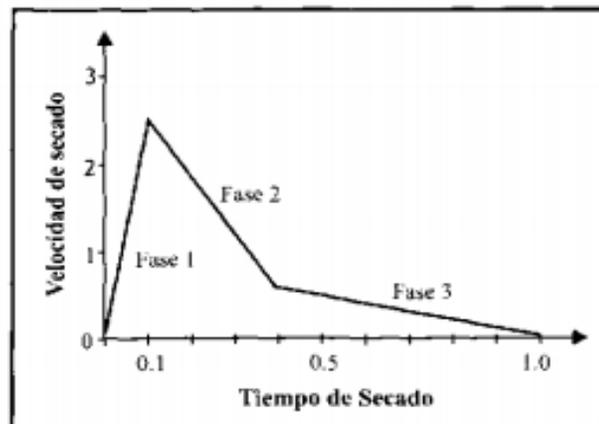
- Como la deshidratación se realiza a temperaturas inferiores a los 0°C se evita la acción nociva del calor sobre las sustancias nutritivas y aromáticas, además disminuye las reacciones enzimáticas y químicas las cuales afectan en las propiedades organolépticas del producto.
- Al sublimarse el hielo deja tras de sí una estructura porosa y seca, permitiendo una fácil rehidratación del producto original.
- Los productos retienen sus propiedades y compuestos originales.
- El producto liofilizado puede ser almacenado por un buen tiempo.

- Los productos finales son muy livianos lo cual facilita su transporte y almacenamiento.

La liofilización tiene dos características importantes:

- La ausencia de aire y las bajas temperaturas previene el deterioro del producto debido a las oxidaciones y modificaciones del producto.
- Los productos que se deterioran a altas temperaturas, pueden secarse al vacío con un daño mínimo.

1.3.6 Fases del secado por sublimación. En el proceso de secado por liofilización se distinguen tres fases, mismas que son esquematizadas en la siguiente figura:



FUENTE: SECADO POR LIOFILIZACIÓN: *books.google.com.ec* 2013

Fig. 1.3.6-1 Secado por liofilización.

El proceso inicia con el calentamiento, donde empieza a formarse un frente de sublimación o una inter-fase entre la capa seca y la capa congelada de la muestra, el cual avanza paulatinamente.

La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca de la muestra, debido a la acción de una diferencia de presión.

Las tres fases que se distinguen son:

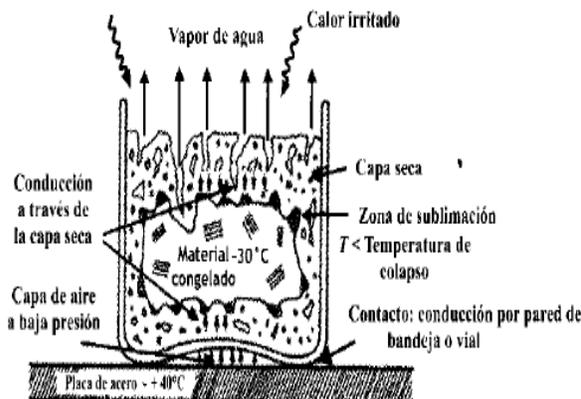
Fase 1: Llamada etapa conductiva. En donde por el calentamiento de la muestra, la velocidad de sublimación crece rápidamente hasta llegar a un máximo. El tiempo para agotar esta fase es relativamente corto, entre un 10 y 15% del tiempo total del proceso.

Fase 2: Primera etapa difusiva. Muestra un descenso importante de la velocidad de sublimación debido a la formación de una capa porosa de material seco.

Las fases 1 y 2 se denominan secado primario: en ellas se lleva a cabo la mayor parte de remoción de agua del producto (entre un 75-90%).

Fase 3: Segunda etapa difusiva, llamada también secado secundario. Donde la velocidad de sublimación continúa decreciendo a menudo que se aproxima a cero. Esto se debe a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación.

En la transferencia simultánea de calor y masa se combina la acción de la temperatura y los gradientes de presión como fuerzas impulsoras. El espesor es importante: mientras este es más delgado, existe menor resistencia para que el flujo de calor y masa pasen a través de la muestra. La transferencia de calor se hace por conducción-convección gaseosa y radiación (cuando se opera a muy baja presión).



FUENTE: SECADO POR LIOFILIZACIÓN: www6.uniovi.es/usr/ffblanco/Leccion6.SECADO 2013

Fig. 1.3.6-2. Secado por sublimación

Específicamente, en la liofilización de cualquier producto tendrá los lapsos de:

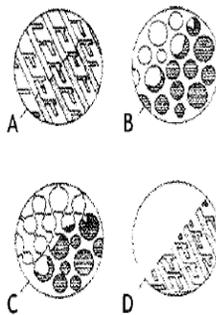
- Pre-tratamiento del producto
 - Pre-congelación
 - Congelación
 - Vacío
 - Sublimación
 - Desorción
 - Ruptura del vacío
 - Acondicionamiento final
-
- **PRE-TRATAMIENTO DEL PRODUCTO.-** Consiste en darle un manejo al producto antes a ser liofilizado con el fin reducir el tiempo de secado y aumentar la eficiencia del proceso. El procesamiento previo puede ser por reducción de tamaño si el producto es sólido o una pre-concentración si es líquido.

 - **PRE-CONGELACIÓN.-** Es utilizada para reducir el tiempo del ciclo de liofilización. Una vez que el producto es congelado, las condiciones de congelación se mantienen mediante un sistema de refrigeración hasta que el producto esté listo para el secado.

 - **CONGELACION.-**La temperatura y el tiempo de congelación de productos alimentarios son función de los solutos que contienen. La temperatura de congelación para el agua pura permanece constante en el punto de congelación hasta que el agua se haya congelado, para los alimentos la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución se ha congelado.

- **VACIO.**-Tan pronto el vacío en la cámara alcanza la presión propia, el hielo empieza a sublimarse. A medida que la presión disminuye en la cámara la sublimación se acentúa, pero se ha comprobado experimentalmente que esta aceleración no es indefinida y que la velocidad máxima se alcanza cuando el vacío de la cámara llega al 50% de la presión de vapor encima del producto.
- **SUBLIMACION O SECADO PRIMARIO.**- Dentro de las dos etapas de secado se tiene la sublimación del hielo bajo vacío. El hielo sublima cuando se suministra la energía necesaria al calor latente debido a la baja presión en la cámara de secado, el vapor de agua generado en interfase de sublimación es eliminado a través de los poros. El condensador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto.

Para suministrar el calor requerido para la sublimación se requiere de los tres mecanismos de transferencia de calor. Calor por radiación desde la placa calefactora superior, conducción desde la placa inferior y también por convección, a través de la capa seca del material hasta la interfase sólida.



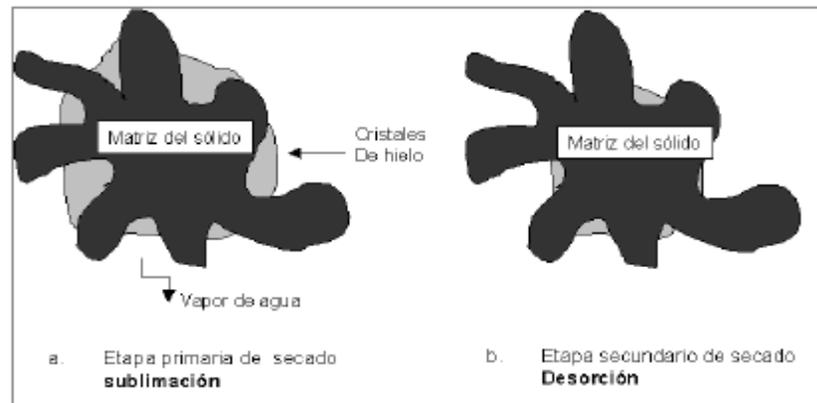
FUENTE: MECANISMO DE SECADO POR LIOFILIZACIÓN: es.scribd.com/doc/32405852/SECADO-REPORTE 2013

Fig. 1.3.6-3. Mecanismo de secado durante la Liofilización

- **DESORCIÓN O SECADO SECUNDARIO.**- Esta etapa comienza una vez desaparecido el hielo, corresponde a la eliminación del agua absorbida. Corresponde el 50% del tiempo requerido en la deshidratación.

Después del secado primario, la remoción de la humedad residual del material poroso depende de la naturaleza del material, la temperatura del producto, y la presión de vapor.

Adicionalmente, el contenido de humedad residual depende de la efectividad de secado en la bandeja. En las partes laterales externas de la bandeja, el secado es más efectivo; este fenómeno parece que sucede en todo tipo de Liofilizador. Por turbulencia de las moléculas de gas en las esquinas, tiene lugar una mejor conducción de calor entre la bandeja y el producto.



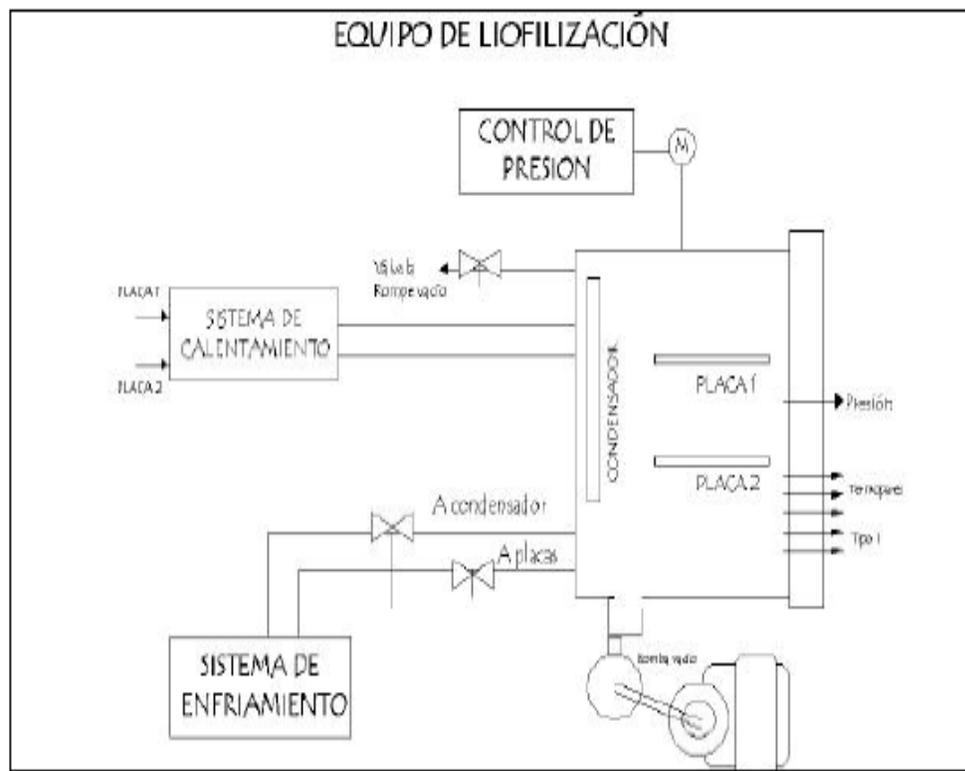
FUENTE: SUBLIMACIÓN DESSORCIÓN: es.thefreedictionary.com/liofilización 2013

Fig. 1.3.6-4. Desorción y Sublimación

- **RUPTURA DEL VACIO.-** La fase final de la operación de liofilización corresponde a la ruptura de vacío dentro de la cámara. Esta maniobra debe efectuarse con las precauciones consiguientes para evitar la oxidación por el aire o contaminación bacteriana, si son productos higroscópicos, de fácil oxidación o fabricados en condiciones estériles.

1.3.7 Procesos relacionados con la liofilización. Los procesos relacionados con la liofilización son la condensación y la descongelación. La congelación es necesaria porque durante el proceso de secado es muy importante eliminar el vapor de agua liberado por el producto. En la liofilización el vapor de agua es sublimado en una superficie de condensación enfriada por debajo de -60°C . Esto se hace para evitar que el agua retorne al producto que pase a las bombas de vacío. La eliminación del hielo es denominada descongelación y es necesaria para mantener una velocidad de transmisión de calor adecuada en el condensador.

1.3.8 Componentes principales del equipo liofilizador. Los componentes principales de un secador por liofilización



FUENTE: EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN: es.thefreedictionary.com/liofilización 2013

Fig. 1.3.8-1. Equipo de liofilización.

- Cámara de secado.

- Fuente de calor.
- Bomba de vacío.
- Indicadores de temperatura y presión.
- Tubería de vacío con accesorios inoxidable.
- Termostato.

1.3.8.1 Cámara de secado. Puede ser rectangular o cilíndrica. Las cámaras rectangulares permiten aprovechar el espacio, mientras que, las cámaras cilíndricas tienen una mejor resistencia a la presión.

1.3.8.2 Fuente de calor. El calor necesario para llevar a cabo el proceso de liofilización puede ser transmitido mediante placas con circulación de fluidos. De este modo las placas pueden actuar como un congelador indirecto. Durante la sublimación, se hace circular agua caliente cuyo flujo se regula mediante una válvula automática. Igualmente la fuente de calor puede ser una serie de resistencias eléctricas incorporadas en las bandejas.

1.3.8.3 Bomba de vacío. El vacío se realiza inicialmente mediante la primera bomba de caudal elevado pero con la que se consigue un vacío limitado.

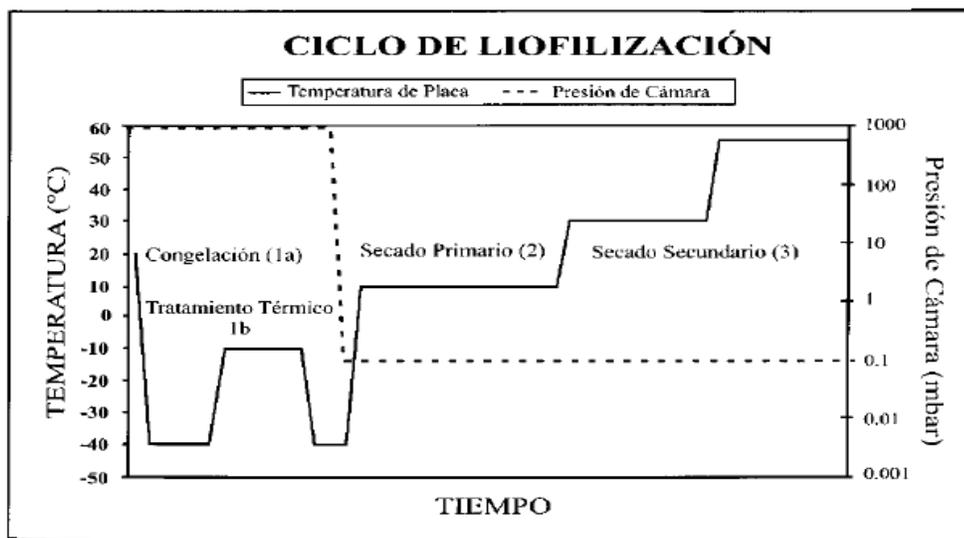
1.3.8.4 Indicadores de temperatura y presión. La medición de la temperatura y presión durante el proceso, es esencial para tener una calidad alta del producto, durante el proceso es posible, mediante un manómetro y un termómetro.

1.3.9 Material auxiliar. Existe más de un material que se puede emplear alternativamente en el equipo de secado y que podría servir para una aplicación específica.

Acero Inoxidable 316: ya que se maneja un producto alimenticio, el material que se utilice en la construcción deberá ser resistente a la corrosión, a la humedad y temperatura con que se esté operando. Siendo el acero inoxidable el material ideal para la construcción del secador.

1.3.10 Termodinamica del proceso de liofilización. Cada producto debe de ser congelado de una manera tal que garantice que sufrira pocas alteraciones en el proceso posterior a la sublimacion. Se debe conocer con precision: la temperatura con que ocurre la maxima solidificacion, la velocidad optima de enfriamiento, y la temperatura minima de fusion incipiente. Se busca que el producto ya congelado tenga una estructura solida sin intersticios en los que haya liquido concentrado para proporcionar que todo el secado ocurra por sublimacion.

Cuando en el proceso de liofilizacion se comienza el calentamiento empieza a formarse un frente de sublimacion o interfase entre la capa seca y la capa congelada del producto.



FUENTE: CICLO DE LIOFILIZACIÓN: www.ehowenespanol.com 2013

Fig. 1.3.10-1. Ciclo de la liofilización.

1.4 Diseño de ingeniería.

El diseño consiste en especificar el tamaño, temperatura, tiempo, presión, calor necesario, materiales y todo cuanto sea posible para realizar el proceso de liofilización, cumpliendo establemente con las condiciones de secado por liofilización.

Para lo cual en la práctica fue necesario cuantificar las variables del proceso las cuales son:

- Tiempo de secado
- Humedad
- Velocidad de secado

Con esta información se podrá determinar:

- Las dimensiones del equipo
- Material de construcción
- Requerimiento eléctrico

El diseño de la cámara se realizará teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Capacidad de la cámara
- Producto a procesar
- Presión al interior de la cámara.

1.4.1 Material

El Codex Alimentarius Comité en el documento Internacional Code of Practice – General Principles of Food Hygiene (1997), establece que todo equipo y utensilios empleados en las áreas de manipulación de productos alimenticios y que puedan entrar en contacto con ellos, deben de ser de material que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores, sea inobservante, resistente a las operaciones de limpieza y desinfección y resistente a la corrosión. Las superficies habrán de ser lisas y estar exentas de poros y grietas.

En el caso de la industria alimenticia, el material más recomendado, es el acero inoxidable, especialmente para las superficies que entran en contacto con los alimentos. La característica de ser pulido fácilmente, lo señala como el ideal para obtener una superficie lisa y de fácil limpieza.

En general los tipos AISI 304 Y 316 son los más recomendados. Cuando hay que hacer soldaduras es más recomendado el tipo AISI 304, para evitar corrosión inter-granular, especialmente para los procesos de limpieza.

La composición química del acero inoxidable AISI 316 y 304 aparece en el anexo V.

1.4.2 Formas de la cámara.

Los parámetros a tomar en cuenta para el dimensionamiento de la cámara son:

- Función de la cámara, además que puede ser evacuada
- Resistencia necesaria para soportar las diferentes presiones
- Forma en la cual el material se pueda conseguir con el comercio.

Las dos formas principales de cámaras son cúbicas y cilíndricas:

La forma elegida para la cámara es la **CILÍNDRICA**, pues es la más adecuada para el vacío, ya que ofrece dos ventajas técnicas:

- La relación volumen contenido / área exterior del recipiente, es la mayor para recipientes de sección circular.
- La sección circular tiene mayor resistencia para soportar la presión exterior que es igual a la presión atmosférica máxima.

Esta geometría requiere de menor área de material empleado y debido a la resistencia de la sección transversal, el menor espesor, gracias a esto se emplea menor volumen de material, lo cual es importante cuando se construye el cilindro a partir de una lámina.

1.4.3 Tamaño de la Cámara.

Al establecer el tamaño de la cámara se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Capacidad de la cámara
- Área de las bandejas
- Número de bandejas
- Espacio entre las bandejas
- Espesor de las bandejas
- Volúmenes de la cámara
- Diámetros de la cámara

1.4.4 Forma y espesor de la tapa de la cámara.

La tapa es de forma circular, la cual debe poseer tuercas que aseguren el sellado al vacío. Es importante mencionar que debe presentar un sello hermético, que evite el ingreso de aire en la cámara de vacío.

1.4.5 Aislamiento de la cámara.

Al interior de la cámara la temperatura estará a temperatura ambiente tomando en cuenta que el equipo no posee un sistema de congelación al iniciar la operación de liofilización. 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 varios factores. Entre los más importantes son:

- Su naturaleza
- Su densidad
- El espesor
- La forma en que se aplique (inyección o en lámina)

Algunos materiales aislantes son: la fibra de vidrio, el poliestireno expandido o extruido, el poliuretano, 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

1.4.6 Presión de trabajo.

Este valor es el que determina el tipo de bomba que se debe utilizar. También puede dar una indicación de la importancia relativa de los fenómenos de desorción.

La presión mínima requerida para el proceso de liofilización propuesta para el diseño del equipo es de -1 psi, ya que se ha encontrado que la velocidad de secado en función de la presión pasa por un máximo a una presión comprendida generalmente entre -1 y -20 psi.

1.4.7 Volumen de la cámara.

En un sistema de vacío, lo que se busca es llegar en un determinado volumen, a una concentración muy pequeña de moléculas.

Así como el tiempo de bombeo, el volumen de la cámara determina la capacidad total del grupo.

1.4.8 Bomba al vacío.

De acuerdo con las anteriores condiciones se han seleccionado diferentes tipos de bombas que proporcionan las características necesarias para realizar el vacío dentro de la cámara.

1.4.9 Manto eléctrico.

El equipo de liofilización consta de un manto eléctrico, que permite que la transferencia de calor ocurra en todas las bandejas del liofilizador homogéneamente.

Los intercambiadores de calor de placas deben permitir manejar diferentes viscosidades, temperaturas, calidad de líquidos y presiones. El acero inoxidable 304, 316, 317, titanio, níquel, aleaciones 825, son algunas de las alternativas ofrecidas para el conformado de las mismas. Tanto juntas como conexiones y materiales se adecuan a cada requerimiento.

1.5 Parámetros de Valoración

CUADRO 1.5-1
Parámetros de Valoración.

VARIABLES	INDICADORES
Temperatura de. Proceso.	°C
Humedad inicial de la carga.	% humedades.
Humedad final del producto.	% humedades.
Presión interna del Liofilizador.	At
Temperatura de la cámara.	°C
Temperatura de evaporación.	°C
Temperatura de condensación.	°C
Temperatura de. Proceso.	°C
Humedad inicial de la carga.	% humedades.
Humedad final del producto.	% humedades.
Determinación final de azúcares.	% azúcares

FUENTE: LABORATORIOS DE OPERACIONES UNITARIAS: FLORES, L./ NUÑEZ, D., 2013

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Simulación del proceso de secado por liofilización para la remolacha azucarera (*Beta vulgaris var. saccharifera*)

Para la simulación del proceso de secado por liofilización de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris var. saccharifera*) fue necesario realizar un secado convencional utilizando un secador de bandejas ubicado en el laboratorio de OPERACIONES UNITARIAS de la ESPOCH.

Fue preciso seleccionar un producto fresco y de características organolépticas adecuadas, es decir que no presente ninguna novedad. Establecido el producto a secar fue necesario cortarlo en cuadros para poder distribuirlo correctamente a lo largo de la bandeja a secar.

- **CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE SECADO (REMOLACHA AZUCARERA).**

Propiedades nutricionales antes del proceso de secado.

CUADRO 2.1-1
Composición nutricional por cada 100g de remolacha.

Calorías	43
Agua	87,58 g
Carbohidratos	9,56 g
Grasas	0,17 g
Proteínas	1,61 g
Fibra	2,8 g
Cenizas	1,08 g
Calcio	16 mg
Potasio	325 mg
Fósforo	40 mg
Sodio	78 mg
Hierro	0,80 mg
Tiamina	0,031 mg
Riboflavina	0,040 mg

Niacina	0,334 mg
Ácido ascórbico	4,9 mg

FUENTE: JAMES, A., 1983. Handbook of Energy Crops

Propiedades nutricionales después del proceso de secado.

Al obtener 0,03749 kg de remolacha seca procesada en el secador de bandejas, se analizó en el Laboratorio de Bromatológico de la Facultad de Salud Pública de la ESPOCH, se obtuvo los siguientes resultados:

CUADRO 2.1-2
Contenido nutricional remolacha deshidratada.

ANÁLISIS	RESULTADOS (g)
Cenizas	5,08
Proteína	3,4
Extracto Etéreo	1,7
Fibra	24,1
Extracto no nitrogenado	39,32
Sólidos totales	73,6
Carbohidratos totales	37,0

FUENTE: LABORATORIO BROMATOLOGÍA ESPOCH., 2013.

Se procede a explicar en el cuadro 2.1-3 el procedimiento a realizarse para la determinación de humedad en la remolacha azucarera, mediante la utilización de un secador de bandejas.

CUADRO 2.1-3
Determinación de la Humedad contenida en la remolacha.

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
<p>Se define como la cantidad de agua contenida en la Remolacha.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cápsula de porcelana • Balanza analítica • Secador de bandejas • Papel aluminio 	<ul style="list-style-type: none"> • La determinación debe realizarse por duplicado sobre la misma muestra. • Tarar la balanza. • Pesar 300 g, de muestra. • Tomar el peso inicial de la muestra, colocarla a lo largo de una de las bandejas y dejar secar por media hora a 60°C. • Retírese la bandeja del secador y proceder a pesar. • Repetir hasta obtener un peso constante el cual nos indica que el sólido se encuentra totalmente seco. 	$\varphi_s = \frac{M_W - M_S}{M_S}$ <p>Donde:</p> <p>φ_s = Contenido de humedad en base seca (kg agua/ kg sólido seco)</p> <p>M_W = Peso del sólido húmedo (kg agua)</p> <p>M_S = Peso sólido seco (kg sólido seco)</p>

FUENTE: FLORES, L./ NUNEZ, D., 2013

2.2 Datos experimentales obtenidos para el simulador de secado

Luego de 13 horas que duró el proceso de secado de la remolacha azucarera se obtuvieron los siguientes datos experimentales:

TABLA 2.2-1
Datos experimentales obtenidos del simulador (tiempo y peso).

Tiempo (h)	Peso (kg)						
0	0,30028	4	0,19153	8,25	0,07611	12,25	0,03749
0,25	0,29593	4,50	0,17622	8,5	0,07049	12,5	0,03748
0,5	0,29127	4,75	0,16837	8,75	0,06589	12,75	0,03748
0,75	0,28615	5	0,16025	9	0,06134	13	0,03748
1	0,28098	5,25	0,15246	9,25	0,05733		
1,25	0,27418	5,5	0,14465	9,5	0,05421		
1,5	0,2672	5,75	0,13815	9,75	0,05119		
1,75	0,26023	6	0,13114	10	0,04818		
2	0,25288	6,25	0,12381	10,25	0,04612		
2,25	0,24463	6,5	0,11623	10,5	0,04352		
2,5	0,23592	6,75	0,10999	10,75	0,04141		
2,75	0,22872	7	0,10376	11	0,04054		
3	0,22036	7,25	0,09826	11,25	0,03968		
3,25	0,21347	7,5	0,09287	11,5	0,03893		
3,5	0,20636	7,75	0,08743	11,75	0,03823		
3,75	0,19911	8	0,0818	12	0,03752		

FUENTE: FLORES, L., /NUÑEZ, D., 2013

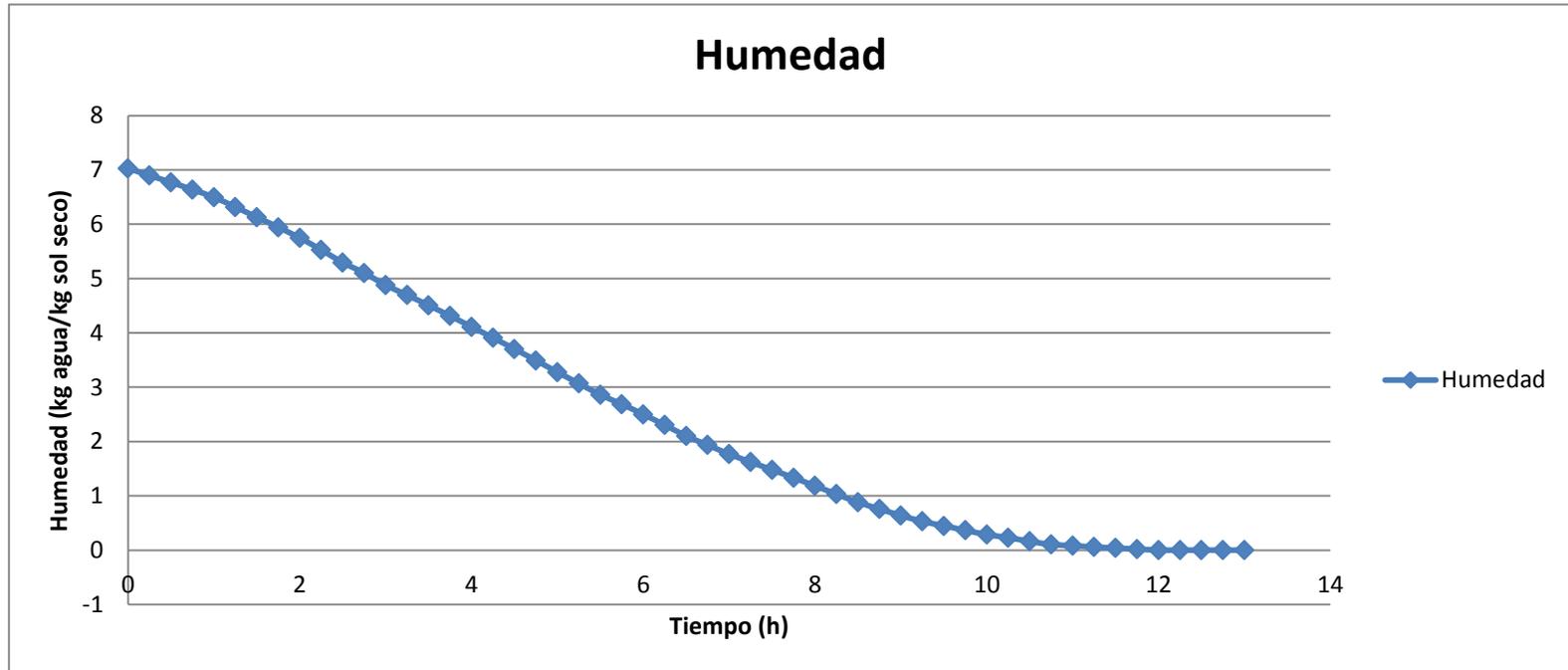
TABLA 2.2-2
Datos experimentales obtenidos del simulador (tiempo y humedad).

Tiempo (h)	Humedad (kg agua/kg sol seco)	Tiempo (h)	Humedad (kg agua/kg sol seco)	Tiempo (h)	Humedad (kg agua/kg sol seco)	Tiempo (h)	Humedad (kg agua/kg sol seco)
0	7,02887701	4	4,110192102	8,25	1,030683031	12,25	0
0,25	6,89567769	4,50	3,908217716	8,5	0,880736393	12,5	0
0,5	6,77134472	4,75	3,701707577	8,75	0,758004269	12,75	0
0,75	6,63473853	5	3,49226254	9	0,63660619	13	0
1	6,49679829	5,25	3,275613661	9,25	0,529615795		
1,25	6,3153682	5,5	3,067769477	9,5	0,446371398		
1,5	6,12913554	5,75	2,859391676	9,75	0,365795091		
1,75	5,94316969	6	2,685965848	10	0,285485592		
2	5,7470651	6,25	2,498932764	10,25	0,230522946		
2,25	5,52694771	6,5	2,303361793	10,5	0,161152615		
2,5	5,2945571	6,75	2,101120598	10,75	0,104855923		
2,75	5,10245464	7	1,934631804	11	0,081643543		
3	4,87940235	7,25	1,768409819	11,25	0,058697972		
3,25	4,69557097	7,5	1,621664888	11,5	0,0386873		
3,5	4,5058698	7,75	1,477854856	11,75	0,020010672		
3,75	4,3124333	8	1,332710779	12	0,001067236		

FUENTE: FLORES, L., /NÚÑEZ, D., 2013

Realizando la curva de humedad tiempo vs peso se tiene la siguiente gráfica:

Gráfico 2.2-1
Humedad de la Remolacha



FUENTE: FLORES, L., /NUÑEZ, D., 2013

Para la velocidad de secado se obtuvo los siguientes datos:

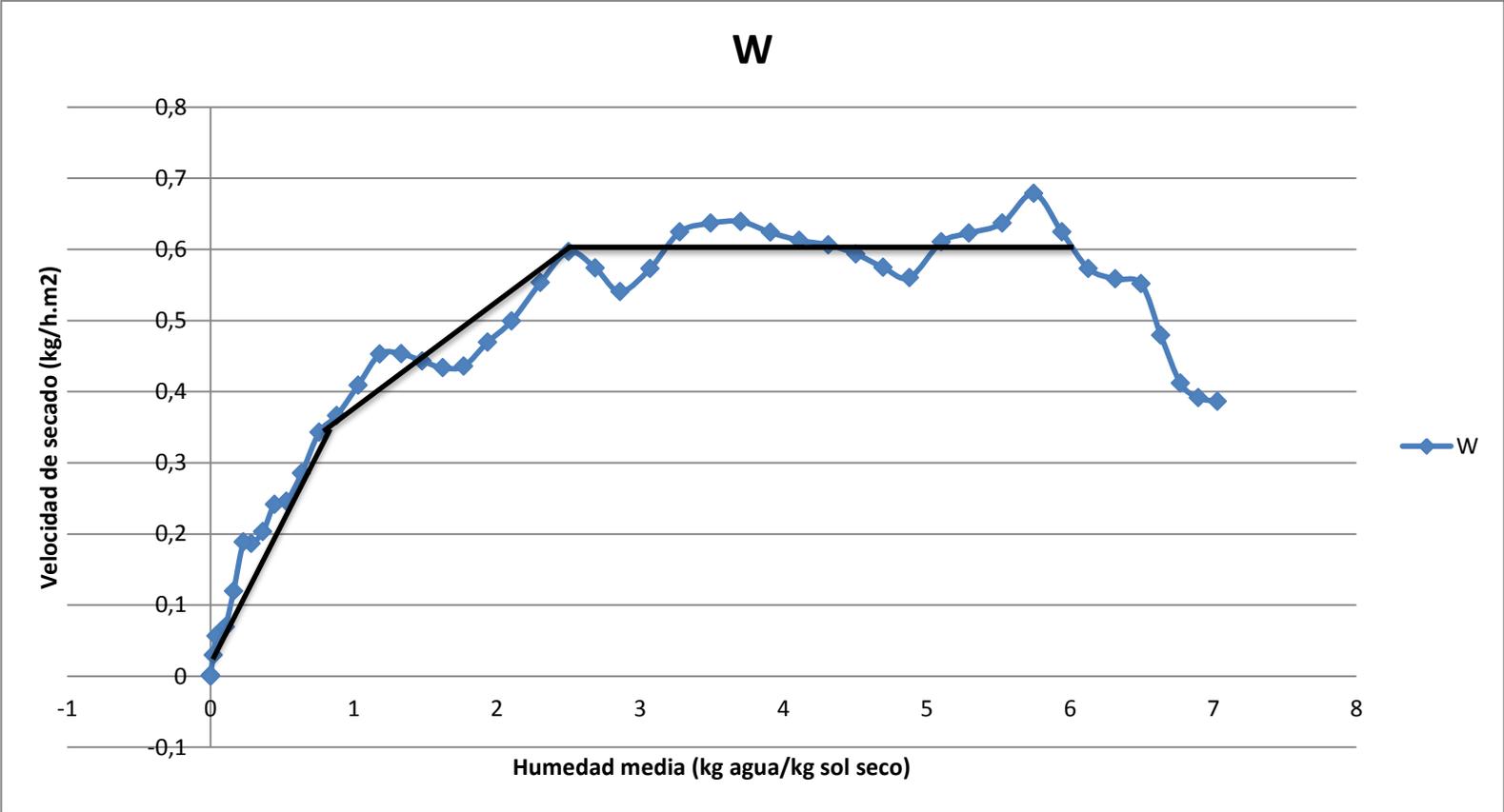
TABLA 2.2-3
Datos experimentales obtenidos en el simulador (Velocidad de secado)

W (kg/h.m ²)	Humedad media (kg agua/kg sol seco)	W (kg/h.m ²)	Humedad media (kg agua/kg sol seco)	W (kg/h.m ²)	Humedad media (kg agua/kg sol seco)	W (kg/h.m ²)	Humedad media (kg agua/kg sol seco)
0,38629843	6,96227735	0,61272679	4,00920491	0,45264141	1,10659018	12,25	0,00066702
0,39140875	6,83351121	0,62393276	3,80496265	0,40901814	0,95570971	12,5	0,0001334
0,41181964	6,70304162	0,63914088	3,59698506	0,3661953	0,81937033	12,75	0
0,4790555	6,56576841	0,63673959	3,3839381	0,34258271	0,69730523	13	0
0,55149413	6,40608324	0,62433298	3,17169157	0,28535219	0,58311099		
0,55829776	6,22225187	0,57270544	2,96358058	0,24573106	0,4879936		
0,57310566	6,03615261	0,54068837	2,77267876	0,24132871	0,40608324		
0,62433298	5,8451174	0,57390608	2,59244931	0,20290822	0,32564034		
0,67876201	5,6370064	0,59671825	2,40114728	0,18649947	0,25800427		
0,63673959	5,4107524	0,55309498	2,2022412	0,18850053	0,19583778		
0,62273212	5,19850587	0,49906617	2,0178762	0,11926361	0,13300427		
0,61032551	4,9909285	0,46945037	1,85152081	0,06923693	0,09324973		
0,56029883	4,78748666	0,43583244	1,69503735	0,06443436	0,07017076		
0,57470651	4,60072038	0,43343116	1,54975987	0,05803095	0,04869264		
0,59351654	4,40915155	0,44303629	1,40528282	0,0564301	0,02934899		
0,60632337	4,2113127	0,45304162	1,25760406	0,0296158	0,01053895		

FUENTE: FLORES, L./ NUÑEZ, D., 2013

Al realizarse la curva de velocidad se obtuvo la gráfica 2:

GRÁFICA 2.2-2
Velocidad de secado de la remolacha.



FUENTE: FLORES, L., /NUÑEZ, D., 2013

2.3 Identificación de las variables de proceso

La humedad, velocidad y tiempo de secado para el proceso de secado para la remolacha, se determinó aplicando los conocimientos teóricos y experimentales sobre el secado y sus fundamentos. El cual se realizó en un secador de bandejas con un área de secado de. Para proceder a ensayar cual es la humedad y velocidad de secado óptima necesaria para la liofilización de la remolacha, se adoptó el siguiente método:

CUADRO 2.3-1
Datos obtenidos del simulador, comportamiento del secado método gráfico.

PARÁMETRO	RESULTADO
Humedad crítica (kg agua/kg sol seco)	2,49
Humedad equilibrio (kg agua/kg sol seco)	0,020
Velocidad constante de secado (kg/h.m ²)	0,60
Velocidad decreciente de secado (kg/h.m ²)	0,22
Velocidad total de secado (kg/h.m ²)	0,82
Tiempo anticrítico (h)	4,31
Tiempo proscritico (h)	8,2
Tiempo total de secado (h)	12,51

FUENTE: FLORES, L./ NUÑEZ, D., 2013

CUADRO 2.3-2
Datos obtenidos del simulador, comportamiento del secado método analítico.

PARÁMETRO	RESULTADO
Tiempo proscritico (h)	1,84
Tiempo proscritico área bajo la curva (h)	6,16
Tiempo total proscritico (h)	8
Tiempo anticrítico (h)	4,31
Tiempo total de secado (h)	12,31

FUENTE: FLORES, L., /NUÑEZ, D., 2013

El valor calculado es considerablemente igual al encontrado en la gráfica.

CAPÍTULO III
CÁLCULOS
Y
RESULTADOS

3 CÁLCULOS Y RESULTADOS

3.1 Cálculos

3.1.1 Dimensionamiento y carga.

- Altura de la estantería.

$$h = etb + eb + eme$$

Ecuación 3.1.1-1

$$h = 6,5 + 12,1 + 10,5 \text{ cm}$$

$$h = 29,5 \text{ cm}$$

Donde:

h = altura de la estantería

etb = espesor total de bandejas

eb = espaciamiento total entre bandejas

eme = espaciamiento del manto eléctrico.

Las estanterías tendrán unos soportes cuyo espesor no será mayor a 1 cm. Tomando en cuenta la altura de la cámara de 29,5 cm, su diámetro será de 29,5 cm con un radio de 14,75 cm, con lo cual el volumen será de 0,032 m³ y un área de 0,58 m².

- Dimensionamiento de las bandejas.

Bandejas Grandes. Donde se colocaron 24 rebanadas de remolacha con un diámetro promedio de 5,8 cm, teniendo un área de 616,58 cm², pero se ha procedido a que tenga el doble de área calculada entonces:

$$A = b \times h$$

Ecuación 3.1.1-2

$$A = 27 \times 38$$

$$A = 1026 \text{ cm}^2$$

Donde:

A = área de la bandeja

b = base

h = altura

- Volumen de la cámara.

En un sistema de vacío, lo que se busca es llegar en un determinado volumen, a una concentración muy pequeña de moléculas.

Así como el tiempo de bombeo, el volumen de la cámara determina la capacidad total del grupo.

El volumen de la cámara es:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

Ecuación 3.1.1-3

$$V = \pi \times 14,75^2 \times 48$$

$$V = 0,032 \text{ m}^3$$

Donde:

V = volumen

r = radio

h = altura

Como la cámara es cilíndrica se debe establecer una válvula de bola centrada, para controlar el vacío.

CUADRO 3.1-1

Parámetros de dimensionamiento de la cámara cilíndrica.

Capacidad de la cámara	5 Kg		
Volumen	Externo	Interno	
	0,035 m ³	0,032 m ³	
Diámetro	Externo	Interno	
	38,5 cm	29,5 cm	
Área de las bandejas	Grande 1	Grande 2	Pequeña
	1026 cm ²	1026 cm ²	646 cm ²
Espacio entre bandejas	9 cm	5 cm	5 cm
Espesor de las bandejas	0,2 cm	0,2 cm	0,2 cm
Número de bandejas	2 bandejas grandes y 1 pequeña		

Fuente: FLORES, L., /NUNEZ, D., 2013

3.1.2 Cálculos de Ingeniería

- **Periodo constante o anticrítico (Para calcular la velocidad constante).**

Haciendo uso de la ecuación 3 y de la tabla 23 y el gráfico 4se tendrá:

$$W_c = \frac{S}{A} - \frac{\Delta x}{\Delta \theta}$$

$$W_c = 0,313 \frac{3,54 - 1,48}{1,50}$$

$$W_c = 0,388 \text{ kg/hm}^2$$

- **Para calcular el tiempo de secado en condiciones constantes.**

Haciendo uso de la ecuación 4 y de la tabla 23,24 y el gráfico 5 se tendrá:

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

$$\theta_a = 0,313 \frac{3,54 - 1,48}{0,388}$$

$$\theta_a = 1,66 \text{ h}$$

- **Periodo poscrítico o decreciente.**

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

$$\theta_p = 0,313 \frac{1,48 - 0,61}{0,388 - 0,057} \ln \frac{0,388}{0,057}$$

$$\theta_p = 0,313 \frac{0,87}{0,331} 1,92$$

$$\theta_p = 0,313 \frac{0,87}{0,331} 1,92$$

$$\theta_p = 1,58 \text{ h.}$$

- **El tiempo total de secado.**

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

$$\theta_T = 1,66 + 2,58$$

$$\theta_T = 4,24 \text{ h.}$$

El tiempo de los puntos D y E se lo realiza mediante el área bajo la curva con lo cual se obtiene $\theta_p = 1,001$.

$$\theta_p = 1,58 + 1,001$$

$$\theta_p = 2,58 \text{ h.}$$

- **Cantidad de calor necesario para calentar la base seca de 20°C a 65°C.**

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

Ecuación 3.1.2-1

$$Q = 0,1554 \times 0,2898 \times 45$$

$$Q = 2,0265 \text{ Kcal.}$$

Donde:

Q = calor necesario para calentar la base (Kcal)

m = masa del producto a secar (kg)

Cp = calor calorífico (kcal/kg°C)

ΔT = diferencia de temperaturas (°C)

- **Calor cedido por el producto durante la congelación de 20°C a -0,9°C.**

$$Q_1 = m \times Cp \times \Delta T$$

Ecuación 3.1.2-2

$$Q_1 = 0,14 \times 3,76 \times 19,01$$

$$Q_1 = 2,40 \text{ Kcal.}$$

Donde:

Q_1 = calor cedido por el producto (Kcal)

m = masa del producto a congelar (kg)

Cp = calor calorífico (kcal/kg°C)

ΔT = diferencia de temperaturas (°C)

- **Calor cedido por el producto durante la congelación.**

$$Q_2 = m \times \lambda$$

Ecuación 3.1.2-3

$$Q_2 = 0,14 \times 297,73$$

$$Q_2 = 9,95 \text{ Kcal.}$$

Donde:

Q_2 = calor cedido por el producto durante la congelación (Kcal)

m = masa del producto a congelar (kg)

λ = calor latente de solidificación (kJ/kg)

- **Calor a retirar del producto.**

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

Ecuación 3.1.2-4

$$Q_{\text{producto}} = 2,40 + 9,95$$

$$Q_{\text{producto}} = 12,35 \text{ Kcal.}$$

Donde:

Q_1 = calor cedido por el producto (Kcal)

Q_2 = calor cedido por el producto durante la congelación (Kcal)

- **Calor cedido por el aire presente en la cámara del liofilizador de 20°C a 65°C.**

$$Q_{\text{aire}} = M_{\text{aire}} H_2 - H_1$$

Ecuación 3.1.2-5

$$Q_{\text{aire}} = M_{\text{aire}} 254,73 - 209,17$$

Donde:

Q_{aire} = calor cedido por el aire (Kcal)

M_{aire} = masa del aire (kg)

U_2 = entalpía a la salida (KJ/Kg)

U_1 = entalpía a la entrada (KJ/Kg)

- **Entalpía en función de la energía interna.**

$$H_1 = U + PxV$$

Ecuación 3.1.2-6

$$H_1 = 209,17 + 79,35x0,032$$

$$H_1 = 211,70 \text{ KJ/Kg}$$

Donde:

H_1 =entalpía a la entrada del aire (Kj/Kg)

U_1 = energía interna del aire a la entrada (KJ/Kg)

P = presión de entrada (N/m²)

V = volumen de la cámara de liofilización (m³)

$$H_2 = 252,65 \text{ KJ/Kg}$$

- **Masa del aire**

$$M_{\text{aire}} = \frac{V}{V_e}$$

Ecuación 3.1.2-7

Donde:

M_{aire} = masa del aire (kg)

V = volumen de la cámara (m³)

V_e = volumen específico del aire (m³/kg)

- **Volumen específico del aire**

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

Ecuación 3.1.2-8

$$V_e = \frac{8,314 \times 293,15}{0,746e5 \times 28,84e3}$$

$$V_e = 1,13 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Donde:

V_e = volumen específico (m^3)

R = constante de los gases (J/mol^0K)

T = temperatura (0K)

P = Presión atmosférica (Pa)

M_m = masa molecular del aire (kg/mol)

Sustituyendo en la ecuación 26:

$$M_{aire} = \frac{V}{V_e}$$

$$M_{aire} = \frac{0,032}{1,13}$$

$$M_{aire} = 0,028 \text{ kg.}$$

Sustituyendo en la ecuación 25:

$$Q_{aire} = M_{aire} H_2 - H_1$$

$$Q_{aire} = 0,028 \ 252,65 - 211,70$$

$$Q_{aire} = 1,14 \text{ Kcal}$$

- **Calor cedido por las paredes del liofilizador.**

$$Q_{paredes} = q \cdot A$$

Ecuación 3.1.2-9

$$Q_{paredes} = 8 \times 0,58$$

$$Q_{paredes} = 110,8 \text{ kcal}$$

Donde:

$Q_{paredes}$ = calor cedido por las paredes del liofilizador

q = calor que atraviesa las paredes con aislamiento (8 W/m^2)

A = área de la cámara de liofilización

- **Calor cedido por las bandejas.**

$$Q_{bandejas} = m \times Cp \times \Delta T$$

Ecuación 3.1.2-10

$$Q_{bandejas} = 2,17 \times 0,46 \times 318$$

$$Q_{bandejas} = 75,54 \text{ Kcal.}$$

Donde:

$Q_{bandejas}$ = calor cedido por las bandejas (Kcal)

m = masa de las bandejas (kg)

Cp = capacidad calorífica del Acero AIS 316 ($\text{KJ/Kg}^0\text{K}$)

ΔT = diferencia de temperaturas (^0K)

- **Calor total cedido.**

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

Ecuación 3.1.2-11

$$Q_{Total} = 110,8 + 1,14 + 75,54 + 4,64$$

$$Q_{Total} = 462,44 \text{ Kcal.}$$

- **Coefficiente global de transferencia de Energía en el liofilizador.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + Rm}$$

Ecuación 3.1.2-12

$$U = \frac{1}{\frac{1}{14,64} + 1,15e^{-4}}$$

$$U = 14,57 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Donde:

U = coeficiente global de transferencia de energía (W/m²C)

h_i = coeficiente de radiación y convección del medio circulante (W/m²C)

Rm = resistencia del acero AIS 316.

- **Potencia de la bomba.**

$$P = H_B \times \delta \times g \times Q$$

Ecuación 3.1.2-13

$$P = 0,90 \times 1,20 \times 9,80 \times 5,28$$

$$P = 55,88 \frac{\text{Kgm}^2}{\text{s}^2}$$

Donde:

P = potencia de la bomba (kgm²/s²)

H_B = altura dinámica de los accesorios (m)

δ = densidad del aire a la entrada 20°C (kg/m³)

g = gravedad (m/s²)

$Q = \text{caudal del aire (m}^3/\text{s)}$

Considerando la equivalencia de $1\text{HP} = 745 \text{ W}$

$$HP = \frac{55,88}{745}$$

$$HP = 0,075$$

Eficiencia de la bomba = 85%

Potencia real de la bomba

$$HP \text{ real} = \frac{0,075}{0,85}$$

$$HP \text{ real} = 0,2$$

Por lo tanto la potencia teórica de la bomba sería el 0,2 HP, pero como siempre se da un margen de error entonces, se tendrá que escoger una bomba de potencia mayor 0,5 HP, así mismo el motor debe ser de 0,5 HP.

- ***Eficiencia de la bomba al vacío.***

$$Eficiencia \text{ bomba} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{P}$$

Ecuación 3.1.2-14

$$Eficiencia \text{ bomba} = \frac{9,42}{11,52} \times 100$$

$$Eficiencia \text{ bomba} = 84,5\%$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$ = Presi3n al vac3o m\acute{a}ximo cuando est\acute{a} cerrado (psi)

P = Presi3n atmosf\acute{e}rica (psi)

- **Rendimiento del proceso de secado por liofilizaci3n.**

$$Eficiencia\ liofilizador = \frac{Peso\ final\ del\ secado}{Peso\ inicial\ del\ secado} \times 100$$

Ecuaci3n 3.1.2-15

$$Eficiencia\ liofilizador = \frac{1106}{1229} \times 100$$

$$Eficiencia\ liofilizador = 89,90\%$$

- **Sistema de control del liofilizador.**

Naturalmente es deseable que todas las operaciones de regulaci3n de temperatura, presi3n y de vac3o se hagan de manera autom\acute{a}tica, dado que por la duraci3n de las operaciones de liofilizaci3n, ser3a necesario vigilar permanentemente el equipo.

El control del equipo est\acute{a} dado por:

- Control ON/OFF tanto para la bomba de vac3o como para el motor
- Indicador de temperatura y presi3n manom\acute{e}trica

3.2 Resultados

TABLA 3.2-1

Datos experimentales de Humedad obtenidos en el liofilizador.

Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (g)	Peso (kg)	Humedad	H. media
0	0	155,4	0,1554	3,82608696	3,67701863
15	0,25	145,8	0,1458	3,52795031	3,34006211
30	0,5	133,7	0,1337	3,15217391	2,9378882
45	0,75	119,9	0,1199	2,72360248	2,54968944
60	1	108,7	0,1087	2,3757764	2,26863354
75	1,25	101,8	0,1018	2,16149068	2,03726708
90	1,5	93,8	0,0938	1,91304348	1,79192547
105	1,75	86	0,086	1,67080745	1,48757764
120	2	74,2	0,0742	1,30434783	1,16149068
135	2,25	65	0,065	1,01863354	0,95962733
150	2,5	61,2	0,0612	0,90062112	0,80590062
165	2,75	55,1	0,0551	0,71118012	0,61024845
180	3	48,6	0,0486	0,50931677	0,41614907
195	3,25	42,6	0,0426	0,32298137	0,2484472
210	3,5	37,8	0,0378	0,17391304	0,14130435
225	3,75	35,7	0,0357	0,10869565	0,05900621
240	4	32,5	0,0325	0,00931677	0,00776398
255	4,25	32,4	0,0324	0,00621118	0,00310559
270	4,5	32,2	0,0322	0	0
285	4,75	32,2	0,0322	0	0

Fuente: FLORES,L., /NUNEZ, D., 2013

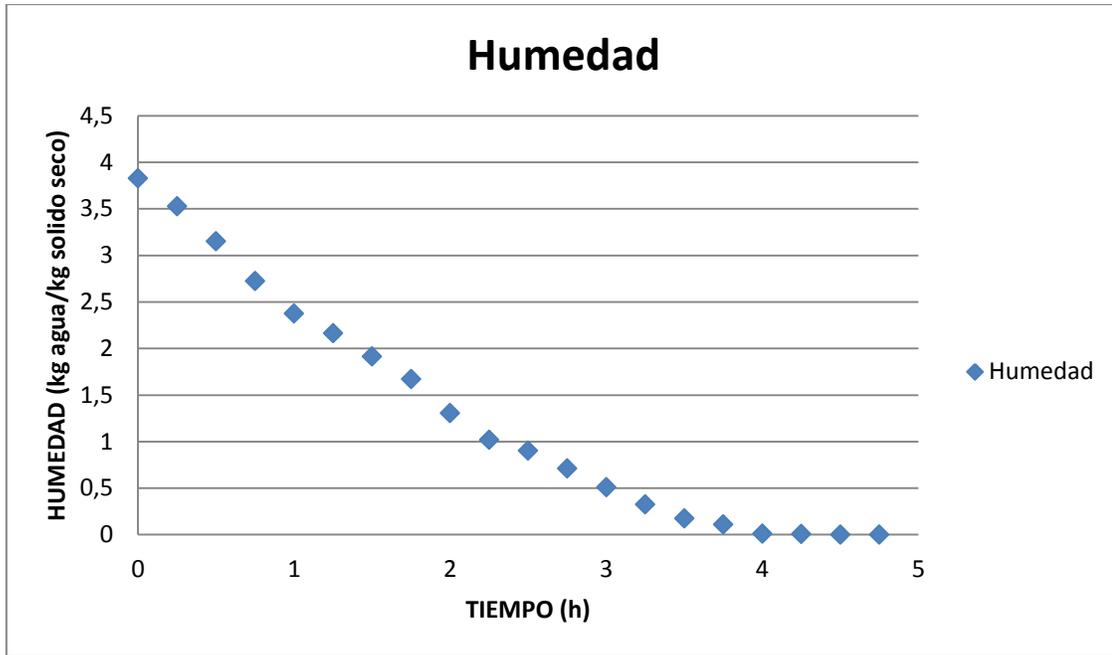
TABLA 3.2-2**Datos experimentales de velocidad de secado obtenidos en el liofilizador.**

Humedad	H. media	Dx	Dt	S/A	W
3,82608696	3,67701863	0,33695652	0,25	0,313	0,42186957
3,52795031	3,34006211	0,40217391	0,25	0,313	0,50352174
3,15217391	2,9378882	0,38819876	0,25	0,313	0,48602484
2,72360248	2,54968944	0,2810559	0,25	0,313	0,35188199
2,3757764	2,26863354	0,23136646	0,25	0,313	0,28967081
2,16149068	2,03726708	0,24534161	0,25	0,313	0,3071677
1,91304348	1,79192547	0,30434783	0,25	0,313	0,38104348
1,67080745	1,48757764	0,32608696	0,25	0,313	0,40826087
1,30434783	1,16149068	0,20186335	0,25	0,313	0,25273292
1,01863354	0,95962733	0,15372671	0,25	0,313	0,19246584
0,90062112	0,80590062	0,19565217	0,25	0,313	0,24495652
0,71118012	0,61024845	0,19409938	0,25	0,313	0,24301242
0,50931677	0,41614907	0,16770186	0,25	0,313	0,20996273
0,32298137	0,2484472	0,10714286	0,25	0,313	0,13414286
0,17391304	0,14130435	0,08229814	0,25	0,313	0,10303727
0,10869565	0,05900621	0,05124224	0,25	0,313	0,06415528
0,00931677	0,00776398	0,00465839	0,25	0,313	0,0058323
0,00621118	0,00310559	0,00310559	0,25	0,313	0,0038882
0	0	0	0,25	0,313	0
0	0	0	0,25	0,313	0

Fuente: FLORES, L., /NUNEZ, D., 2013

GRÁFICO 3.2-1

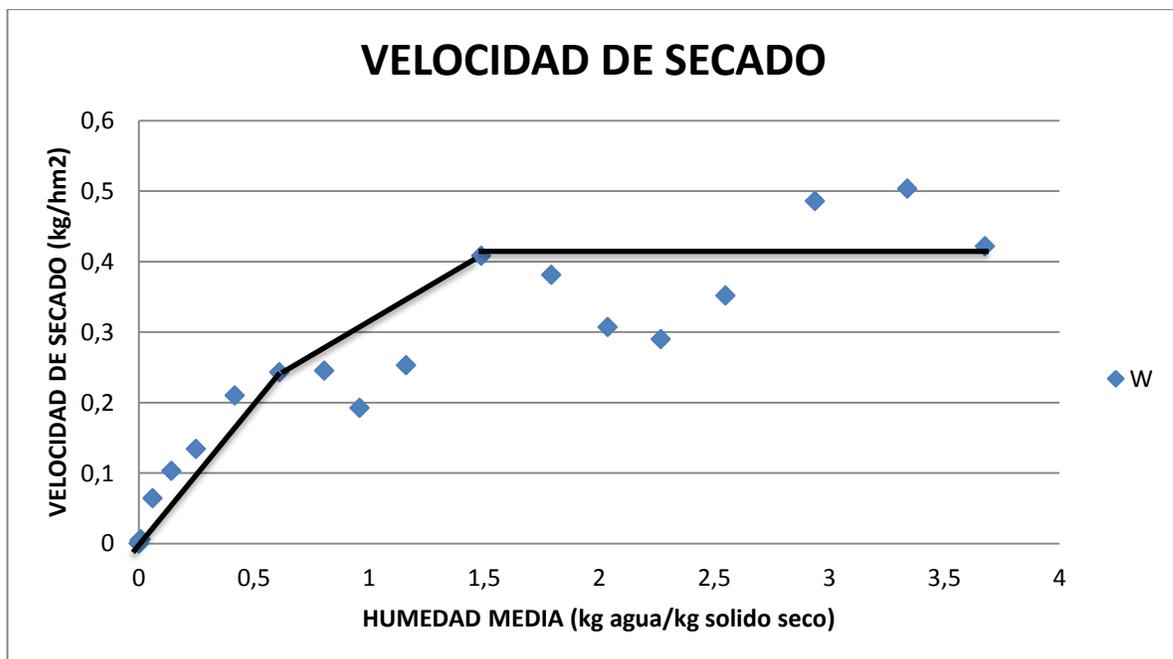
Curva de Humedad obtenido en el liofilizador (Toma de datos cada 15 min).



Fuente: FLORES,L., /NUÑEZ, D., 2013

GRÁFICO 3.2-2

Velocidad de secado obtenido en el liofilizador (Toma de datos cada 15 min).



Fuente: FLORES,L., /NUÑEZ, D.,

Al obtener 0,03749 kg de remolacha seca procesada en el secador de bandejas, se analizó en el Laboratorio de Bromatológico de la Facultad de Salud Pública de la ESPOCH, se obtuvo los siguientes resultados:

CUADRO 3.1-1
Contenido nutricional remolacha deshidratada.

ANÁLISIS	RESULTADOS (g)
Cenizas	5,08
Proteína	3,4
Extracto Etéreo	1,7
Fibra	24,1
Extracto no nitrogenado	39,32
Sólidos totales	73,6
Carbohidratos totales	37,0

FUENTE: LABORATORIO BROMATOLOGÍA ESPOCH., 2013.

Al obtener 0,1771 kg de remolacha seca procesada en el secador de bandejas, se analizó en el Laboratorio de Bromatológico de la Facultad de Salud Pública de la ESPOCH, se obtuvo los siguientes resultados:

CUADRO 3.1-2
Contenido nutricional remolacha deshidratada.

ANÁLISIS	RESULTADOS (g)
Cenizas	6,1
Proteína	3,8
Extracto Etéreo	1,2
Fibra	32,2
Extracto no nitrogenado	56,7
Sólidos totales	80,7

Carbohidratos totales	37,0
-----------------------	------

FUENTE: LABORATORIO BROMATOLOGÍA ESPOCH., 2013.

CUADRO 3.2-3
Condiciones de trabajo del Liofilizador.

Nº	CONDICIONES DE TRABAJO	RESULTADO	UNIDAD
1	Temperatura ambiente	20	°C
2	Temperatura bulbo húmedo	17	°C
3	Temperatura de congelación	-0,9	°C
4	Temperatura de la cámara del liofilizador	65	°C
5	Presión manométrica	-0,65	psi
6	Presión atmosférica	11,51	psi
7	Voltaje de corriente eléctrica para la bomba y el motor	110	V
8	Peso de la remolacha congelada	155	G

FUENTE: FLORES,L./ NUNEZ, D., 2013

CUADRO 3.2-4
Resultado de los cálculos de diseño del Liofilizador.

Nº	PARAMETRO	RESULTADO	UNIDAD
1	Velocidad constante de secado	0,388	kg/hm ²
2	Tiempo anticrítico	1,66 h	h
3	Tiempo poscrítico	3,07 h	h
4	Tiempo total de secado	4,73 h	h
5	Velocidad decreciente de secado	0,057	kg/hm ²
6	Velocidad total de secado	0,445	kg/hm ²

FUENTE: FLORES,L./ NUNEZ, D., 2013

CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Una vez identificado las variables que intervienen en el proceso de secado, se realizaron los cálculos necesarios para dimensionar el Liofilizador, y los valores para este fueron: volumen = $0,032\text{m}^3$, diámetro= 29,5 cm, área de las bandejas = 1026 m^2 , por tanto evaluando estos datos indican que el equipo debe trabajar con una bomba de vacío de $\frac{1}{2}$ Hp, debido a la capacidad volumétrica de la cámara cilíndrica y a la carga total establecida en el diseño, con esto la eficiencia del equipo Liofilizador es del 89%, siendo este valor óptimo para la realización del proceso.
- Mediante los cálculos de ingeniería se determinó que se necesita de 1,14 Kcal de aire al interior de la cámara para poder secar 155,5 g de remolacha, por tanto, la variación de temperatura en el interior de la cámara de liofilización es óptima para secar alimentos, debido a su geometría cilíndrica en donde la relación volumen contenido / área exterior del recipiente, es la mayor para recipientes de sección circular y la sección circular tiene mayor resistencia para soportar la presión exterior que es igual a la presión atmosférica máxima.
- En comparación al secador de bandejas en donde el producto se secó en 13 horas, el liofilizador tiene una ligera ventaja al secar debido a que el tiempo total de secado fue de 4,74 con lo que se pudo evidenciar que los nutrientes de la remolacha se mantuvieron iguales al de la remolacha sin secar, comprobando que el secado en un liofilizador mantiene los nutrientes mediante la realización de exámenes bromatológicos, el cual, indica que las propiedades nutricionales de la remolacha se encuentran en mejores condiciones, por lo tanto, se puede conservarla por más tiempo.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se estableció mediante la realización de los respectivos cálculos las variables del proceso donde la humedad inicial fue de 87 % hasta una humedad final del 10 %, con un tiempo de secado de 12,51 horas, una velocidad constante de secado de 0,60 kg/hm², temperatura ambiente de 22⁰C y una presión atmosférica en el interior de la cámara.
- Determinadas las variables iniciales en la experimentación, se diseñó el liofilizador de forma cilíndrica con un volumen de 0,032 m³ por abrasión física de acero inoxidable 316, constituido de 2 bandejas grandes y 1 pequeña perforadas con un área de 1656 cm², indicadores de presión y temperatura, una bomba al vacío de ½ Hp, un motor de 110 V.
- El rendimiento del proceso de secado se define a partir del % en peso contenido de la remolacha al inicio y final del proceso de secado, con lo cual, se obtuvo una eficiencia del 89%.
- En base al tiempo de secado el equipo opera 5 veces más rápido respecto al secador de bandejas, debido a que el tiempo total de secado en el Liofilizador es de 4,75 horas y en el secador de bandejas fue de 13 horas
- El costo total de fabricación del equipo de secado es de 2450 dólares.

5.2 Recomendaciones

- El mantenimiento preventivo es clave para prolongar la vida útil de las máquinas, pero tiene un efecto de mayor importancia, y es evitar daños al recurso más valioso como es el humano.
- Es recomendable que el equipo liofilizador se encuentre operando en un lugar con ventilación para evitar el arrastre de la humedad.
- No es recomendable sobrepasar los parámetros de diseño y funcionamiento durante el proceso de secado como son la temperatura que en el caso de los alimentos es 65°C , la carga no debe ser superior a la establecida ya que puede ocasionar el deterioro de las propiedades del producto.
- Es necesario seguir el manual de funcionamiento, con el mantenimiento pertinente para evitar problemas de deterioro y mal funcionamiento del equipo.

BIBLIOGRAFÍA.

CAPÍTULO I

BIBLIOGRAFÍA.

1. **BADGER., W.,** Introducción a la Ingeniería Química., 1ª ed., Madrid-España., Editorial McGRAW-HILL., 1966., Pp 53-69.
2. **BARBOZA., G.,** Deshidratación de Alimentos., 3ª ed., Zaragoza-España., Editorial Acribia., 2000., Pp 35-40.
3. **BRITO., H.,** Texto Básico de Operaciones Unitarias., 2ª ed., Riobamba-Ecuador., Editorial Escuela Superior Politécnica de Chimborazo., 2001., Pp 45-61.

4. **BROWN., G.,** Operaciones Básicas de la Ingeniería Química.,
2ª ed., Madrid-España., Editorial Marín., 1965., Pp
58-72

5. **FOUST., A.,** Principios de Operaciones Unitarias., 8ª ed.,
México DF-México., Editorial Continental., 2001., Pp
124-141.

6. **GEANCOPLIS., C.,** Proceso de Transporte y Operaciones
Unitarias., 3ª ed., México DF-México., Editorial Continental.,
1988., Pp 180-189.

7. **HUANG., F.,** Ingeniería Termodinámica., 2ª ed., México DF-
México., Editorial Continental S.A., 1993., Pp 65-79.

8. **KENNET., J.,** Termodinámica., 6ª ed., Barcelona-España.,
Editorial MC.GRAW HILL., 2001., Pp 468-486.

9. **McCABE., Y OTROS.,** Operaciones Básicas de Ingeniería
Química., 4ª ed., México DF- México., Editorial
McGRAW-HILL., 1993., Pp 79-86.

10. OCON., J., TOJO., G., Problemas de Ingeniería Química.,
1ª.ed., Madrid-España., Editorial Águila., 1980., Pp
240-275.

11. PERRY., R., Manual del Ingeniero Químico.,3ª ed.,
México DF-México., Editorial McGRAW-HILL., 1995.,
Pp 12-45.

12. TRAYBAL., R., Operaciones de Transferencia de Masa.,
2ª ed., México DF- México., Editorial McGRAW-HILL.,
1998., Pp 59-68.

INTERNET.

13. CURVAS DE SECADO.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87791711>

2013-08-22.

14. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LA REMOLACHA.

<http://prezi.com/kgjdbp5eqnya/remolacha-azucarera/>

2013-08-20.

15. COMPORTAMIENTO GENERAL DEL SECADO.

<http://www.invap.com.ar/es/area-industrial>

2013-08-22.

16. ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN.

<http://geocities.com/iq300uia/opunit17.jpg>

2013-08-24.

17. ETAPAS DEL SECADO.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/

2013-08-22.

18. FORMACIÓN DE LA AZÚCAR EN LA REMOLACHA.

http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents

2013-08-20.

19. HUMEDAD.

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fp>

2013-08-22.

20. LIOFILIZACIÓN.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87791711>

2013-08-24.

21. LIOFILIZACIÓN EN ALIMENTOS.

<http://www.invap.com.ar/es/liofilizacion/alimentos/htm>

2013-08-24.

22. SECADO DE SÓLIDOS.

<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/SECADERO>

2013-08-20.

23. SECADO POR LIOFILIZACIÓN.

<http://geocities.com/iq300uia/opunit17.jpg>

2013-08-24.

24. PROPIEDADES DEL AIRE.

<http://profesormario.files.wordpress.com/apendice>

2013-10-11

25. REMOLACHA.

<http://www.florflores.com/la-remolacha-azucarera/>

2013-08-20.

26. VELOCIDAD DE SECADO.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87791711>

2013-08-22.

ANEXOS.

**ANEXO I
SIMULACIÓN SECADOR DE BANDEJAS.**



NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.**

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

**SIMULACIÓN EN EL SECADOR DE
BANDEJAS**

Lámina

Escala

Fecha

1

2013/11/29

**ANEXO II
PRODUCTO SECO EN EL SECADOR DE BANDEJAS.**



NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

**PRODUCTO SECO EN EL
SECADOR DE BANDEJAS.**

Lámina

Escala

Fecha

2

2013/11/29

ANEXO III TABLAS PROPIEDADES DEL AIRE.

Tabla A.5. Propiedades de gas ideal del aire

(*T*, *K*; *h* y *u*, *kJ/kg*; *s*^o, *kJ/kg · K*; el estado estándar es 1 atm)

<i>T</i>	<i>h</i>	<i>p_r</i>	<i>u</i>	<i>v_r</i>	<i>s</i> ^o	<i>T</i>	<i>h</i>	<i>p_r</i>	<i>u</i>	<i>v_r</i>	<i>s</i> ^o
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
320	320,29	1,7375	228,42	528,6	1,76690	620	628,07	18,36	450,09	96,92	2,44356
325	325,31	1,8345	232,02	508,4	1,78249	630	638,63	19,84	457,78	92,84	2,46048
330	330,34	1,9352	235,61	489,4	1,79783	640	649,22	20,64	465,50	88,99	2,47716
340	340,42	2,149	242,82	454,1	1,82790	650	659,84	21,86	473,25	85,34	2,49364
350	350,49	2,379	250,02	422,2	1,85708	660	670,47	23,13	481,01	81,89	2,50985
360	360,58	2,626	257,24	393,4	1,88543	670	681,14	24,46	488,81	78,61	2,52589
370	370,67	2,892	264,46	367,2	1,91313	680	691,82	25,85	496,62	75,50	2,54175
380	380,77	3,176	271,69	343,4	1,94001	690	702,52	27,29	504,45	72,56	2,55731

NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

TABLAS PROPIEDADES DEL AIRE.

Lámina

Escala

Fecha

3

2013/11/29

ANEXO IV
CONDICIONES DE TRABAJO PARA EL SECADOR DE BANDEJAS.

Datos experimentales del secador de bandejas.

N	PARAMETRO	RESULTADO	UNIDAD
1	Área de transferencia	0,369	(m ²)
2	Largo de la bandeja	48,5	(cm)
3	Ancho de la bandeja	38,0	(cm)
4	Espesor de la bandeja	0,1	(cm)
5	Humedad del aire a la entrada a 22°C	0,011	(kg agua/kg aire seco)
6	Temperatura del sólido a la entrada	22	(°C)
7	Temperatura del sólido a la salida	63	(°C)
8	Temperatura del aire a la entrada	22	(°C)
9	Temperatura del aire a la salida	60	(°C)

Fuente: FLORES, L., NUÑEZ, D.,

NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

**CONDICIONES DE TRABAJO
PARA EL SECADOR DE
BANDEJAS.**

Lámina

Escala

Fecha

4

2013/11/29

**ANEXO V
PROPIEDADES DEL AIRE.**

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE Tabla 2
a presión atmosférica

<i>Temperatura</i>	<i>Densidad</i>	<i>Viscosidad dinámica</i>	<i>Viscosidad cinemática</i>	<i>Velocidad del sonido</i>
	ρ	μ	ν	c
^o C	kg/m ³	N.s/m ² 10 ⁻⁵	m ² /s 10 ⁻⁵	m/s
-30	1,452	1,56	1,08	312
-20	1,394	1,61	1,16	319
-10	1,342	1,67	1,24	325
0	1,292	1,72	1,33	331
10	1,247	1,76	1,42	337
20	1,204	1,81	1,51	343
30	1,164	1,86	1,60	349
40	1,127	1,91	1,69	355
50	1,092	1,95	1,79	360
60	1,060	2,00	1,89	366
70	1,030	2,05	1,99	371
80	1,000	2,09	2,09	377
90	0,973	2,13	2,19	382
100	0,946	2,17	2,30	387
200	0,746	2,57	3,45	436
300	0,616	2,93	4,75	480

NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

TABLAS PROPIEDADES DEL AIRE.

Lámina	Escala	Fecha
5		2013/11/29

**ANEXO VI
PROPIEDADES DEL ACERO.**

PROPIEDADES TÉRMICAS	ACERO	
	AISI 316	AISI 304
Densidad	8,03 g/cm ³	8,00 g/cm ³
Conductividad térmica	13,8 W/mk	13,8 W/mk
Calor específico	0,462 kJ/kgk	0,461 kJ/kgk

FUENTE: [Huy, asme handbook](#)

PROPIEDADES MECÁNICAS	ACERO	
	AISI 316	AISI 304
Límite de fluencia (kg/mm ²)	29	24
Resistencia a la tracción (MPa)	460-660	460-1100
Resistencia última (kg/mm ²)	58	58
Dureza Brinell	160-190	160-190
Módulo de elasticidad (GPa)	190-210	190-210
Porcentaje de alargamiento	50	55

FUENTE: [Huy, asme handbook](#)

NOTA:

-
-
-
-

Categoría del diagrama

Certificado
Por aprobar
Para información
Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

PROPIEDADES DEL ACERO.

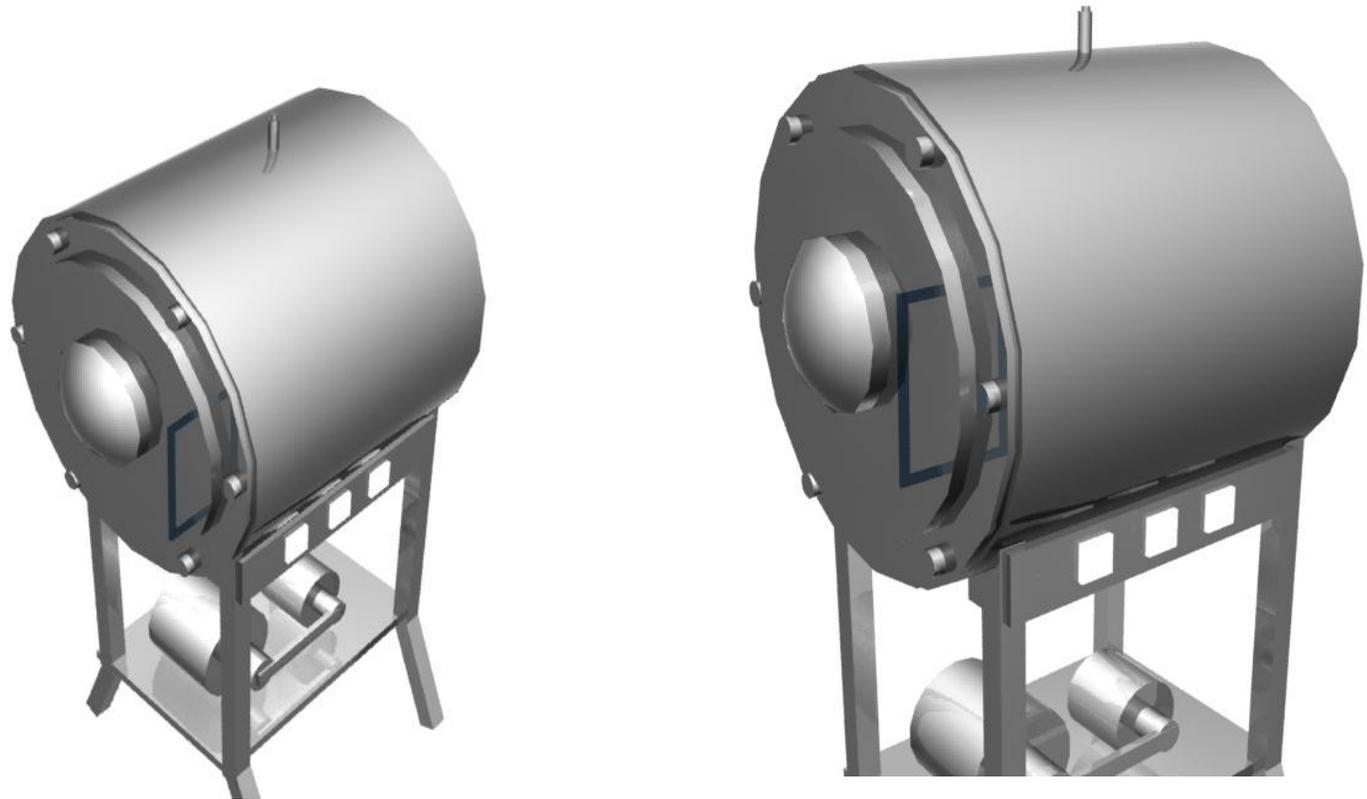
Lámina	Escala	Fecha
6		2013/11/29

**ANEXO VII
DISEÑO DEL LIOFILIZADOR.**



NOTA:	<p align="center">Categoría del diagrama</p> <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por calificar	<p align="center">ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.</p> <p align="center">FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.</p>	DISEÑO DEL LIOFILIZADOR.		
			Lámina	Escala	Fecha
			7		2013/11/29

**ANEXO VIII
DISEÑO DEL LIOFILIZADOR.**



NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

DISEÑO DEL LIOFILIZADOR.

Lámina

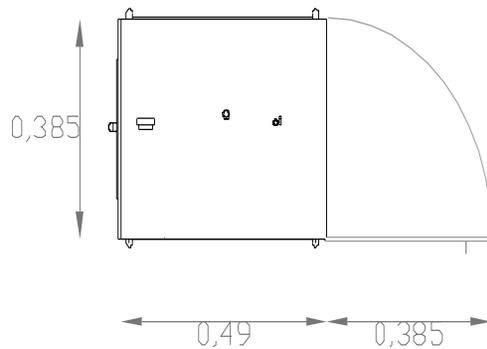
Escala

Fecha

8

2013/11/29

**ANEXO IX
PLANOS DEL LIOFILIZADOR VISTA EN PLANTA**



VISTA EN PLANTA

CUADRO DE SIMBOLOGIA

- 1.- VALVULA CONTROLADORA DE VACIO
- 2.-INDICADOR DE PRESIÓN
- 3.-CUERPO DE LIOFILIZADOR
- 4.- INDICADOR DE TEMPERATURA
- 5.- TERMOSTATO
- 6.- MOTOR
- 7.-BOMBA DE VACIO

- A.- MANTO ELECTRICO
- B.- BANDEJAS

NOTA:

Categoría del diagrama

- Certificado
- Por aprobar
- Para información
- Por calificar

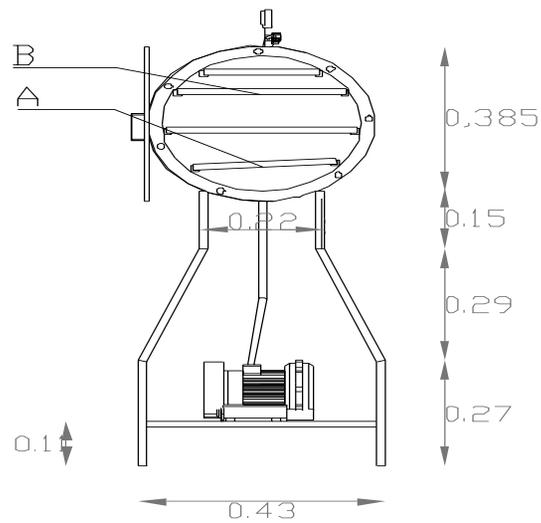
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

PROPIEDADES DEL ACERO.

Lámina	Escala	Fecha
9		2013/11/29

ANEXO X PLANOS DEL LIOFILIZADOR VISTA LATERAL.



VISTA LATERAL

CUADRO DE SIMBOLOGIA
1.- VALVULA CONTROLADORA DE VACIO
2.- INDICADOR DE PRESION
3.- CUERPO DE LIOFILIZADOR
4.- INDICADOR DE TEMPERATURA
5.- TERMOSTATO
6.- MOTOR
7.- BOMBA DE VACIO
A.- MANTO ELECTRICO
B.- BANDEJAS

NOTA:

Categoría del diagrama
<input type="checkbox"/> Certificado
<input type="checkbox"/> Por aprobar
<input checked="" type="checkbox"/> Para información
<input type="checkbox"/> Por calificar

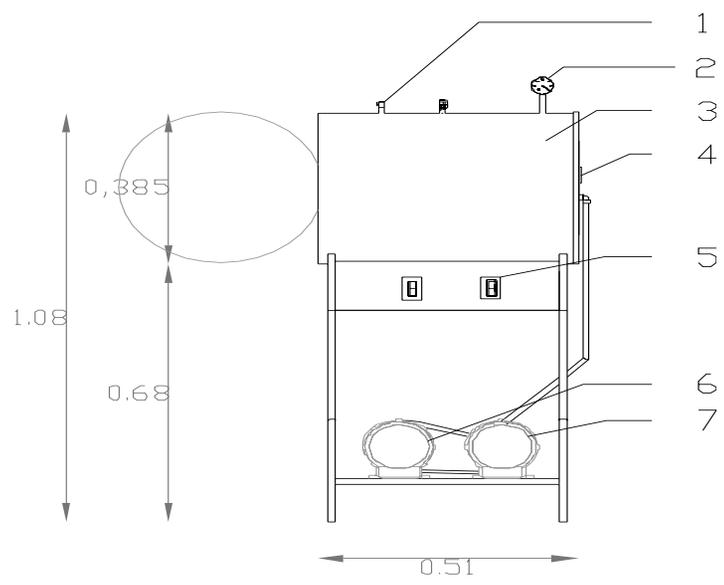
**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.**

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

DISEÑO DEL LIOFILIZADOR.

Lámina	Escala	Fecha
10		2013/11/29

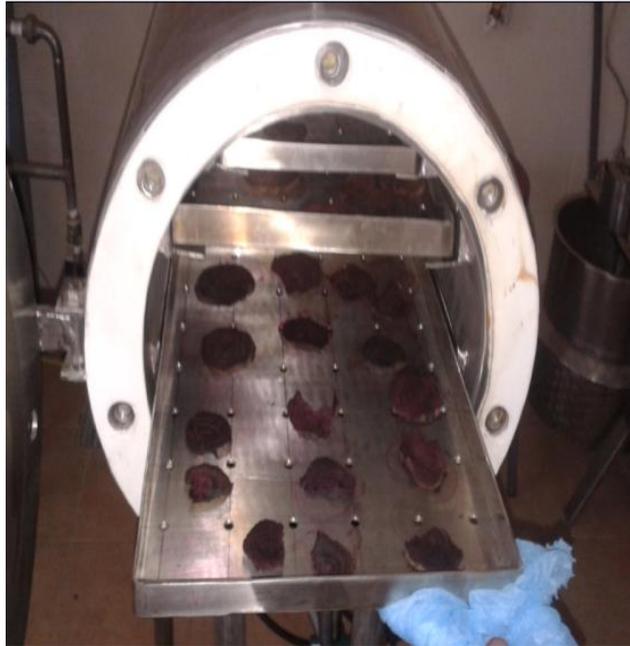
ANEXO XI PLANOS DEL LIOFILIZADOR VISTA FRONTAL



CUADRO DE SIMBOLOGIA	
1.-	VALVULA CONTROLADORA DE VACIO
2.-	INDICADOR DE PRESIÓN
3.-	CUERPO DE LIOFILIZADOR
4.-	INDICADOR DE TEMPERATURA
5.-	TERMOSTATO
6.-	MOTOR
7.-	BOMBA DE VACIO
A.- MANTO ELECTRICO B.- BANDEJAS	

NOTA:	Categoría del diagrama <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por calificar	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.	PLANOS DEL LIOFILIZADOR VISTA FRONTAL		
			Lámina	Escala	Fecha
			11		2013/11/29

**ANEXO XII
VALIDACIÓN DEL LIOFILIZADOR.**



NOTA:	<input type="checkbox"/> Categoría del diagrama <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por calificar	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.	VALIDACIÓN DEL LIOFILIZADOR.		
			Lámina	Escala	Fecha
			12		2013/11/29

**ANEXO XIII
PRODUCTO ANTES Y DESPUÉS DE LA LIOFILIZACIÓN.**



NOTA:

- Categoría del diagrama**
- Certificado
 - Por aprobar
 - Para información
 - Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO.

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.

**PRODUCTO ANTES Y DESPUÉS DE
LA LIOFILIZACIÓN..**

Lámina	Escala	Fecha
13		2013/11/29

ANEXO XIV ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LA REMOLACHA SECADA EN EL SECADOR DE BANDEJAS.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD SALUD PÚBLICA
ESCUELA NUTRICIÓN Y DIETÉTICA
LABORATORIO BROMATOLOGÍA**

ANÁLISIS DE LABORATORIO

SOLICITADO POR: Srta. Linda Flores

FECHA: 06/11/2013

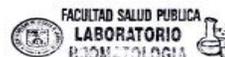
MUESTRA: Remolacha deshidratada (morada)

ANÁLISIS	RESULTADOS (g)
Humedad	26.4
Cenizas	5.08
Proteína	3.4
Extracto Etéreo	1.7
Fibra	24.1
ENN	39.32
ST	73.6
CHT	37.0

Contenido en 100 g de muestra procesada.

Atentamente,

Lourdes Benitez
INST. LAB. BROMATOLOGÍA



NOTA:	<p style="text-align: center;">Categoría del diagrama</p> <p><input type="checkbox"/> Certificado</p> <p><input type="checkbox"/> Por aprobar</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Para información</p> <p><input type="checkbox"/> Por calificar</p>	<p>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.</p> <p>FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.</p>	<p>ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LA REMOLACHA SECADA EN EL SECADOR DE BANDEJAS.</p>		
			Lámina	Escala	Fecha
			14		2013/11/29

**ANEXO XIV
ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LA REMOLACHA SECADA EN EL LIOFILIZADOR**



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD SALUD PÚBLICA
ESCUELA NUTRICIÓN Y DIETÉTICA
LABORATORIO BROMATOLOGÍA**

ANÁLISIS DE LABORATORIO

SOLICITADO POR: Srta. Linda Flores

FECHA: 12/12/2013

MUESTRA: Remolacha deshidratada (morada)

ANÁLISIS	RESULTADOS (g)
Cenizas	6.1
Proteína	3.8
Extracto Etéreo	1.2
Fibra	32.2
ENN	56.7
ST	80.7

Contenido en 100 g de muestra procesada.

Atentamente,

Lourdes Benitez
INST. LAB. BROMATOLOGÍA



NOTA:	Categoría del diagrama <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Para información <input type="checkbox"/> Por calificar	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: FLORES L, NUÑES D.	ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE LA REMOLACHA SECADA EN EL LIOFILIZADOR.		
			Lámina	Escala	Fecha
			15		2013/11/29

