



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA

AUTOR: KAREN KATHERINE NIETO MOROCHO

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS
CON CAPACIDAD DE 1000 GRAMOS UTILIZANDO UNA BOMBA DE
VACÍO”**

DIRECTOR: MSC. JOSÉ GUASUMBA

CODIRECTOR: ING. XAVIER RODRIGUEZ

SANGOLQUÍ, FEBRERO 2015

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS CON CAPACIDAD DE 1000 GRAMOS UTILIZANDO UNA BOMBA DE VACÍO**” fue realizado en su totalidad por Karen Katherine Nieto Morocho, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

MSc. José Guasumba
DIRECTOR

Ing. Xavier Rodríguez
CODIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, KAREN KATHERINE NIETO MOROCHO

DECLARO QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS CON CAPACIDAD DE 1000 GRAMOS UTILIZANDO UNA BOMBA DE VACÍO**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 19 de Febrero de 2015

Karen Katherine Nieto Morocho

CI.: 1715925721

AUTORIZACIÓN

Yo, KAREN KATHERINE NIETO MOROCHO

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS CON CAPACIDAD DE 1000 GRAMOS UTILIZANDO UNA BOMBA DE VACÍO”**, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 19 de Febrero de 2015.

Karen Katherine Nieto Morocho

CI.: 1715925721

DEDICATORIA

A mi madre, por estar presente en cada parte de mi vida, y porque ha tenido la fortaleza de sacar adelante a una gran familia.

A mis hermanos, Gabriel y Marcelo, que han sabido entender lo duro de este proceso y espero ser de ejemplo para todas sus metas futuras.

A mi abuelita, Mercedes, por brindarme su cariño incondicional.

A Christian, por estar conmigo en cada aspecto de mi carrera.

Karen Katherine Nieto Morocho

AGRADECIMIENTO

A la empresa Steelinc Cia. Ltda., por ser parte de mi desarrollo profesional y en especial, al Ing. Javier Wong, por ser un gran mentor durante mi carrera.

A mi Director, MSc. José Guasumba y Codirector, Ing. Xavier Rodríguez, por brindar sus conocimientos y guía a lo largo de este proyecto.

A mis compañeros y amigos, que han brindado su apoyo.

Karen Katherine Nieto Morocho

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE CUADROS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
NOMENCLATURA.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del problema.....	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Alcance	6
1.5. Justificación e importancia	6

CAPÍTULO 2	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1. Secado.....	9
2.1.1. Proceso de secado	11
2.1.2. Curva de la velocidad de secado.....	13
2.1.3. Tipos de secadores	15
2.1.4. Propiedades de las frutas y verduras	18
2.2. Transferencia de calor y transferencia de masa	20
2.2.1. Conducción.....	20
2.2.2. Convección	22
2.2.3. Radiación.....	23
2.2.4. Resistencia térmica	24
2.2.5. Balances de masa y energía	25
2.2.6. Transferencia de masa y calor durante el secado	26
2.2.7. Secador al vacío por conducción.....	27
2.3. Presión de vacío	28
2.3.1. Bombas de vacío	29
CAPÍTULO 3	33
ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	33
3.1. Secadores al vacío.....	34
3.2. Alternativas para el deshidratador al vacío	37
3.3. Selección de la alternativa óptima para el deshidratador al vacío	38
3.3.1. Análisis de la alternativa seleccionada	39
CAPÍTULO 4	41
DISEÑO	41

	viii
4.1. Diseño térmico	41
4.1.1. Criterios de diseño	41
4.1.2. Mecanismo de transferencia de calor	42
4.1.3. Energía necesaria para el secado	45
4.1.4. Cálculo de dimensiones.....	46
4.2. Diseño mecánico.....	47
4.2.1. Códigos y normas aplicables.....	47
4.2.2. Parámetros de diseño.....	48
4.2.3. Cálculo de parámetros dimensionales.....	50
4.2.4. Cargas de diseño.....	50
4.2.5. Cálculo de dimensiones.....	51
4.3. Selección de accesorios y equipos adicionales	59
4.3.1. Bomba de vacío	59
4.3.2. Resistencias térmicas.....	62
4.3.3. Temporizador.....	63
4.3.4. Termostato.....	63
4.3.5. Termocupla.....	64
CAPITULO 5.....	66
CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE	66
5.1. Construcción	66
5.1.1. Tabla de materiales	67
5.2. Ensamble	69
5.3. Prueba de fugas.....	73
CAPITULO 6.....	77
PRUEBAS DE CAMPO	77

	ix
6.1. Prueba de funcionamiento	77
6.1.1. Procedimiento	77
6.1.2. Registro de datos.....	78
6.2. Obtención de resultados	79
6.3. Análisis de resultados	81
CAPITULO 7	90
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	90
7.1. Especificaciones técnicas	93
7.2. Programa de mantenimiento	93
CAPITULO 8	94
ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO	94
8.1. Análisis económico	94
8.1.1. Costos directos	94
8.1.2. Costos indirectos	95
8.1.3. Costo de mano de obra directa.....	97
8.1.4. Costo de la mano de obra indirecta	98
8.1.5. Costo total de proyecto	98
8.2. Análisis financiero	99
8.2.1. Costo de operación.....	100
8.2.2. Determinación del valor actual neto (VAN)	101
8.2.3. Tasa interna de retorno (TIR)	103
8.3. Relación beneficio costo (R B/C)	104
CAPITULO 9	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
9.1. Conclusiones.....	105

9.2. Recomendaciones	x
106	
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de frutas	19
Tabla 2: Rangos de vacío	29
Tabla 3: Matriz de pesos ponderados	38
Tabla 4: Número de cubas en el secador	43
Tabla 5: Parámetros de diseño térmico	44
Tabla 6: Tiempo de secado y potencia del deshidratador al vacío	45
Tabla 7: Dimensiones de la estructura de las bandejas	46
Tabla 8: Parámetros de diseño mecánico	51
Tabla 9: Iteraciones para el cálculo del espesor en el cuerpo del cilindro	54
Tabla 10: Espesores calculados para las cabezas toriesféricas	57
Tabla 11: Aberturas en el secador al vacío	58
Tabla 12: Potencia de la bomba de vacío	60
Tabla 13: Parámetros de selección de la bomba de vacío	61
Tabla 14: Parámetros de selección de la bomba de vacío (proveedores)	62
Tabla 15: Materiales utilizados en el deshidratador al vacío	68
Tabla 16: Accesorios del deshidratador al vacío	69
Tabla 17: Obtención de resultados	80
Tabla 18: Porcentaje de humedad en las frutas	81
Tabla 19: Especificaciones técnicas del deshidratador al vacío	93
Tabla 20: Costos directos	95
Tabla 21: Costo de consumibles	96
Tabla 22: Costo de maquinados externos	97
Tabla 23: Energía utilizada por equipos y herramientas	97

	xi
Tabla 24: Costo de mano de obra directa	98
Tabla 25: Costo de mano de obra indirecta	98
Tabla 26: Costo total del proyecto	98
Tabla 27: Precio de productos deshidratados en el mercado	100
Tabla 28: Costo unitario de materia prima	100
Tabla 29: Flujo de caja proyectado	103
Tabla 30: Resumen de viabilidad del proyecto	104
Tabla 31: Matriz de pesos ponderados	116
Tabla 32: Costos de materia prima	178
Tabla 33: Costo de items	181
Tabla 34: Costo de equipos y accesorios	183
Tabla 35: Flujo de caja anual	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Secador al vacío de lecho fijo estático	2
Figura 2: Secador al vacío de lecho fluidizado	2
Figura 3: Sistema combinado de un secador al vacío de microondas	3
Figura 4: Secador de microondas con tambores múltiples	4
Figura 5: Curva de secado típica	13
Figura 6: Curva de secado, humedad vs tiempo	15
Figura 7: Principales secadores de la industria alimentaria	17
Figura 8: Comportamiento de las moléculas de agua en un secador al vacío ..	32
Figura 9: Secador de paletas al vacío	35
Figura 10: Secador al vacío de doble cono	36
Figura 11: Horno secador al vacío	37
Figura 12: Transferencia de calor en sistemas radiales	47
Figura 13: Esquema dimensiones del recipiente a presión	50
Figura 14: Aberturas del secador al vacío	58

	xii
Figura 15: Parámetros de la bomba de vacío según fabricantes	61
Figura 16: Tipos de termocuplas.....	64
Figura 17: Soldadura de tapa toriesférica	70
Figura 18: Ubicación de resistencias, sensor y patas	70
Figura 19: Ubicación del caucho.....	71
Figura 20: Pulido de tapa.....	71
Figura 21: Pruebas de conexiones eléctricas	72
Figura 22: Ensamble de carcasa externa	72
Figura 23: Pruebas eléctricas finales	73
Figura 24: Conexión de la bomba de vacío al cilindro interior	74
Figura 25: Conexión del compresor al cilindro interior	74
Figura 26: Agua jabonosa en conexiones.....	75
Figura 27: Agua jabonosa en tapa	75
Figura 28: Presión descendiendo	76
Figura 29: Gráfica humedad vs tiempo de la piña.....	82
Figura 30: Gráfica humedad vs tiempo de la naranja	82
Figura 31: Gráfica humedad vs tiempo de la frutilla.....	83
Figura 32: Gráfica humedad vs tiempo de la pera	83
Figura 33: Gráfica humedad vs tiempo de la manzana.....	84
Figura 34: Gráfica humedad vs tiempo de la uvilla	84
Figura 35: Gráfica humedad vs tiempo de la mora	85
Figura 36: Piña a las 2 horas de secado.....	86
Figura 37: Piña a las 10 horas de secado.....	86
Figura 38: Pera y manzana a las 2 horas de secado.....	87
Figura 39: Pera y manzana a las 6 horas de secado.....	87
Figura 40: Naranja a las 2 horas de secado	87
Figura 41: Naranja a las 10 horas de secado	88
Figura 42: Uvilla a las 2 horas de secado	88
Figura 43: Uvilla a las 10 horas de secado	88
Figura 44: Mora a las 2 horas de secado.....	89
Figura 45: Mora a las 10 horas de secado.....	89

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Tipos de bombas de vacío	30
Cuadro 2: Aspectos a tomar en cuenta para la selección de un deshidratador	33
Cuadro 3: Parámetros de evaluación.....	38
Cuadro 4: Parámetro de evaluación para RF	39
Cuadro 5: Ubicación de planos	66
Cuadro 6: Formato de pruebas de funcionamiento.....	78
Cuadro 7: Valoración de los parámetros.....	79
Cuadro 8: Formato de Manual de Operaciones	90
Cuadro 9: Formato de Manual de Mantenimiento.....	92
Cuadro 10: Programa de mantenimiento	93
Cuadro 11: Alternativas para el deshidratador al vacío	114

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Selección del deshidratador al vacío	112
Apéndice 1: Alternativas para el deshidratador al vacío	113
Apéndice 2: Matriz de pesos ponderados.....	115
Anexo B: Tabla factor A	117
Anexo C: Tabla factor B.....	119
Anexo D: Planos de construcción	121
Apéndice 1: Plano de conjunto	122
Apéndice 2: Plano general.....	124
Apéndice 3: Planos de despiece.....	127
Anexo E: Hojas de procesos.....	139
Anexo F: Manual de operación	167
Anexo G: Manual de mantenimiento.....	168

	xiv
Anexo H: Costos directos	176
Apéndice 1: Costos de materia prima	177
Apéndice 2: Costos de items	180
Apéndice 3: Costos de equipos y accesorios	182
Apéndice 4: Flujo de caja anual	184
Anexo I: Especificaciones técnicas del aceite de la bomba de vacío.....	186

NOMENCLATURA

f	Velocidad de secado característica
ϕ	Contenido de humedad característico
N_V	Índice de secado para una unidad de superficie
N_W	Velocidad de saturación completa del cuerpo o velocidad de secado inicial
\bar{X}	Contenido de humedad medio en el cuerpo
\bar{X}_{cr}	Valor de punto crítico
X^*	Contenido de humedad en equilibrio
q	Calor ganado o perdido
m	Masa
ΔT	Variación de temperatura
C_p	Calor específico
H_1	Entalpía a la temperatura T_1
H_2	Entalpía a la temperatura T_2
dt/dx	Gradiente de temperatura en la dirección x
k	Conductividad térmica
A	Área de transferencia de calor
W	Contenido de humedad
m_w	Masa de agua
m_s	Masa del sólido seco
m_{sw}	Masa húmeda
X	Contenido de humedad
W_s	Contenido de humedad en base seca
t_m	Temperatura del producto
t_k	Temperatura de la fuente de calor
U	Coeficiente global de transferencia de calor
q_x''	Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área

∇	Operador nabla tridimensional
q_n''	Flujo de calor en dirección normal a un isoterma
h	Coefficiente de convección local
\bar{h}	Coefficiente de convección promedio
E_b	Potencia emisiva
σ	Constante de Stefan Boltzman ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
E	Emisividad
G_{abs}	Absortividad
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
$R_{t,cond}$	Resistencia térmica por conducción
$R_{t,conv}$	Resistencia térmica por convección
$R_{t,rd}$	Resistencia térmica por radiación
R_{tot}	Resistencia térmica total
W_s	Caudal másico del sólido seco
X	Contenido de humedad
W_{Dm}	Tasa de secado del sólido húmedo
W_B	Caudal másico del gas seco
Y	Humedad absoluta
m_B	Masa del gas seco
T	Tiempo
i_m	Entalpía específica del sólido húmedo
i_g	Entalpía específica del gas húmedo
h_A	Entalpía específica por unidad de masa de la humedad

RESUMEN

La deshidratación es un proceso que permite la evaporación de un líquido o la remoción de vapor de cualquier alimento logrando reducir su deterioro biológico; bajando la presión dentro de la cámara de secado se logra una disminución del tiempo y un mejor resultado en las características del producto terminado. Este proyecto contempló el diseño y la construcción de un deshidratador al vacío con una capacidad de 1000 gramos. Para el diseño del equipo se tomó en cuenta el diseño térmico basado en la transferencia de calor por conducción, la misma que permitió calcular la energía necesaria para el secado de los productos; y un diseño mecánico basado en la norma ASME, Sección VIII, División 1, “Diseño de recipientes a presión”, la cual permitió determinar el espesor del recipiente a construir. El equipo consta de un horno cilíndrico estático de bandejas de acero inoxidable cuyo medio calefactor son resistencias de tipo tubular, está controlado por un termostato regulador de la temperatura y humedad; y un temporizador que permite seleccionar varios tiempos de secado dependiendo de la fruta a deshidratar. El vacío que alcanza la bomba es de 3 psi con una potencia de $\frac{1}{2}$ Hp. Las pruebas realizadas en el equipo fueron a una temperatura de 60°C, presión de 3 psi y tiempo de secado de 6 a 10 horas dependiendo de la fruta. Se realizaron pruebas en manzanas, moras, peras, naranjas, piñas, frutillas y uvillas. Finalmente se desarrolló un manual de operación y mantenimiento preventivo.

PALABRAS CLAVE: DESHIDRATACIÓN, VACÍO, RECIPIENTES A PRESIÓN, TRANSFERENCIA DE CALOR, CONDUCCIÓN

ABSTRACT

Dehydration is a process that allows the evaporation of a liquid or vapor removal of any food successfully reducing their biological degradation; lowering the pressure within the drying chamber and a decrease in time result in improved characteristics of the finished product is achieved. This project included the design and construction of a vacuum dryer with a capacity of 1000 grams. For equipment design took into account the design based on the thermal conduction heat transfer, allowing it to calculate the energy required for drying the products; and a mechanical design based on the ASME Section VIII, Division 1, "Design of Pressure Vessels", which allowed to determine the thickness of the container to build standard. The equipment consists of a static oven cylindrical of stainless steel trays which resistors heating means are tubular, is controlled by a thermostat regulating the temperature and humidity; and a timer that allows you to select various drying times depending on the fruit to dehydrate. The vacuum pump reaches is 3 psi with a power of $\frac{1}{2}$ Hp. Tests were made to the equipment at a temperature of 60 ° C, pressure of 3 psi and drying time of 6 to 10 hours depending on the fruit. Tests apples, berries, pears, oranges, pineapples, strawberries and uvillas were performed. Finally a manual operation and preventive maintenance were developed.

KEYWORDS: DEHYDRATION, VACUUM, PRESSURE VESSELS, HEAT TRANSFER, CONDUCTION TRANSFER

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS CON CAPACIDAD DE 1000 GRAMOS UTILIZANDO UNA BOMBA DE VACÍO

La deshidratación es una de las técnicas ampliamente utilizadas para la conservación de alimentos, la más comúnmente utilizada es el secado al sol sin embargo existe una amplia variedad de métodos, entre ellos se encuentra la deshidratación al vacío; la misma que ha sido estudiada desde el año de 1881. El presente proyecto investiga el proceso de secado en una cámara mediante una bomba de vacío logrando que la temperatura de ebullición del agua disminuya.

En el capítulo 1 se detallan los antecedentes, objetivos, alcance, justificación e importancia del presente proyecto. En el capítulo 2 nos adentramos en el marco teórico en el cual se detallan todos los criterios y modelos científicos de los procesos térmicos que ocurren dentro del equipo. En el capítulo 3 se realiza un estudio de las alternativas existentes de deshidratadores al vacío y se selecciona el más óptimo según criterios establecidos. En el capítulo 4 se procede con los cálculos tanto del diseño térmico como del diseño mecánico para el recipiente sometido a presión externa. En el capítulo 5 se detallan el plano general, de conjunto, de despiece y las hojas de procesos los cuales son necesarios para la fabricación del equipo. Una vez construido y ensamblado el deshidratador se realizaran pruebas con diferentes frutas; los datos y análisis se recopilarán en el capítulo 6. En el capítulo 7 se encuentran los manuales de operación y mantenimiento que serán de gran ayuda a los usuarios y operadores del equipo. El capítulo 8 indica todos los costos involucrados en el presente proyecto y evalúa la rentabilidad del mismo. Finalmente las conclusiones y recomendaciones se las encuentra en el capítulo 9.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La deshidratación o también comúnmente llamado secado es una de las técnicas ampliamente utilizadas para la conservación de alimentos. La técnica más común tiene como fuente natural el sol, sin embargo se han ido desarrollando nuevas tecnologías, dependiendo de la época, que han permitido que el proceso de secado sea más eficiente.

A lo largo de los años se realizan varios estudios en lo referente al secado. Según (Fito Maupoey, Andrés Grau, Albors Sorolla, & Barat Baviera, 2001) mencionan que “En 1877 se crea la oficina alemana de patentes, un año más tarde se presenta el primer secador calentado por radiación y en 1881 se registra un secador al vacío. En 1901 Hausbrand publica “Drying of air and steam” que puede ser considerado como el primer intento serio de aplicación de los métodos de ingeniería al cálculo de deshidratadores”. En este punto se puede decir que en el año de 1901 la deshidratación se convierte en un proceso ampliamente desarrollado con fundamentos teóricos establecidos.

La tecnología al vacío ha servido para que el proceso de secado sea más eficiente; (Kawamura & Suezawa, 1961) realizaron experimentos en condiciones de vacío, en donde observaron que al utilizar presión atmosférica o vacío no afectaba en gran manera al material sólido.

Estudios realizados por (Arnaldos, 1998) demostraron que al disminuir la presión de operación, el tiempo de secado disminuye de manera considerable y este era menor al trabajar con partículas con mayor porosidad; también se demostró que al reducir la presión de operación se disminuye la capacidad de secado, es decir hay clara evidencia de disminución de la humedad.

La tecnología de vacío se ha implementado en el secado tradicional de lecho fijo, lecho fluidizado y secado estático en bandejas, estos equipos se puede visualizar en las siguientes figuras 1 y 2.



Figura 1: Secador al vacío de lecho fijo estático
Fuente: (Savi)



Figura 2: Secador al vacío de lecho fluidizado
Fuente: (Savi)

En el 2005 se realizó un estudio de la técnica de deshidratadores al vacío de microondas en el laboratorio de Tecnología de la Universidad del estado de Washintong. La figura 3 indica un esquema de este tipo de deshidratador.

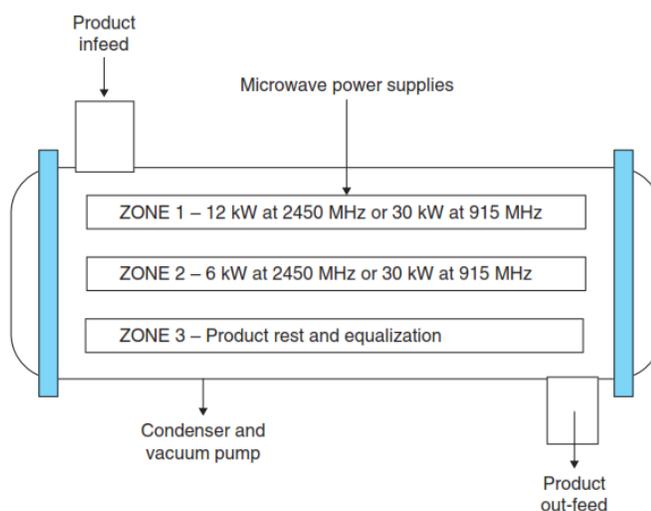


Figura 3: Sistema combinado de un secador al vacío de microondas

Fuente: (Jon Chua & Kiang Chou, 2005)

Este deshidratador contiene largas cámaras de acero inoxidable sujetas a condiciones de vacío. Las cámaras contienen un transportador, una unidad microonda y una fuente de energía radiante. Hay tres zonas en el equipo. A medida que los alimentos se transportan en las zonas, cada una de ellas tiene diferente potencia de microonda.

La incorporación de microondas en la cámara de vacío minimiza la oxidación del producto y disminuye el punto de ebullición del agua en los alimentos haciendo posible que el secado se dé en menor tiempo y a temperaturas menores a 55°C. Bajas temperaturas de secado permiten la mínima degradación de las características de los alimentos, tales como el color, sabor y el valor nutricional.

(Deng & Zhao, 2008) Realizaron estudios de los efectos del vacío y ultrasonido en las características de las manzanas deshidratadas, utilizando una cámara de vacío y una bomba de vacío (Model 0211-P204, Gast Mfg. Corp. Benton. Harbor, MI, USA). El vacío se generó a unos 13 MPa por 5 min, liberación de vacío por 5 min, vacío nuevamente por 5 min y liberación de vacío por otros 5 min.

1.2. Definición del problema

Actualmente hay procesos y maquinaria que permiten la conservación de los alimentos de forma más sencilla y rápida permitiendo que los mismos duren por mucho más tiempo. Sin embargo, en Ecuador la maquinaria para el secado es poco conocida y muchas de ellas no obtienen un producto con características similares a un producto seco. La tecnología en secado no es ampliamente investigada en nuestro país y es más aún desconocida la deshidratación al vacío. En otros países esta tecnología es costosa sin embargo es la más adecuada para que los alimentos conserven sus características y propiedades similares a las de un producto fresco pero con un tiempo de conservación mucho mayor.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un deshidratador de frutas con capacidad de 1000 gramos utilizando una bomba de vacío.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar los diversos procesos de deshidratación de alimentos.
- Determinar el diseño óptimo del deshidratador de frutas al vacío.
- Construir un deshidratador de frutas al vacío.
- Realizar pruebas de funcionamiento en el deshidratador de frutas.
- Determinar la rentabilidad del proyecto.

1.4. Alcance

El presente proyecto tiene como alcance, la investigación del proceso de secado y conjuntamente con una bomba lograr que dentro del equipo se produzca vacío. Altos grados de sequedad se pueden lograr a temperaturas relativamente bajas, especialmente para productos sensibles y que se oxidan en presencia de aire, además mediante vacío se puede lograr bajo contenido de humedad.

El equipo se dimensionará tomando en cuenta la cantidad y el tamaño de los alimentos a deshidratar, además de la capacidad de la bomba para crear el vacío. La cámara hermética estará provista de bandejas portadoras de material a secar y estará conectada a una bomba de vacío. La regulación de temperatura estará en función del tipo de aplicación de calor al producto a utilizar en el diseño del secador.

La construcción se basará en los materiales existentes en el mercado ecuatoriano, pero siempre teniendo en cuenta que es para la industria alimenticia y que estos deben garantizar todas las normativas vigentes en el país en lo referente a salud, higiene y seguridad para el consumo humano.

Otro aspecto muy importante a tomar en cuenta durante el diseño y construcción del equipo es la relación costo - beneficio.

1.5. Justificación e importancia

Debido al poco desarrollo científico y tecnológico del país, la industria ecuatoriana ha tenido que valerse de la exportación de equipos para las diferentes industrias que forman parte de nuestra matriz productiva.

La deshidratación en el Ecuador ha sido un proceso muy rudimentario que no ha sabido valerse de equipos de alta tecnología para poder desarrollarlo,

además de que este tipo de equipos son costosos y no de gran difusión dentro de nuestro medio debido a la falta de investigación.

Los métodos de secado utilizados en el Ecuador son muy ambiguos, entre ellos tenemos secado al natural, mediante gas o energía eléctrica y debido a una creciente demanda de la industria alimenticia, se importan gran variedad de equipos de países como México, Estados Unidos, España, entre otros.

El secado al natural, que consiste en exponer al producto directamente al sol y dejarlo secar por varias horas, incluso días, es uno de los métodos desarrollados en nuestro país debido a la falta de conocimiento e investigación, este tipo de secado se lo utiliza para productos como el café, cacao, entre otros.

Otra forma tradicional de secado de alimentos es mediante gas, la consecuente contaminación del producto por azufre y químicos que posee el combustible o energía eléctrica, en ambos existe desprendimiento de dióxido de carbono que en algunos casos afecta el sabor, color, olor y pérdida de nutrientes.

En cuanto al secado con energía solar los equipos que se utilizan en el país no son de fabricación ecuatoriana, la mayoría son importados de empresas como: Codesolar, ubicada en Quito, la cual importa varios equipos que funcionan a base de energía solar fotovoltaica.

SAECSA, una empresa mexicana especializada en el secado de todo tipo de alimentos tiene varias distribuidoras a nivel latinoamericano. El secado es por medio de energía solar como fuente básica de calor; la energía calórica que es capturada por colectores solares se envía a la cámara de deshidratado por medio del líquido calo-transportador a los núcleos de calor, con estrategias de aprovechamiento del vapor del producto y que se genera en el interior, se provoca el calentamiento inicial de la pulpa y se automatiza la expulsión del producto en el momento adecuado de temperatura y humedad.

La deshidratación al vacío tiene varias ventajas debido a que la evaporación del agua se hace más rápido a bajas presiones y el calor es añadido indirectamente por el proceso de conducción que generan las resistencias eléctricas dentro del secador, bajas temperaturas pueden ser usadas en vacío para ciertos alimentos que se pueden decolar a altas temperaturas, utilizando secadores normales, cabe mencionar que esta tecnología es también muy usada en el área farmacéutica.

Otra ventaja muy significativa es el tiempo de secado, que es mucho menor que utilizando otros métodos, sin embargo este proceso requiere un estudio más complejo en su construcción y el consumo de energía es mucho mayor.

La deshidratación al vacío es poco desarrollada en nuestro país, y el presente proyecto permitirá el estudio de un método diferente en el proceso de la deshidratación, para así obtener un mejor resultado del producto final, al menor tiempo posible y con la mínima pérdida de las propiedades organolépticas de los alimentos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Secado

El secado es la evaporación de un líquido o la remoción de vapor de un material sólido, usualmente se desplaza agua de un material higroscópico. Al reducir el contenido de agua del alimento hay menos probabilidad de su deterioro biológico. Además el secado permite que los procesos de transporte y almacenamiento sean más eficaces debido a la reducción del volumen y peso de los alimentos.

Cuando un sólido húmedo es sometido a un proceso de secado, se presentan dos procesos simultáneos:

1.- Transferencia de energía en forma de calor del ambiente que rodea al sólido para evaporar la humedad de la superficie, la misma que depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo de aire, área de exposición, tipo de secador y presión.

2.- Transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su posterior evaporación, la misma que depende de la naturaleza física del sólido, su temperatura y su contenido de humedad.

La velocidad de secado es gobernado por la velocidad en la cual estos dos procesos se realizan.

En el proceso de secado al ser una operación compleja cambios físicos pueden ocurrir, incluyen: contracción, resoplado, cristalización y transiciones cristalinas, además reacciones químicas provocan cambios en color, textura, u otras propiedades en el producto sólido, los cuales hay que tomar en cuenta en el diseño de cualquier secador.

- **Proceso 1.- Condiciones externas**

En este proceso la evaporación superficial es controlada por la difusión del vapor de la superficie del sólido hacia los alrededores a través de una capa delgada de aire en contacto con la superficie.

Cuando un gas o una mezcla gaseosa permanecen en contacto con una superficie líquida, adquirirá vapor del líquido hasta que la presión parcial del vapor en la mezcla gaseosa iguale a la presión de vapor del líquido en la temperatura existente.

- **Proceso 2.- Condiciones internas**

En este proceso se da un gradiente de temperatura dentro del sólido donde la mezcla evaporada ocurre desde la superficie. Esto produce una migración de la mezcla desde dentro del sólido hacia la superficie, donde ocurre uno o varios mecanismos, es decir, difusión, flujo capilar, presión interna establecida por contracción durante el secado, y, en el caso de secadores indirectos (por conducción), a través de una vaporización que ocurre repetida y progresiva y re condensación de humedad a la superficie expuesta.

Un sólido poroso está hecho de material higroscópico, es decir, que puede contener humedad aprisionada. Esta se encuentra en los intersticios a causa de la atracción molecular líquido - sólido. La humedad retenida por un sólido poroso en determinadas condiciones de humedad del aire se llama "contenido de humedad en equilibrio". Entre 15° C y 35° C, el contenido de humedad en equilibrio es relativamente independiente de la temperatura, sin embargo cuando esta aumenta con una humedad determinada, el contenido de humedad en equilibrio disminuye. Por último, ésta pierde su importancia con relación al contenido de humedad en equilibrio cuando la temperatura supera el punto de ebullición. Así pues, se llama "contenido de humedad libre" al líquido que puede eliminarse para una temperatura y humedad dadas.

2.1.1. Proceso de secado

Hay dos métodos para eliminar la humedad, mediante evaporación y vaporización. La evaporación ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie sólida es igual a la presión atmosférica. Esto se da levantando la temperatura de la humedad al punto que hierve.

Si el material secado es sensible al calor, después la temperatura en el cual ocurre la evaporación, es decir, el punto que hervía, podría ser bajado, reduciendo la presión (evaporación del vacío). Además, en la vaporización, el secado es realizado por la convección, es decir, pasando el aire caliente sobre el área de exposición. El aire es enfriado por el producto, y la humedad es transferida al aire por la masa húmeda y llevada al ambiente. En este caso la presión del vapor saturado de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

El comportamiento de secado de sólidos puede ser caracterizado midiendo la pérdida del contenido de humedad en función de tiempo.

La figura 5 representa una curva de secado típica de un producto higroscópico. Durante la primera etapa de secado la velocidad es constante. La superficie contiene la humedad libre. La vaporización ocurre desde allí, y una cierta contracción puede ocurrir. En esta etapa de secado se controla la difusión del vapor de agua a través del interfaz de aire-humedad y de la velocidad a la cual la superficie para la difusión es removida. Hacia el final del período de velocidad constante, la humedad tiene que ser transportada del interior del sólido a la superficie por las fuerzas capilares. Cuando el contenido de humedad promedio ha alcanzado el contenido de humedad crítico X_{cr} , la película superficial de la humedad ha sido tan reducida por la evaporación que la sequedad adicional hace aparecer puntos secos sobre la superficie. Esto da lugar a la segunda etapa de secado o a la primera parte del período descendente de la velocidad, el período de secado superficial no saturada. Esta

etapa procede hasta que la película superficial del líquido se evapora completamente.

En la tercera etapa (segundo período descendente de la velocidad), la transmisión del calor consiste en la conducción térmica desde la superficie del calor en el producto. Puesto que la profundidad media del nivel de la humedad aumenta progresivamente y la termo conductividad de las zonas externas secas es muy pequeña, la velocidad de secado es influenciada cada vez más por la conducción del calor. La velocidad de secado es controlada por la difusión de la humedad del interior a la superficie y entonces a la transferencia total de la superficie. Mientras que la concentración de la humedad es bajada por medio del secado, el índice del movimiento interno de la humedad disminuye. El índice de secado baja más rápidamente que antes y continúa hasta que el contenido de agua cae abajo al valor de equilibrio X^* para la humedad del aire que prevalece y luego para el secado.

Cuando toda la superficie expuesta del sólido deja de ser mojada, el movimiento del vapor por la difusión y la capilaridad dentro del sólido a la superficie es el paso limitante.

En el caso de los materiales que se “endurecen”, es decir, forma una piel impermeable dura, es esencial retardar la evaporación de la superficie. Esto se alcanza aumentando la humedad relativa del aire de secado. Con los sólidos, en los cuales el contenido de humedad inicial es relativamente bajo y el contenido de humedad final requerido es extremadamente bajo, el período de velocidad descendente llega a ser importante, los tiempos de secado son largos. Temperatura del aire, la humedad, el material grueso, y la profundidad del lecho llegan a ser importantes. Cuando el índice de difusión es el factor controlado, particularmente cuando los períodos de secado largos se requieren para lograr contenidos de humedad baja, el índice de secado durante el período de difusión (velocidad) descendente varía como el cuadrado del material grueso, que indica la necesidad de granular la materia prima usando la

agitación o con capas delgadas en caso de los secadores de bandeja de flujo cruzado. Así las características de secado del sólido son extremadamente importantes en el diseño del secador.

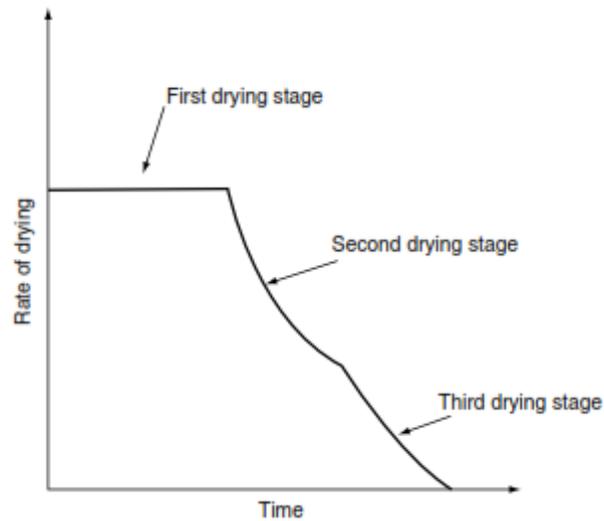


Figura 5: Curva de secado típica
Fuente: (Taylor & Francis Group, LLC, 2006)

2.1.2. Curva de la velocidad de secado

En la curva de secado característica se definen las variables normalizadas, la velocidad de secado característica f y el contenido de humedad característico ϕ , como sigue:

$$f = \frac{N_V}{N_W} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\bar{X} - X^*}{X_\sigma - X^*} \quad (2)$$

Si el comportamiento de secado de un sólido llega a ser descrito por la curva característica, luego sus características deben satisfacer los dos criterios siguientes:

1. El contenido de humedad crítico X_{cr} es invariante e independiente del contenido de humedad inicial y de condiciones externas.
2. Todas las curvas de secado para una sustancia específica son geoméricamente similares de modo que la forma de la curva sea única e independiente de condiciones externas.

Para determinar la velocidad de secado, la masa de una muestra (temperatura constante, humedad y velocidad) debe ser medida como una función del tiempo. Con el fin de obtener los resultados que se pueden aplicar para la ampliación, los siguientes aspectos hay que tomar en cuenta: la muestra no deben ser demasiado pequeños y las condiciones de secado debe ser idénticas a las condiciones previstas en la unidad industrial.

La masa húmeda está dado por:

$$m_{sw} = m_w + m_s \quad (3)$$

El contenido de humedad está dado por:

$$X = \frac{m_w}{m_s} \quad (4)$$

Reemplazando se tiene:

$$X = \frac{m_{sw} - m_s}{m_s} \quad (5)$$

Las ecuaciones anteriores indican que, con un conocimiento de la masa húmeda de secado como una función del tiempo [$m_{sw} = m_{sw}(t)$] y de la masa seca de la muestra, es posible trazar el contenido de humedad como una función de tiempo, esto se indica en la figura siguiente.

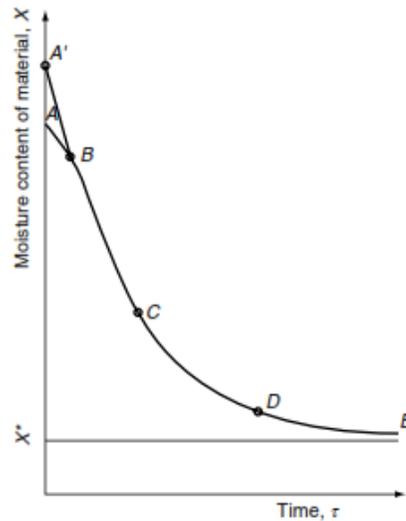


Figura 6: Curva de secado, humedad vs tiempo

Fuente: (Taylor & Francis Group, LLC, 2006)

Esta curva se puede aplicar directamente para la determinación del tiempo de secado mayores masas a un contenido de humedad inferior prescrito, siempre que el secado se lleva a cabo bajo condiciones idénticas. Sin embargo, se obtiene mejor información cuando, sobre la base de la figura anterior, la velocidad de secado se traza contra el contenido de humedad del material. La velocidad de secado es de finido por:

$$N_W = -\frac{1}{A_s} \frac{dm_{sw}}{dt} = \frac{m_s}{A_s} \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (6)$$

2.1.3. Tipos de secadores

Los diferentes procesos de secado y por lo tanto las diferentes máquinas de secado se han desarrollado alrededor de los requerimientos específicos de cada producto. En general el secado se realiza por dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático.

En el proceso adiabático el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar, es decir por el proceso de la convección. La superficie sólida toma la temperatura de bulbo húmedo correspondiente a la temperatura del aire y las condiciones de humedad en el mismo lugar. En el periodo de velocidad decreciente la temperatura de los sólidos aproxima a la temperatura de bulbo seco del medio.

En el proceso no adiabático, el calor de evaporación es aportado por el calor radiante, por el calor transferido a través de paredes de contacto (fijas o móviles) con el producto a secar o por calentamiento dieléctrico. La humedad evaporada se deja llevar por el funcionamiento en vacío o por una corriente de gas que es principalmente un portador de la humedad. Se recomienda la operación de vacío para los sólidos sensibles al calor. Debido a que la entalpía perdida con el aire de secado en secadores convectivos es grande, su eficiencia térmica tiende a ser baja. En secadores de conducción la eficiencia térmica es mayor.

(Keey, 1978), ha señalado tres factores principales que podrían utilizarse en la clasificación de los secadores:

1. Suministro de calor al material
2. Temperatura y presión de operación (temperatura alta, media o baja, secado atmosférica o al vacío.)
3. Forma en que el material se trata en el secador (discontinuo o continuo.)

El sistema de secado más eficaz será aquel que mantenga los máximos valores posibles de los gradientes de presión de vapor y de temperatura entre el aire y el interior del producto a secar.

La selección de un tipo de secador depende de una serie de factores entre los cuales se incluye la forma de la materia prima y sus propiedades, la forma física deseada y las características del producto, las condiciones necesarias de operación y los costes de la misma.

En la siguiente figura se indican los principales secadores existentes en la industria alimentaria.

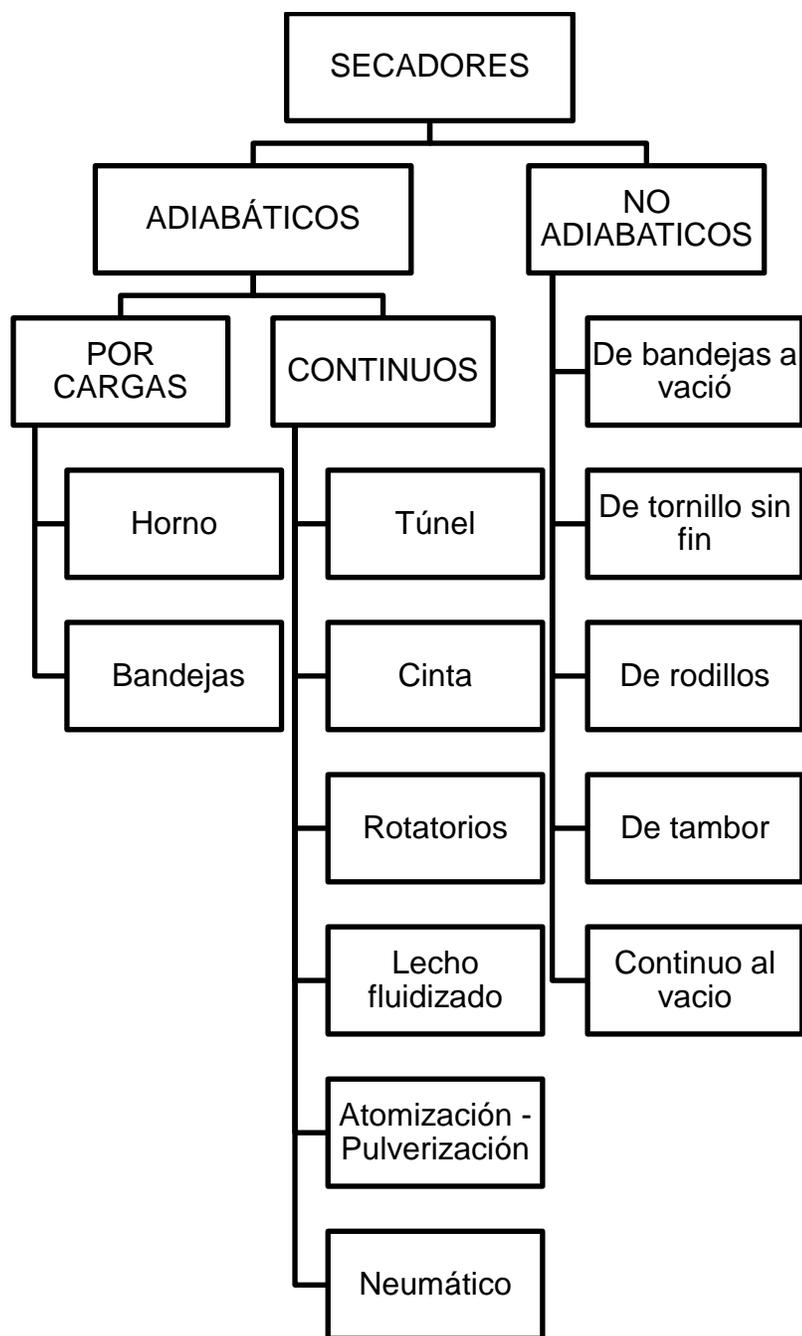


Figura 7: Principales secadores de la industria alimentaria

2.1.4. Propiedades de las frutas y verduras

- **Densidad**

Es la masa por unidad de volumen.

- **Calor específico**

Es la cantidad de energía que gana o pierde un sistema por unidad de masa, para que se produzca en él 1° de cambio en la temperatura sin necesidad de cambio de estado, (Orrego Alzate, 2003). El calor específico de un alimento se obtiene mediante experimentación y varía ligeramente con la temperatura.

$$c_p = \frac{q}{m\Delta T} \quad (7)$$

- **Entalpía**

Es el contenido calórico o nivel de energía de un material, (Orrego Alzate, 2003). La cantidad de calor para calentar o enfriar un material desde una temperatura T1 hasta T2 es:

$$q = m(H_2 - H_1) \quad (8)$$

- **Conductividad térmica**

Es la medida de la capacidad para conducir calor de un material, (Orrego Alzate, 2003). En los alimentos esta propiedad depende principalmente de su composición. Sin embargo hay otros factores que influyen como su forma, tamaño, orientación, homogeneidad, etc. La conductividad térmica está dada por la ley de Fourier.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Según el tipo de material la conductividad térmica tiene diversos valores los cuales se indican en la siguiente tabla.

Tabla 1: Propiedades de frutas

PRODUCTO	CONTENIDO DE AGUA (%)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m**°C)	DENSIDAD (kg/m ³)
Fresas	92	0.675	900
Manzana	85.6	0.393	843
Naranja	85.9	0.431	1030
Plátano	80.18	0,6079	980
Papaya	92,63	0.7715	
Pera	86,8	0.595	1000
Piña	84.9	0.549	1010
Limón	91.8	0.525	930
Durazno	43.4	0.361	
Uvilla	81,26		2090
Mora	84,8	1,814	1060

Fuente: (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005), (Velez R. & Torres D., 1994), (Orrego Alzate, 2003)

- Contenido de humedad

Es la cantidad de agua que contiene el sólido referido al sólido húmedo (sólido + agua)

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_s} * 100 \quad (10)$$

- Contenido de humedad en base seca

Es la cantidad de agua referida al sólido seco.

$$W_s = \frac{m_w}{m_s} * 100 \quad (11)$$

2.2. Transferencia de calor y transferencia de masa

Según (Incropera & DeWitt, 1999), se define la transferencia de calor como “La energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas”. Existen diferentes tipos de procesos de transferencia de calor como modos. Entre ellos tenemos la conducción, convección y radiación.

Las fórmulas de cálculo para determinar la tasa de transferencia de calor para los modos antes mencionados son obtenidas de este mismo autor.

Para secadores de conducción, la tasa de transferencia de calor (kcal / h) viene dada por:

$$q = UA(t_k - t_m) \quad (12)$$

2.2.1. Conducción

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas, está dada por la ley de Fourier. Para una pared plana unidimensional la cual tienen una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación es la siguiente:

$$q''_{x.} = -k \frac{dT}{dx} \quad (13)$$

El calor transferido por conducción a través de una pared plana de área A , es el producto del flujo de calor y el área, viene dado por la ecuación:

$$q_{x.} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

El flujo de calor siempre va a ser normal hacia una superficie de temperatura constante, denominada superficie isoterma, por lo tanto según esta afirmación

el flujo de calor es una cantidad vectorial, y la ecuación más general de conducción viene dado por:

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} - j \frac{\partial T}{\partial y} - k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Una forma alternativa de expresar la ley de Fourier viene dada por la siguiente ecuación:

$$q''_{n.} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (16)$$

En coordenadas cartesianas, la expresión general es:

$$q'' = iq''_x + jq''_y + kq''_z \quad (17)$$

Donde cada componente tiene la siguiente ecuación:

$$q''_{x.} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (18)$$

$$q''_{y.} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (19)$$

$$q''_{z.} = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (20)$$

Cada una de las expresiones relaciona el flujo de calor a través de una superficie con el gradiente de temperatura en una dirección perpendicular a la superficie.

- Ecuación de difusión de calor

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (21)$$

La ecuación del calor establece que “La rapidez de transferencia de energía por conducción en un volumen unitario más la rapidez de generación volumétrica de energía térmica debe ser igual a la rapidez de cambio de la energía térmica almacenada dentro del volumen en cualquier punto del mismo”, (Incropera & DeWitt, 1999). La ecuación 17 es la forma general en coordenadas cartesianas.

2.2.2. Convección

La ecuación del flujo de calor local q'' de una superficie de área A_s y temperatura uniforme T_s está expuesta a una velocidad V y temperatura T_∞ , se expresa como:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (22)$$

La transferencia de calor total se obtiene integrando el flujo local sobre toda la superficie, esto se realiza debido a que las condiciones de flujo varían de punto a punto. De esta integración se obtiene un coeficiente de convección promedio \bar{h} , la misma que está definida en la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h \, dA_s \quad (23)$$

Con este coeficiente de convección promedio se definen el calor total transferido como:

$$q'' = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (24)$$

2.2.3. Radiación

- Potencia emisiva

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra en una temperatura finita. La radiación se debe a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas que constituyen la materia.

La potencia emisiva es la velocidad con la que libera energía térmica una determinada superficie y viene dada por la ecuación, cuando hacemos referencia a un cuerpo negro:

$$E_b = \sigma T_m^4 \quad (25)$$

Al tomar en cuenta una superficie real, se tiene la ecuación:

$$E = \varepsilon \sigma T_m^4 \quad (26)$$

La emisividad ε se define como la eficiencia que emite energía en relación con un cuerpo negro, sus valores se encuentran en el rango de $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

- Absortividad

La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por el área superficial se denomina absortividad y viene dada por la ecuación:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (27)$$

α tiene valores en el rango $0 \leq \alpha \leq 1$, si $\alpha \leq 1$, la superficie es opaca.

Cuando existe intercambio de radiación entre una superficie pequeña T_s y una superficie isoterma mucho más grande que rodea por completo a la

pequeña, se tiene que la velocidad neta de transferencia de calor de radiación desde la superficie, viene dada por la siguiente ecuación:

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (28)$$

La ecuación anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr}) \quad (29)$$

Donde h_r (coeficiente de transferencia de calor por radiación), se expresa por la siguiente ecuación:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{alr})(T_s^2 + T_{alr}^2) \quad (30)$$

2.2.4. Resistencia térmica

La resistencia térmica se define como como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente, la resistencia térmica para la conducción vienen dada por la siguiente ecuación:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (31)$$

La resistencia térmica de la convección es:

$$R_{t,conv} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q} = \frac{1}{hA} \quad (32)$$

Cuando una superficie está separada de los alrededores por un gas, el intercambio de radiación entre la superficie y sus alrededores es importante. La resistencia para la radiación se define como:

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{alr}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (33)$$

En sistemas compuestos donde existen diversas superficies de distintos materiales es conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor, U, el cual se relaciona con la resistencia térmica total, la misma que viene dada por la ecuación:

$$R_{tot} = \Sigma R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (34)$$

La ecuación de transferencia de calor en paredes compuestas es una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton y se define por:

$$q_x = UA\Delta T \quad (35)$$

2.2.5. Balances de masa y energía

Los balances de energía y masa son necesarios como principios de la conservación de la masa y la energía en cualquier volumen de control en el cual se va a realizar un estudio.

- Balance de masa

El principio de conservación de la masa se expresa como: la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo. Se debe tomar en cuenta para fase sólida y gaseosa como sigue:

$$W_S X_1 - W_S X_2 - w_{Dm} A = m_s \frac{dX}{d\tau} \quad (36)$$

$$W_B Y_1 - W_B Y_2 - w_{Dm} A = m_B \frac{dY}{dt} \quad (37)$$

- **Balances de energía**

Se toma en cuenta para fase sólida y gaseosa como sigue:

$$W_S i_{m1} - W_S i_{m2} + (\Sigma q_m - w_{Dm} h_A) A = m_s \frac{di_m}{d\tau} \quad (38)$$

$$W_B i_{g1} - W_B i_{g2} - (\Sigma q_m - w_{Dm} h_A) A = m_B \frac{di_g}{d\tau} \quad (39)$$

2.2.6. Transferencia de masa y calor durante el secado

La transferencia de calor en el interior del alimento está relacionada con el gradiente de temperatura entre la superficie del alimento y la superficie del agua en el interior del alimento.

Los dos aspectos más importantes de la transferencia de calor y masa son:

- La transferencia del agua desde el interior hasta la superficie del material.- Se da cuando se suministra al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor generado se transportará desde la superficie de la capa húmeda en el interior del producto hacia la superficie de este. El gradiente de presión existente entre la superficie del agua en el interior y en el aire exterior al alimento es el que provoca la difusión del vapor del agua hacia la superficie de este.

El calor transmitido depende de la conductividad térmica del alimento mientras que el flujo de agua será proporcional a la difusión del vapor de agua en el aire.

- La extracción del vapor de agua desde la superficie del material.- El transporte del vapor desde la superficie del alimento al aire exterior es

función de la presión de vapor mientras que la transmisión de calor desde el aire hacia el alimento depende del gradiente de temperatura.

Cuatro aspectos afectan la velocidad y el tiempo total de deshidratado.

- Las características del producto, en particular el tamaño de sus partículas y su geometría.
- El arreglo geométrico de los productos con relación al medio calórico de transferencia.
- Las características físicas del medio que deshidrata.
- Las características del equipo deshidratador.

Mientras mayor sea el diferencial de temperatura entre el medio calórico y el producto, mayor será la intensidad de transferencia del calor al producto, permitiendo una mayor energía para extraer la humedad.

2.2.7. Secador al vacío por conducción

Para obtener la ecuación general para secadores de conducción se iguala las ecuaciones de balance de masa y energía, así:

$$-w_{Dm}A = m_s \frac{dX}{d\tau} \quad (40)$$

$$-w_{Dm}A = \frac{m_s dq}{h_A d\tau} \quad (41)$$

Se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{H} \frac{dQ}{dt} \quad (42)$$

La velocidad de suministro de calor en un instante dado depende a su vez de las diferencias de temperaturas entre la fuente de calor y el material, del área disponible para la transferencia de calor y el coeficiente total de transferencia de calor por conducción (Nonhebel & Moss H., 2002), se tiene:

$$\frac{dQ}{dT} = UA(T_h - T_s) \quad (43)$$

La forma general ya integrada viene dada por:

$$R_m = \frac{(X_2 - X_1)m_s}{A * t} = \frac{U_m(T_h - T_s)}{H} \quad (44)$$

2.3. Presión de vacío

Se define al término vacío como un espacio lleno con gases, a una presión menor que la presión atmosférica, y el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas en dicho espacio.

La palabra vacío es usada para describir un amplio rango de condiciones, en primer lugar hace referencia a un espacio sin materia y por otro lado el vacío hace referencia a cualquier gas o aire a presión menor que la atmosférica.

Hay diferentes clases de vacío, los cuales se observan en la tabla 2. Cada régimen de vacío tiene un comportamiento diferente según la aplicación en que se los utilice.

Tabla 2: Rangos de vacío

Grado de vacío	Rango de Presión (Pa)	
Bajo	105	$> P > 3.3 \times 10^3$
Medio	3.3×10^3	$\geq P > 10^{-1}$
Alto	10^{-1}	$\geq P > 10^{-4}$
Muy alto	10^{-4}	$\geq P > 10^{-7}$
Mucho más alto	10^{-7}	$\geq P > 10^{-10}$
Extremadamente alto	10^{-10}	$> P$

2.3.1. Bombas de vacío

Son dispositivos que generan vacío mediante la utilización de un motor eléctrico. Se emplean cuando se requieren elevados caudales de aspiración, existen de varias tecnologías y por ende muchas aplicaciones distintas también.

En las bombas de vacío la extracción de aire del sistema cerrado disminuye progresivamente la densidad del aire dentro del espacio cerrado, haciendo así que la presión absoluta del gas restante baje, creando vacío.

2.3.1.1. Funcionamiento

Una bomba de vacío convierte la energía mecánica a la entrada de un eje de rotación en energía neumática evacuando el aire contenido dentro de un sistema. Así pues, el nivel de presión interna se hace menor a la presión de la atmósfera exterior. La cantidad de energía producida depende del volumen evacuado y la diferencia de presión producida.

La diferencia de presión máxima producida por la acción de la bomba nunca puede ser superior a 29,92 pulg. de Hg (14,7 psi), ya que esto representa un vacío perfecto.

2.3.1.2. Tipos de bombas de vacío

El cuadro 1 indica las diferentes bombas de vacío que existen en el mercado y otras opciones de generar vacío en una cámara cerrada.

Cuadro 1: Tipos de bombas de vacío

Tipo de bomba	Presión de vacío aprox.	Mantenimiento	Ventajas	Desventajas
Bomba de membrana	2 mbar	Cambio de membranas y de válvulas	Bomba seca utilizada en procesos químicos	No alcanza un gran vacío Pequeña capacidad de bombeo
Bombas rotativas	5×10^2 mbar 5×10^3 mbar	Control de nivel de aceite y cambio e aceite antes de su degradación	Alto índice de compresión. Bajo mantenimiento	Contaminación de aceite y vapores al sistema. Protección en determinados procesos.
Bombas rotativas de pistón	27 to 28.5 in. Hg		Poco mantenimiento Exenta de aceite y de partículas. Funciona continuamente bajo todo tipo de condiciones.	Ruidosa
Bombas roots	15 in. Hg		Alta capacidad de bombeo Exenta de aceite Costo de funcionamiento bajo	Necesita bomba de apoyo Ruidosa
Bombas de vacío de desplazamiento no positivo	7 in. Hg		Velocidades de flujo muy alto	No son prácticas para aplicaciones que requieren niveles más altos de vacío y tasas de flujo bajas.

2.3.1.3. Desempeño de la bomba de vacío

Se toman en cuenta 3 criterios para el desempeño de la bomba

- Nivel de vacío a producir
- Tasa de extracción de aire
- Potencia requerida

En general, la mejor bomba para un trabajo específico es la que tiene la mayor capacidad de bombeo en el nivel de vacío requerido y opera dentro de un rango de potencia aceptable.

2.3.1.4. Comportamiento de las moléculas de agua bajo efectos del vacío

Las moléculas en estado estable son de forma esférica al no estar sometidas a ningún tipo de fuerza, sin embargo a medida que son afectadas por factores como el calentamiento o la presión de vacío éstas cambian su forma (Guasumba Codena), el comportamiento de las moléculas se puede apreciar en la figura 8. Al principio las moléculas se encuentran en estado estable, luego son calentadas, se las somete a la presión de vacío, en el cuarto esquema las moléculas están sometidas tanto al calentamiento como a la presión de vacío.

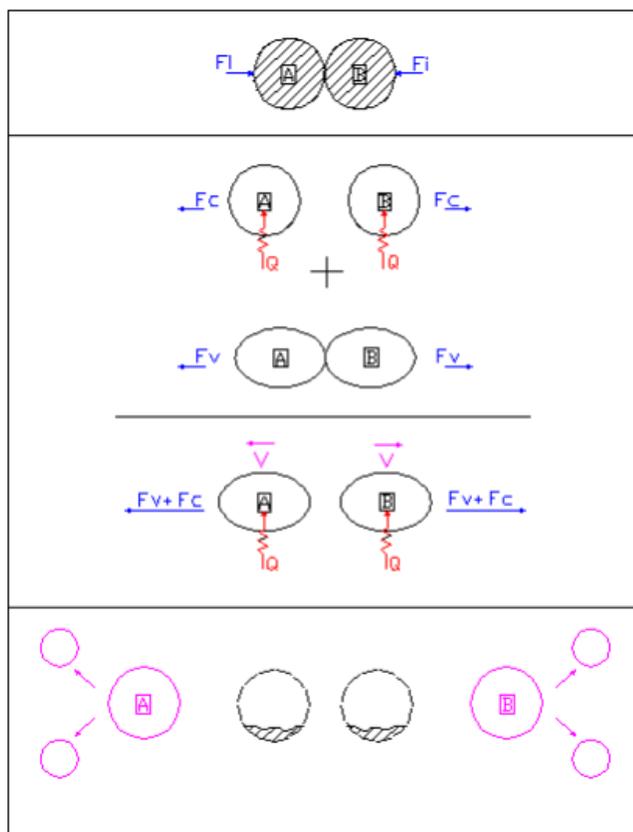


Figura 8: Comportamiento de las moléculas de agua en un secador al vacío

Fuente: (Almache, Gallegos, Guasumba, & Espinosa, 2006)

Donde:

F_i = Fuerzas internas

F_c = Fuerza debido al calentamiento

F_v = Fuerzas debido al vacío

Q = Calor añadido a las moléculas

CAPÍTULO 3

ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para la selección de cualquier secador incluso los secadores de vacío se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos según el cuadro siguiente:

Cuadro 2: Aspectos a tomar en cuenta para la selección de un deshidratador

Forma física del producto	Granular, en partículas, cristalino, pasta, líquido, suspensión, solución, lodos, hojas continuas, tablones, formas extrañas, etc.
Rendimiento medio	kg/h: continuo kg/h: estático
Tipo de energía para funcionamiento	Vapor de agua, electricidad, gas, combustible fósiles
Propiedades de los productos	Tamaño medio de la partícula Distribución en la secadora Densidad Propiedades de rehidratación
Contenido de humedad	Base seca Base húmeda
Requerimientos especiales	Material del secador Corrosión Toxicidad Límites de inflamabilidad Requerimientos de color, textura y aroma

3.1. Secadores al vacío

- Secadores de vacío de cinta sinfín

El alimento se distribuye sobre una cinta sinfín de acero, que circula en una cámara 1-70 Torr sobre dos rodillos huecos, el alimento se deshidrata al pasar por el primer rodillo calentado al vapor y por serpentines calentados por vapor o calefactores radiantes situados sobre una banda sinfín. Una vez deshidratado el alimento se enfría a su paso por el segundo rodillo, enfriado por agua.

- Secador de vacío de paletas

El alimento se coloca en un contenedor de forma cilíndrica en el cual están distribuidas unas paletas. Por su función de agitación, este tipo de secador puede ser utilizado para procesar materiales en pulpa, pasta o polvos. Además, este tipo de secador tiene la capacidad de secar materiales con alta sensibilidad térmica, los cuales necesitan ser procesados a bajas temperaturas.

El contenido de agua de los materiales húmedos se evapora a través de la transmisión de calor. El agitador con cuchilla de raspado tiene la capacidad de remover el material que se encuentra sobre la superficie y llevarlo hasta el contenedor, donde se forma un ciclón, incrementando la uniformidad del calor. La humedad será bombeada hacia el exterior del secador a través de una bomba de vacío. En la figura 9 se observa el secador de paletas al vacío.

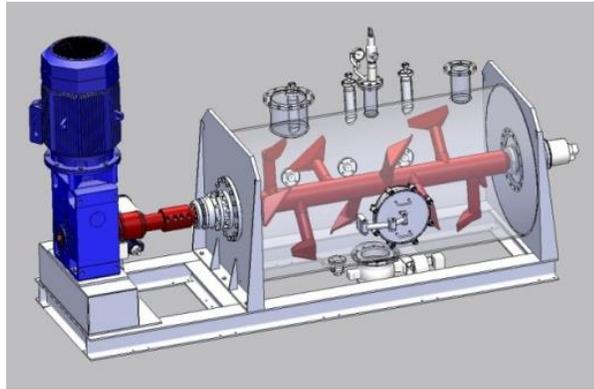


Figura 9: Secador de paletas al vacío

Fuente: (E. Bachiller B, S.A., 2011)

- **Secador al vacío de doble cono**

Este secador tiene excelente estabilidad debido a sus dos tipos de conexión, a través de cadena o patea. Su diseño garantiza una buena concentricidad de los ejes, niveles medios de calor y un sistema de vacío de alta confiabilidad. Además este tipo de secador tiene un sistema continuo de regulación de la velocidad y un control constante de la temperatura.

La camisa o envoltura sellada permite una circulación de aire, la fuente de calor emite altas temperaturas para secar los materiales, mientras realiza su proceso de rotación de manera lenta y los materiales en su interior se mezclan de manera continua, reforzando el secado previo. La salida de los materiales se realiza en estado de vacío. Después de este proceso, el material es descargado a través de una bomba de vacío. Estos procesos de infiltración, evaporación y descarga se repiten de manera continua y los materiales se secan rápidamente. En la figura 10 se observa el secador al vacío de doble cono.



Figura 10: Secador al vacío de doble cono

Fuente: (Jiangyin Hongda Powder Equipment Co., Ltd, 2010)

- **Horno secador al vacío (de bandejas)**

En este horno bajo condiciones de vacío, el punto de ebullición de los materiales disminuye y la fuerza de empuje aumenta, permitiendo que el área de conducción del evaporador se utilice para la transferencia de calor (Guasumba). El alimento se distribuye sobre bandejas metálicas que contactan con la plataforma de soporte. La bomba de vacío se encarga de proveer aire y eliminar el contenido de humedad, mejorando considerablemente la velocidad de secado. Por otra parte, el contenido solvente de los materiales puede ser recuperado a través del uso de un condensador, o por el contrario, si se utiliza una bomba de vacío con anillo serie SK o una bomba de vacío hidráulica serie ZSW, no se necesitara de condensador.

Este secador permite mantener la forma de los materiales procesados, sin producir ningún daño en su estructura. Básicamente, la fuente de calor debe ser un vapor de baja presión o vapor con altos niveles de calor. En la figura 11 se observa el horno secador de vacío.



Figura 11: Horno secador al vacío

Fuente: (Jiangyin Hongda Powder Equipment Co., Ltd, 2010)

- **Secador de vacío de microondas**

Este deshidratador contiene largas cámaras de acero inoxidable sujetas a condiciones de vacío. Las cámaras contienen un transportador, una unidad microonda y una fuente de energía radiante. Hay tres zonas en el equipo. A medida que los alimentos se transportan en las zonas, cada una de ellas tiene diferente potencia de microonda, figura 3.

La incorporación de microondas en la cámara de vacío minimiza la oxidación del producto y disminuye el punto de ebullición del agua en los alimentos haciendo posible que el secado se dé en menor tiempo y a temperaturas menores a 55°C. Bajas temperaturas de secado permiten la mínima degradación de las características de los alimentos, tales como el color, sabor y el valor nutricional.

3.2. Alternativas para el deshidratador al vacío

Los diferentes deshidratadores que existen y los parámetros más significativos de cada uno de ellos se encuentran detallados en el anexo A, apéndice 1.

3.3. Selección de la alternativa óptima para el deshidratador al vacío

Para determinar la alternativa óptima del deshidratador al vacío, se utilizó el método de factores ponderados. Primero se desarrolla la matriz de pesos ponderados (WF), para lo cual los criterios de evaluación deben estar ordenados de mayor a menor relevancia y se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos de evaluación.

Cuadro 3: Parámetros de evaluación

Valor	Criterio
1	Parámetro con mayor importancia respecto a otro
0,5	Parámetro de igual importancia o condiciones iguales
0	Parámetro menos importante con respecto a otro

Tabla 3: Matriz de pesos ponderados

No.	Criterio de evaluación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ	WF
1	Facilidad de construcción	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	2	9,5	0,18
2	Facilidad de aprovisión de materiales	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1	2	9,5	0,18
3	Bajo costo de fabricación			0	0,5	1	1	1	1	1	2	7,5	0,14
4	Calidad del producto final			0,5	0	1	1	1	1	1	2	7,5	0,14
5	Tiempo de secado					0	1	1	1	1	2	6	0,11
6	Mantenibilidad						0	0,5	1	1	2	4,5	0,08
7	Disponibilidad de espacio						0,5	0	1	1	2	4,5	0,08
8	Bajo consumo de energía								0	1	2	3	0,05
9	Tipo de energía									0	2	2	0,04
											$\Sigma=$	54	1

A continuación se debe desarrollar la matriz de factores ponderados, para lo cual se asigna un valor RF (Rating Factor), que indica el nivel de cumplimiento de cada alternativa con respecto al criterio evaluado, como se indica en el siguiente cuadro.

Cuadro 4: Parámetro de evaluación para RF

RF	Nivel de cumplimiento
10-9	Excelente
8-6	Bueno
5-3	Regular
2-1	Malo

Finalmente para determinar el factor ponderado para cada alternativa (P), se multiplica el WF (Waiting Factor) obtenido de la tabla 3 por el RF asignado según el cuadro 5. Luego se procede a sumar todos los factores ponderados y el que obtenga mayor puntaje se considera como la alternativa más adecuada para el tipo de deshidratador que se requiere diseñar. La matriz de pesos ponderados se puede visualizar en el anexo A, apéndice 2.

3.3.1. Análisis de la alternativa seleccionada

La alternativa más óptima es un secador de bandejas al vacío con resistencias eléctricas, (alternativa D) por las siguientes razones:

- La facilidad de construcción y de materiales en el mercado es una de las razones de mayor peso debido a que el horno de bandejas es relativamente el más sencillo de todas las tecnologías antes mencionadas especialmente en su construcción.

- La transferencia de calor al producto va a ser por resistencias eléctricas, la misma que es una solución sencilla a diferencia de un sistema por microondas o por transporte de calor por medio de vapor de agua que utilizan algunos secadores.
- Las resistencias van a aportar la transferencia de calor necesario para el secado de las frutas sin que exista algún cambio en su estructura químico o mecánico que afecte al producto durante el proceso.
- El secado en cámara permite que la fruta no sufra ningún daño en su forma debido a que esta permanece en su misma posición sin que exista movimiento mecánico durante el proceso.
- La tecnología es relativamente sencilla en comparación con otras tecnologías de vacío.

CAPÍTULO 4

DISEÑO

Para el diseño del deshidratador al vacío se debe tomar en cuenta dos tipos de diseño. El primero es un diseño térmico el cual permite calcular la energía necesaria para el secado de los productos, el tiempo de secado y las dimensiones de las bandejas dentro del horno; y un diseño mecánico que permitirá determinar el espesor del recipiente que soportará la presión de vacío.

4.1. Diseño térmico

4.1.1. Criterios de diseño

- *Temperatura de operación*

Se toma en cuenta un rango de temperaturas de 40°C – 75°C debido a que los alimentos pierden sus propiedades y pueden ocurrir reacciones químicas en su interior [1] cuando la temperatura es mayor que 75°C.

La temperatura que tendrán las placas dentro del deshidratador es de 60°C, la misma que se encuentra dentro del rango antes descrito y es la necesaria para vaporizar el agua de los alimentos.

- *Presión de operación*

A las temperaturas de operación se tiene un rango de presiones de 7 – 39 KPa (Tabla A-4, Termodinámica, Yunus A. Cengel) en el interior del deshidratador, lo que permitirá que el agua se sature y pase al estado gaseoso y consecuentemente a su eliminación por el condensador.

La presión de operación será de 20 KPa, la misma que corresponde a 60°C.

- *Humedad inicial del producto*

Tomando en cuenta que el secado se va a realizar para diferentes frutas, los valores del contenido de humedad se encuentran en la tabla 1.

- *Humedad final del producto*

Mientras más bajo sea el porcentaje de humedad en el producto, mayor será su tiempo de conservación y los microorganismos y bacterias no proliferarán fácilmente. Un contenido de humedad del 12% es aceptable según datos del INIAP, sin embargo para el presente proyecto se manejará un 8% de humedad.

El contenido de humedad final determina el tiempo y las condiciones requeridas para el secado. El secado excesivo debe ser evitado. Gradientes de humedad internos dentro de las partículas y la variación de humedad entre partículas son importantes.

4.1.2. Mecanismo de transferencia de calor

Los cálculos se realizaran como fruta referencial piña.

$$MS = 1 \text{ kg}$$

$$X_{wi} = 84,9$$

$$MH = \frac{MS}{\frac{100 - X_{wi}}{100}} = \frac{1}{\frac{100 - 84,9}{100}} = 6,622$$

$$MH = 7$$

$$VCuba = 0,35 * 0,25 * 0,01 = 8,75 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_{piña} = 1010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$WCC = \rho_{piña} * VCuba = 0,884 \text{ kg} \quad \text{Peso de la piña en cada cuba}$$

$$NroCubas = \frac{MH}{WCC} = \frac{7}{0,884} = 7,92$$

$$NroCubas = 8 \quad \text{Redondeo por simetría}$$

$$MECC = \frac{Masa}{NroCubas} = 0,875 \quad kg \quad \text{Masa en cada cuba}$$

$$VECC = \frac{MECC}{\rho_{piña}} = 8,663 * 10^{-4} \quad m^3 \quad \text{Volumen en cada cuba}$$

$$AUC = 0,35 * 0,25 = 0,0875 \quad m^2 \quad \text{Área unitaria de la cuba}$$

$$HECC = \frac{VECC}{AUC} = 9,9 * 10^{-3} \quad m \quad \text{Altura en cada cuba}$$

Para diferentes frutas se tiene los datos de la tabla 4. Para el presente proyecto y los cálculos se tomará en cuenta los valores promedio.

Tabla 4: Número de cubas en el secador

Fruta	MH (kg)	WCC (kg)	Nro Cubas	HECC (mm)
Uvilla	5	1,829	3	10
Piña	7	0,884	8	10
Manzana	7	0,737	9	10
Frutilla	13	0,787	15	11
Naranja	7	0,901	8	10
Mora	7	0,927	8	10
Pera	8	0.875	9	10
PROMEDIO	8	0.991	8	10

Parámetros de diseño

Tomando en cuenta la capacidad inicial del deshidratador y el peso de masa húmeda de diferentes frutas, los parámetros de diseño térmico se indican en la siguiente tabla, los cuales serán de ayuda para el cálculo de transferencia de calor en el deshidratador.

Tabla 5: Parámetros de diseño térmico

Contenido inicial de Humedad	X_1	84.9%
Contenido final de humedad	X_2	8%
Peso del producto seco	M_s	1 (kg)
Área unitaria de la cuba	AUC	0,0875 (m ²)
Superficie del secador	A	0.7 (m ²)
Temperatura resistencias	T_h	100 °C
Temperatura de ebullición del agua	T_b	60°C

$$U = \frac{1}{\frac{e_{angulo1}}{k_{inox}} + \frac{e_{angulo2}}{k_{inox}} + \frac{e_{bandeja}}{k_{inox}} + \frac{e_{fruta}}{k_{fruta}}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,320}{16,3} + \frac{0,010}{16,3} + \frac{0,010}{16,3} + \frac{0,004}{0,549}}$$

$$U = 35.53$$

$$U = 35.53 \left(\frac{W}{m^2K} \right)$$

$$R_m = \frac{U(T_h - T_b)}{H}$$

$$R_m = \frac{35.53 (100 - 60)}{251.18 \times 10^3}$$

$$R_m = 5.644 \times 10^{-3} \left(\frac{kg}{sm^2} \right)$$

$$t = \frac{(X_2 - X_1)m_s}{A * R_m}$$

$$t = \frac{(84.9 - 8)1}{0.7 * 5.644 * 10^{-3}}$$

$$t = 19464.41 (s) = 5.41 (horas)$$

4.1.3. Energía necesaria para el secado

$$\frac{dQ}{dT} = UA(T_h - T_s)$$

$$\frac{dQ}{dT} = 35.53 * 0.7(100 - 60)$$

$$\frac{dQ}{dT} = 994.84 \text{ (W)}$$

Los datos obtenidos para diferentes frutas se indican en la siguiente tabla.

Tabla 6: Tiempo de secado y potencia del deshidratador al vacío

Fruta	U (W/m ² K)	RM (kg/m ² s)	T (hora)	dQ/Dt (W)
Uvilla	32,22	0,00513	5	902,149
Piña	35,53	0,00566	6	994,853
Manzana	32,22	0,00513	6	902,149
Frutilla	37,33	0,00595	6	1045,368
Naranja	33,18	0,00528	6	929,009
Mora	43,36	0,00690	5	1214,015
Pera	36,26	0,00577	6	1015,170
MÁXIMOS VALORES	43,36	0,00690	6	1214,015

Tomando en cuenta los valores obtenidos para diferentes frutas se calcula el valor máximo de dichos valores y como resultado el deshidratador al vacío funciona a 1.2 (KW) de potencia y el tiempo aproximado de secado es de 6 horas para diversas frutas.

4.1.4. Cálculo de dimensiones

Para el cálculo de las dimensiones internas del secador al vacío se toman como referencia 5 frutas diferentes, según la tabla 7.

- Dimensiones de la estructura de las bandejas

Tabla 7: Dimensiones de la estructura de las bandejas

Altura	0.362 (m)
Ancho	0.260 (m)
Largo	0.350 (m)
Nro de Cubas	8
Distancia entre cubas	0.035 (m)
Dimensiones de la Cuba	0.25 (m) x 0.35 (m)

- Espesor del aislante

El espesor del aislante es necesario conocer para que la temperatura del cilindro externo sea el adecuado para el contacto con el usuario.

Para determinar el espesor se procede a realizar la transferencia de calor en sistemas radiales utilizando el método de resistencias eléctricas, como se indica en la siguiente figura.

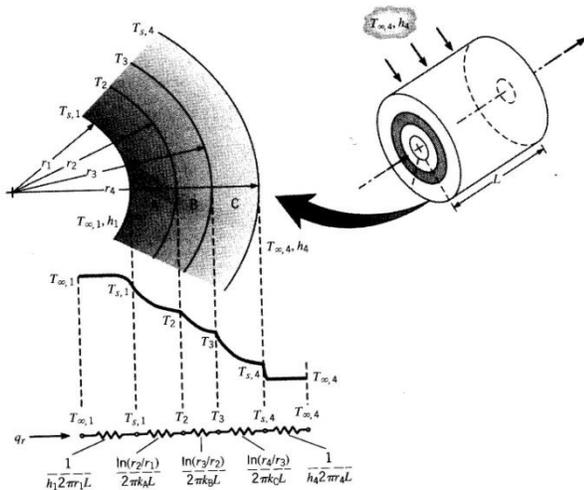


Figura 12: Transferencia de calor en sistemas radiales

Autor: (Incropera & DeWitt, 1999)

$$Q = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,4}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}}$$

$$902,149 = \frac{100 - 18}{\frac{1}{20 \times 2\pi \times 0,225 \times 0,41} + \frac{\ln(0,227/0,225)}{2\pi \times 16,3 \times 0,41} + \frac{\ln((e + 0,227)/0,227)}{2\pi \times 0,09 \times 0,41} + \frac{\ln((e + 0,227 + 0,7)/(e + 0,227))}{2\pi \times 16,3 \times 0,41}}$$

$$e = 3,69 \text{ mm}$$

4.2. Diseño mecánico

4.2.1. Códigos y normas aplicables

Para el diseño y construcción del recipiente a presión se escogió el código ASME, Sección VIII, División 1, "Diseño de recipientes a presión", (ASME, 1992) conjuntamente con "Pressure vessel handbook" (Megyesy, 2001), en donde indican las normas a seguir para el diseño y construcción de cualquier recipiente sometido a las condiciones requeridas para el presente proyecto.

El deshidratador al vacío tiene una presión interna menor que la presión externa, por tal motivo los cálculos para el diseño mecánico serán enfocados para presión externa.

4.2.2. Parámetros de diseño

- Temperatura de diseño (UG-20)

La temperatura máxima utilizada en el diseño no deberá ser menor que la temperatura media (a través del espesor) esperada en las condiciones de operación y la temperatura mínima del metal utilizada en el diseño deberá ser la más baja esperada en el servicio. Entre las consideraciones que se deben tomar en cuenta son: temperatura de operación más baja, trastornos operacionales, auto refrigeración, temperatura atmosférica y otras formas de enfriado.

La temperatura de operación del presente proyecto es de 60°C, la misma que se encuentra dentro de las especificaciones del código.

- Presión de diseño (UG-21)

Los recipientes se diseñan mediante el código ASME Sección VIII división 1, deben calcularse para la condición más severa de presión y temperatura durante la operación normal. Se debe tomar en cuenta la diferencia máxima de presiones interna y externa del recipiente (presión de trabajo máxima permisible).

- Cargas (UG-22)

Existen varios tipos de cargas identificados en la Sección VIII del código ASME, que deben ser consideradas en el diseño del recipiente.

- Cargas por Presión
- Gradientes por Temperatura

- Peso del recipiente y su contenido
- Cargas Superpuestas
- Esfuerzos Localizados
- Cargas de Impacto
- Cargas de Viento*
- Cargas de Terremoto*

* Cuando sean aplicables utilizando el código estructural

- **Esfuerzo máximo permisible (UG-23)**

El esfuerzo máximo permisible es el máximo esfuerzo unitario permitido en un material los esfuerzos que deben tomarse en cuenta en la Sección VIII del código ASME, son:

- Esfuerzo de tensión
- Esfuerzo de compresión longitudinal

- **Espesor de envolventes y de tubos flus sometidos a presión externa (UG-28)**

Los cálculos para el diseño de recipientes sometidos a presión externa se encuentran descritos en el párrafo UG-28 de la norma ASME sección VIII, y servirán de guía para el diseño mecánico del presente proyecto.

- **Tapas formadas, presión en el lado convexo (UG-33)**

El párrafo UG-33 de la norma ASME sección VIII, permite determinar el espesor de las cabezas del cilindro sometidos a presión externa, ya que la presión mayor se encuentra en la parte externa del cilindro (lado convexo).

4.2.3. Cálculo de parámetros dimensionales

4.2.3.1. Determinación de las dimensiones del recipiente a presión

Tomando en cuenta la tabla 7, se procede a calcular el radio interno del cilindro y su longitud, según la figura 13.

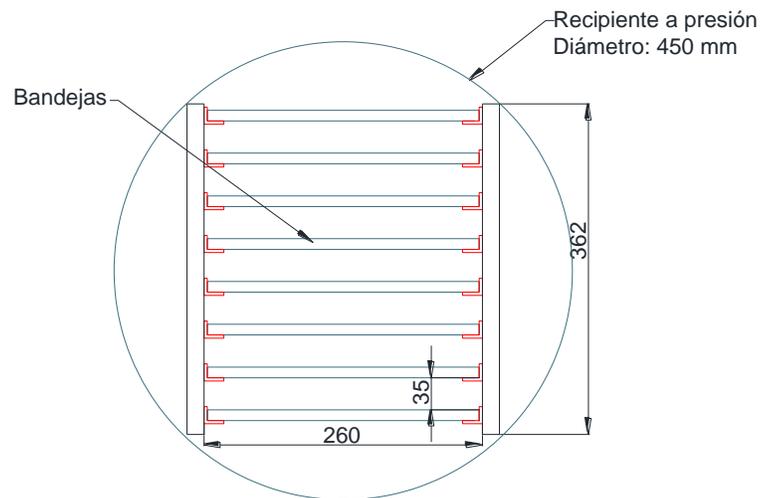


Figura 13: Esquema dimensiones del recipiente a presión

Como la longitud de las bandejas es de 350 mm, la longitud del recipiente será:

$$L_{\text{recipiente}} = L_{\text{bandejas}} + \text{Ancho}_{\text{angulo}} + \text{Tolerancia}$$

$$L_{\text{recipiente}} = 350 + 27 * 2 + 63 = 410 \text{ mm}$$

4.2.4. Cargas de diseño

Los parámetros de diseño mecánico se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8: Parámetros de diseño mecánico

PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad		7.8 g/cm ³ (0.28 lb/in ³)
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Resistencia a la fluencia	S	310 MPa (45KSI)
Resistencia máxima		620 MPa (90KSI)
Elongación		30% (en 50 mm)
Reducción de área		40%
Módulo de elasticidad		200 GPa (29000 KSI) Continua
DATOS DISEÑO MECÁNICO		
Eficiencia de la junta	E	1
Radio interior	R	250 mm (9.84 in)
Diámetro interior	D	500 mm (19.68in)
Cabeza		Elipsoidal 2:1

$$P_o = 20 \text{ (KPa)} = 2.9 \text{ (psi)}$$

$$P = 15 \text{ (psi)}, \text{ presión externa de diseño}$$

4.2.5. Cálculo de dimensiones

4.2.5.1. Determinación del espesor del cuerpo y de las cabezas

ESPESOR DEL CUERPO

PRIMERA ITERACIÓN

1) Determinar D_o/t

Se asume un valor de $t = 2 \text{ mm}$

$$t = 0,0787 \text{ plg}$$

$$D_o = D_i + 2 * t$$

$$D_o = 19.68 + 2 * 0,0787$$

$$D_o = 19.84$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{19.84}{0.0787} = 252.096 > 10$$

Debido a que el valor D_o/t fue mayor 10 se utiliza los siguientes cálculos.

2) Determinar L/D_o

$$\frac{L}{D_o} = \frac{16.14}{19.84} = 0.8135$$

3) Con el valor de D_o/t y L/D_o se encuentra el valor del factor A en la figura G (Anexo B)

$$\text{Factor A} = 0.0004$$

4) Con el valor del factor A se encuentra el valor de B en la figura D (Anexo C)

Material: AISI 304

$$E: 29 \times 10^6 \text{ (psi)}$$

$$B: 5750$$

5) Cálculo de la máxima presión externa admisible

$$P_a = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)}$$

$$P_a = \frac{4 \times 5750}{3 \left(\frac{19.84}{0.0787} \right)} = 30.41 \text{ psi}$$

SEGUNDA ITERACIÓN

1) Determinar D_o/t

Se asume un valor de $t=5/127$ plg

$$D_o = D_i + 2 * t$$

$$D_o = 19.68 + 2 * 5/127$$

$$D_o = 19.76$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{19.76}{5/127} = 501.872 > 10$$

Debido a que el valor D_o/t fue mayor 10 se utiliza los siguientes cálculos.

2) Determinar L/D_o

$$\frac{L}{D_o} = \frac{16.14}{19.76} = 0.817$$

3) Con el valor de D_o/t y L/D_o se encuentra el valor del factor A en la figura G (Anexo B)

$$\text{Factor A} = 0.00017$$

4) Con el valor del factor A se encuentra el valor de B en la figura D (Anexo C)

Material: AISI 304

$$E: 29 \times 10^6 \text{ (psi)}$$

$$B: 2000$$

5) Cálculo de la máxima presión externa admisible

$$P_a = \frac{4B}{3 \left(\frac{D_o}{t} \right)}$$

$$P_a = \frac{4 \times 2000}{3 \left(\frac{19.93}{\frac{5}{127}} \right)} = 5.27 \text{ psi}$$

Tabla 9: Iteraciones para el cálculo del espesor en el cuerpo del cilindro

ITERACIÓN N°	t (mm)	Pa (psi)	P (psi)
1	1	5,27	15
2	2	30,41	15

En la primera iteración, como Pa es menor que P, seleccionamos un valor para t mayor (2 mm) y volvemos a calcular Pa. En el segundo caso como Pa (30,41 psi) es mayor que P, se concluye que el espesor óptimo del recipiente sometido a presión externa es de 2 mm.

ESPESOR DE LAS CABEZAS

Las tapas utilizadas en el presente proyecto serán de forma toriesférica.

El espesor de las cabezas toriesférica requerido será el valor mayor de los siguientes espesores:

1.- El espesor calculado por las fórmulas dadas por presión interna utilizando una presión de diseño de 1,67 veces la presión externa y una eficiencia de junta $e = 1$.

2.- El espesor dado por la fórmula

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

donde $R_o = D_o$ y el factor B se determina como en el caso del cuerpo.

PRIMER ESPESOR

$$P = 15 \times 1.67 = 25.05 \text{ (psi)}$$

$$t = \frac{PD}{2SE + 1.8P}$$

$$t = \frac{25.05 \times 19.76}{2 \times 45000 \times 1 + 1.8 \times 25.05}$$

$$t = 5.5 \times 10^{-3} (\text{plg})$$

$$t = 0.1 (\text{mm})$$

SEGUNDO ESPESOR

PRIMERA ITERACIÓN

1) Suponer valor de t

$$t = 1/8 \text{ plg}$$

2) Calcular valor del factor A mediante la siguiente fórmula

$$A = \frac{0.125}{R_o/t}$$

$$A = \frac{0.125}{\frac{9.84}{1/8}} = 1.588 * 10^{-3}$$

3) Con el valor del factor A se encuentra el valor de B en la figura D (Anexo C)

Material: AISI 304

E: 29×10^6 (psi)

B: 14000

4) Cálculo de la máxima presión externa admisible

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

$$P_a = \frac{14000}{\left(\frac{9,84}{1/8}\right)} = 177.84 \text{ psi}$$

Debido a que la presión de externa admisible es mayor que la presión de diseño, se realizan diversas iteraciones para encontrar el espesor óptimo.

SEGUNDA ITERACIÓN

- 1) Suponer valor de t

$$t = 2 \text{ mm}$$

$$t = 0,0787 \text{ plg}$$

- 2) Calcular valor del factor A mediante la siguiente fórmula

$$A = \frac{0.125}{R_o/t}$$

$$A = \frac{0.125}{\frac{9,84}{0,0787}} = 9.997 * 10^{-4}$$

- 3) Con el valor del factor A se encuentra el valor de B en la figura D (Anexo C)

Material: AISI 304

E: 29×10^6 (psi)

B: 12000

- 4) Cálculo de la máxima presión externa admisible

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

$$P_a = \frac{12000}{\left(\frac{9,84}{0,0787}\right)} = 95.97 \text{ psi}$$

TERCERA ITERACIÓN

- 1) Suponer valor de t

$$t = 1 \text{ mm}$$

$$t = 0,0394 \text{ plg}$$

2) Calcular valor del factor A mediante la siguiente fórmula

$$A = \frac{0.125}{R_o/t}$$

$$A = \frac{0.125}{\frac{9.84}{0,0394}} = 5.005 * 10^{-4}$$

3) Con el valor del factor A se encuentra el valor de B en la figura D (Anexo C)

Material: AISI 304

E: 29×10^6 (psi)

B: 7000

4) Cálculo de la máxima presión externa admisible

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

$$P_a = \frac{7000}{\left(\frac{9,84}{0,0394}\right)} = 28,03 \text{ psi}$$

Debido a que la P_a se acerca al valor de la presión de diseño, la iteración a finalizado y se escoge como espesor $t = 1 \text{ mm}$.

El valor mayor de espesor en las cabezas es de 1 mm, el cual corresponde a la segunda opción, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 10: Espesores calculados para las cabezas toriesféricas

Opciones	t (mm)
1	0,1
2	1

4.2.5.2. Determinación de aberturas

Las aberturas del recipiente se encuentran descritas en la tabla 11 según la figura 14.

Tabla 11: Aberturas en el secador al vacío

ABERTURA	DESCRIPCIÓN	DIAMETRO NOMINAL (in)	CÉDULA	ESPESOR (in)
N1	Toma de la bomba de vacío	1	40s	0,113
N2	Toma del vacuometro	½	40s	0,109
N3	Toma de la termocupla	½	40s	0,113

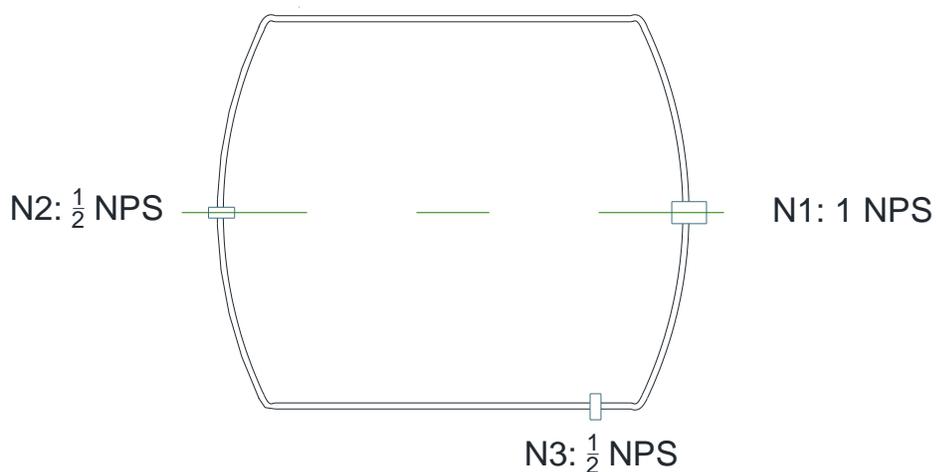


Figura 14: Aberturas del secador al vacío

REFUERZO EN ABERTURAS

Las aberturas para el secador sometido a presión de vacío no requieren refuerzo según lo enunciado en el código ASME Sección VIII división 1, párrafo UG – 36, (c) “Resistencia y diseño de aberturas terminadas”, numeral (3):

“Las aberturas en recipientes no sujetos a fluctuaciones rápidas de presión no requieren refuerzo diferente de aquel inherente a la construcción conforme a las siguientes condiciones”:

- a) Conexiones de soldadura no ferrosa fijadas de acuerdo con las reglas aplicables y con una abertura terminada no más grande que 3-1/2 pulg de diámetro en envolventes o tapas de recipientes de 3/8 pulg o menos de espesor; 2-3/8 pulg de diámetro en envolventes o tapas de recipientes de más de 3/8 pulg de espesor.
- b) Conexiones con rosca, co husillos o expandidas, en las cuales el agujero cortado en la envolvente o tapa no es mayor que 2-3/8 pulg de diámetro.
- c) Ningún par de abertura sin refuerzo aisladas, deberán tener sus centros más cercanos uno del otro que la suma de sus diámetros.
- d) Ningún par de dos aberturas sin refuerzo en una agrupación de tres o más aberturas sin refuerzo deberán tener sus centros más cercanos uno del otro.

4.3. Selección de accesorios y equipos adicionales

4.3.1. Bomba de vacío

4.3.1.1. Parámetros de la bomba de vacío

- Volumen a eliminar

Para determinar el volumen que la bomba de vacío debe expulsar del interior de la cámara de secado, se procede a calcular el volumen del recipiente.

$$V = l * \frac{\pi * D_{in}^2}{4}$$

$$V = 389 * \frac{\pi * 500^2}{4}$$

$$V = 76379971.39 \text{ mm}^3$$

$$V = 0.0764 \text{ m}^3$$

$$V = 0.481 \text{ bbl}$$

- Capacidad

Se determina mediante la siguiente ecuación (Mcketta, 1997), en unidades absolutas de presión:

$$S_p = \frac{V}{T} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$S_p = \frac{0.481}{0.0166} \ln \left(\frac{760}{150.013} \right)$$

$$S_p = 46.828 \frac{\text{bbl}}{\text{h}}$$

$$S_p = 4.382 \text{ cfm}$$

- Potencia

Para las bombas de vacío de pistón, una regla general es que se necesita alrededor de 1 caballos de fuerza por cada 20 pies cúbicos por minuto de aire bombeado, tomando en cuenta lo anterior se tiene:

Tabla 12: Potencia de la bomba de vacío

Capacidad (cfm)	Potencia (Hp)
20	1
4	1/5

Se resume las características para la selección de la bomba de vacío en la siguiente tabla.

Tabla 13: Parámetros de selección de la bomba de vacío

PARÁMETRO	SIMBOLO	VALOR
Capacidad de bombeo	S_p	4cfm
Volumen a evacuar	V	0.481 (bbl)
Presión máxima de vacío	P_1	760 (torr)
Presión de vacío del sistema	P_2	150.013 (torr)
Tiempo	T	1 (min)
Potencia	P	1/5 (Hp)

Se debe tomar en cuenta las bombas de vacío que existen en el mercado y sus características, por lo tanto no siempre se puede encontrar los parámetros que se necesitan para determinado sistema y hay que acoplarse según la disponibilidad y el costo de cada bomba.

La siguiente figura indica un rango de valores para la selección de la bomba de vacío que sea adecuada para el deshidratador y se encuentre dentro de los valores calculados.

Vacuum Pump Type	Range of Open Capacities (cfm)	Motor H.P. Requirements
Piston (1-stage) (2-stage)	1.8 to 10.5 cfm 1.15 and 2.30 cfm	1/6 to 3/4 1/8 and 1/4
Rocking piston (1-stage) (2-stage)	1.12 to 1.6 cfm 1.25 to 2.7 cfm	1/8 to 1/4 1/4
Rotary vane (oil-lubricated & oil-less)	0.60 to 10.0 cfm	1/15 to 3/4

Figura 15: Parámetros de la bomba de vacío según fabricantes

Fuente: (IDEX Corporation, 2014)

Según la anterior figura se tiene nuevos valores para los parámetros de la bomba de vacío los cuales se indican en la siguiente tabla.

Tabla 14: Parámetros de selección de la bomba de vacío (proveedores)

PARÁMETRO	SIMBOLO	VALOR
Capacidad de bombeo	S_p	5.5 (cfm)
Volumen a evacuar	V	0.481 (bbl)
Presión máxima de vacío	P_1	760 (torr)
Presión de vacío del sistema	P_2	150.013 (torr)
Tiempo	T	3 (min)
Potencia	P	$\frac{1}{2}$ (Hp)

4.3.2. Resistencias térmicas

En el mercado existe una diversidad de resistencias térmicas para calentar cualquier proceso según los requerimientos indicados, entre las diferentes resistencias se tiene:

- Resistencias tipo banda

Consiste en una abrazadera la misma que se coloca en el área cilíndrica que se va a calentar, la resistencia está aislada con mica o cerámica. Tiene terminales de conexión tipo tornillo o cables flexibles (JM Industrial Technology S.A., 2009)

- Resistencias tipo cartucho de baja y alta concentración

Son utilizadas en aplicaciones de alta temperatura y brindan mucha más potencia en la misma área.

- Resistencias tubulares

Son fabricadas en una amplia variedad de formas con recubrimientos de cobre, acero inoxidable, incoloy y son resistentes a choques térmicos, corrosión, altas temperatura y vibraciones.

Algunas son fundidas en moldes permanentes de acero o aluminio produciendo una fusión de densidad uniforme alrededor de la resistencia, brindando bajas densidades de potencia y una transferencia uniforme de calor y alta durabilidad

- Resistencias de inmersión

Estas consisten en uno o varios elementos tubulares soldados en una placa, tapón roscado ó brida. Son utilizadas en aplicaciones donde se requiere calor directo.

4.3.2.1. Selección de la resistencia térmica

Para el deshidratador al vacío se procede a seleccionar la resistencia térmica tipo tubular debido a las siguientes razones:

- Es la más económica en el mercado.
- Las terminales de conexión son simple para conectar la fuente eléctrica y que esta funcione adecuadamente.

4.3.3. Temporizador

Se seleccionó el temporizador, modelo AT8N, de la marca Autonics. Las características son las siguientes:

- Rango de ajuste del tiempo: 0.05 segundos – 100 horas
- Alimentación 100 o 240 Vac (50/60Hz)
- Peso: 90g

4.3.4. Termostato

Se seleccionó Termostato digital, serie TIC-17RGTi, de la marca Full Gauge. Las características son las siguientes:

- Control digital

- Alimentación 115 o 230 Vac (50/60Hz)
- Temperatura de control: -50 hasta 105°C
- Temperatura de operación: 0 hasta 50°C
- Resolución: 0.1°C (entre -10 y 100°C) y 1°C en los demás
- Corriente máxima 16(8)A /250Vac 1HP
- Humedad de operación: 10 hasta 90% HR (no condensante)
- Dimensiones: 71 x 28 x 71 mm

4.3.5. Termocupla

Una termocupla consiste en dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura. Las termocuplas más utilizadas se indican en la siguiente figura.

Termocuplas metálicas				
Tipo ANSI-ISA	Combinación de metales	Sensibilidad	Composición química	Rangos de temperatura
J	Hierro/ constantan	5,6 mV/ 100 ° C	Fe 44 Ni:55 Cu	-40 a + 750
K	Cromel/ Alumel	3,6 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 94 Ni:Al:Mn:Fe	-40 a +1200
T	Cobre/ constantan	4,5 mV/ 100 ° C	Cu 44 Ni:55 Cu	-50 a + 400
E	Cromel/ constantan	7,9 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 44 Ni:55 Cu	-40 a +900

Figura 16: Tipos de termocuplas

Fuente: (Universidad nacional de la Plata)

4.3.5.1. Selección de la termocupla

Se selecciona la termocupla tipo J debido a las siguientes razones:

- Es económica
- Es la más usada en cualquier proceso
- Los rangos de temperatura se encuentran dentro de los valores de la temperatura al interior del deshidratador.
- Alimentación 115 o 230 Vac (50/60Hz)

CAPITULO 5

CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE

5.1. Construcción

En la construcción del deshidratador al vacío se tomará en cuenta los diferentes procesos de manufactura necesarios para la fabricación de cada parte y en general de todo el deshidratador. Los planos de conjunto, general, de despiece y las hojas de procesos son indispensables para que la mano de obra encargada tenga una visualización de lo que se requiere fabricar y lo realice de la forma correcta.

Los diferentes planos del deshidratador al vacío se encuentran en la sección de Anexos al final de la tesis según el siguiente cuadro.

Cuadro 5: Ubicación de planos

Plano	N° Hoja	Ubicación
Plano de conjunto	1	Anexo D – Apéndice 1
Plano general	2,3	Anexo D – Apéndice 2
Planos de despiece	4-14	Anexo D – Apéndice 3
Hojas de procesos	1-23	Anexo E

La mano de obra está conformada por un soldador y un ayudante, los cuales trabajaran en una jornada de 4 horas diarias en un lapso de tiempo de 1 mes. Estarán bajo supervisión de un ingeniero de planta que supervisará y dará instrucciones 1 hora diaria durante 1 mes.

Entre los procesos involucrados para la construcción del deshidratador al vacío se encuentran:

- Corte de material.- corte plasma, tronzado, taladrado
- Desbaste de material.- torneado
- Conformado de material.- Doblado de placas y tubos, barolado de laminas
- Unión de material.- Soldadura mediante proceso Tig y unión con pernos.
- Limpieza de material.- limpieza mecánica mediante discos de desbaste-polifán y limpieza química mediante ácido para acero inoxidable.

5.1.1. Tabla de materiales

La tabla de materiales se la realiza en base al plano general, la misma que se indica a continuación.

Tabla 15: Materiales utilizados en el deshidratador al vacío

Parte	Material	Cantidad	Dimensiones en bruto
Aislante	Lana de vidrio espesor 2"	1	2073x410 mm
Angulo	Tool AISI A304 1mm	16	355x26 mm
Anillo1	Tool AISI A304 2mm	2	450x450 mm
Anillo2	Tool AISI A304 2mm	1	1288x32 mm
Anillo3	Tool AISI A304 2mm	1	520x520 mm
Anillo4	Tool AISI A304 0.7mm	1	547x475 mm
Cabezas	Tool AISI A304 2mm	2	520x520 mm
Caucho		1	
Cilindro exterior	Tool AISI A304 0.7mm	1	1780x475 mm
Cilindro interior	Tool AISI A304 2mm	1	1414x410 mm
Cilindro tuerca	Tubo redondo AISI A304 \varnothing 5/8 plg x 0.5 mm	3	40 mm
Eje	Eje AISI A304 \varnothing 1/4 plg	3	15 mm
Malla bandejas	Malla de acero inox N8	8	248x348 mm
Marco1 bandejas	Tool AISI A304 1mm	8	1200x20 mm
Marco2 bandejas	Tool AISI A304 1mm	8	1192x20 mm
Pata	Tool AISI A304 1mm	4	390x100 mm
Perno cilindro	Tubo redondo AISI A304 \varnothing 5/8 plg x 0.5 mm	3	23 mm
Perno rosca	Perno hexagonal 1/2 plg	3	1-3/8 plg
Placa1	Tool AISI A304 1mm	3	20x20 mm
Placa2	Placa AISI A304 6 mm	3	40x35 mm
Placa3	Eje AISI A304 \varnothing 40 mm	1	10 mm
Placa4	Tool AISI A304 1mm	1	40x40 mm
Placa tuerca	Tool AISI A304 1mm	3	20x37 mm
Soporte bandejas	Tool AISI A304 1mm	8	346x22 mm
Soporte vertical	Tool AISI A304 1mm	4	352x31 mm
Tapa trasera	Tool AISI A304 0.7mm	1	547x475 mm
Tubo manos	Tubo redondo AISI A304 \varnothing 1/2 plg x 0.5 mm	1	400 mm
Tubería	Tubería de cobre \varnothing 5/16 plg x 0.5 mm	1	1530 mm
Tuerca	SAE Tuerca hexagonal acero UNC \varnothing 1/2	3	

Tabla 16: Accesorios del deshidratador al vacío

Parte	Descripción	Cantidad
Accesorio1	Adaptador I0X0404	1
Accesorio2	Adaptador 1008-4-4	1
Accesorio3	Acople tubería 1"	1
Accesorio4	Bushing 1030-4-2	1
Accesorio5	Neplo 30540-4-6	1
Accesorio6	Neplo 30540-8-6	1
Codo	Acoples 3409x4	1
Manómetro	Dial manom. Baja R12/22/502 RG-250	1
Bomba	½ HP, 5.5 CFM MARS DVR 1V21 Dual voltaje 110/220 v	1
ON-OFF	Switch on-off	1
Termostato	115/230 Vac (50/60 Hz) TIC-17RGTi	1
Temporizador	100-240VAC (50/60 HZ) AT8N	1
Resistencia	110 v	1
Termocupla J		1

5.2. Ensamble

Una vez que todas las partes del equipo están fabricadas se procede al ensamble tomando como guía el plano de conjunto. El ensamble involucra una serie de procedimientos los cuales se detallan a continuación.

- Soldadura de una de las cabezas al cilindro interior.



Figura 17: Soldadura de tapa toriesférica

- Ubicación de las resistencias y la termocupla.
- Ubicación de las patas para que el cilindro tenga donde apoyarse, como se observa en la siguiente figura.



Figura 18: Ubicación de resistencias, sensor y patas

- Se une el caucho al cilindro con un silicón para altas temperaturas.



Figura 19: Ubicación del caucho

- Soldadura de soportes y ángulos para las bandejas.
- Soldadura de anillos y placas a la tapa.



Figura 20: Pulido de tapa

- Pruebas de conexiones eléctricas de termocupla, termostato, temporizador y switch.



Figura 21: Pruebas de conexiones eléctricas

- Ensamble de cilindro externo y anillos.



Figura 22: Ensamble de carcasa externa

- Prueba final de conexiones eléctricas, verificando que todos los accesorios eléctricos funcionen con los parámetros antes establecidos.



Figura 23: Pruebas eléctricas finales

5.3. Prueba de fugas

Una vez fabricado y ensamblado el cilindro interno, los soportes, resistencias y la tapa, se procede a realizar la prueba de fugas con la bomba de vacío y un compresor para verificar que se puede generar vacío en el interior del cilindro.

Se procede a conectar la bomba de vacío al cilindro y comprobar que la presión descienda, como se indica en la siguiente figura.



Figura 24: Conexión de la bomba de vacío al cilindro interior

Debido a que la presión no descendió, se procede a conectar el compresor al cilindro interior. A medida que se inyecta aire se coloca agua jabonosa en todas las uniones y posibles aberturas, tales como conexión de la bomba, soldaduras, unión de tapa con cilindro, aberturas de las resistencias y termocupla y conexión del manómetro. Estas pruebas se observan en las siguientes figuras.



Figura 25: Conexión del compresor al cilindro interior



Figura 26: Agua jabonosa en conexiones



Figura 27: Agua jabonosa en tapa

Mediante este procedimiento se detectó que la tapa y la conexión con la bomba tienen fugas. Se procede a colocar silicón para altas temperaturas en la fuga identificada, y teflón en los accesorios que conectan a la bomba. Con estos cambios se realiza nuevamente las pruebas de fugas con el compresor y agua jabonosa.

Una vez que se verifica que no existen fugas, se procede a conectar la bomba de vacío al cilindro interior. Se prende la bomba e inmediatamente la presión desciende y se mantiene estable durante 3 horas.



Figura 28: Presión descendiendo

CAPITULO 6

PRUEBAS DE CAMPO

6.1. Prueba de funcionamiento

6.1.1. Procedimiento

Para las pruebas de funcionamiento en el deshidratador al vacío se toma en cuenta las frutas con las cuales se realizaron los cálculos.

Se procede en primer lugar a prender el horno y se coloca 10 horas en el temporizador. Esperamos hasta que la temperatura alcance los 60 °C y se estabilice, hasta mientras se puede procesar las frutas de tal manera que tengan un espesor aproximado de 4 cm, luego se las coloca en las bandejas. Una vez que la temperatura es la correcta se coloca las bandejas en el deshidratador, cerramos la tapa y prendemos la bomba de vacío, visualizamos en el manómetro el descenso de la presión, cuando esta llegue a 15 psi apagamos la bomba y dejamos que las frutas se deshidraten.

A medida que el proceso avanza, el agua de las frutas comienza a evaporarse lo que provoca que se genere vapor de agua ocasionando que la presión en el interior del recipiente aumente hasta llegar nuevamente a presión atmosférica; esto ocurre en un lapso aproximado de 45 a 60 min.

El calor no es distribuido uniformemente hacia todas las frutas, por tal motivo, una vez que la presión llegue a presión atmosférica se debe abrir el horno y cambiar de posición las bandejas. Cerramos la tapa y nuevamente prendemos la bomba de vacío. Este procedimiento se debe realizar unas 3 veces para que todas las frutas se deshidraten por igual.

Para las pruebas de secado en el deshidratador se procede a sacar las frutas cada hora para pesar en una balanza y visualizar su textura y color.

6.1.2. Registro de datos

Con el procedimiento descrito anteriormente se procede a registrar datos durante cada hora, para ello se utiliza el siguiente formato.

Cuadro 6: Formato de pruebas de funcionamiento

	HOJA DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO			Revisión No: 1	
	DESHIDRATADOR AL VACÍO			Código: IMEC-DV-01	
	Elaborado por: Karen Nieto			Fecha:	
	Aprobado por:			02/01/2015	
FRUTA	PESO (gramos)	TEXTURA	COLOR	TIEMPO (hora)	

Para los parámetros tales como la textura y color no se tiene instrumentos para la medición de los valores, por tal motivo se procede a valorar cada parámetro con valores del 1 al 10. Siendo el valor más bajo el menos favorable y el número más alto el más favorable, se toma en cuenta el siguiente cuadro.

Cuadro 7: Valoración de los parámetros

Valor	Textura y tamaño	Color
1-2	Cambio extremo	Cambio extremo
3-5	Cambios pequeños	Cambios pequeños
8-6	Cambio moderado	Cambio moderado
9-10	Sin cambios	Sin cambios

6.2. Obtención de resultados

Las frutas que se utilizan en las pruebas para el registro de datos son las siguientes: piña, naranja, frutilla, pera, manzana, uvilla, kiwi y mora. Los datos obtenidos en las pruebas se indican en la siguiente tabla.

Tabla 17: Obtención de resultados

	Piña	Naranja	Frutilla	Pera	Manzana	Uvilla	Mora
Peso (gramo)	200	200	200	200	200	200	200
Color	10	10	10	10	10	10	10
Textura	10	10	10	10	10	10	10
1 HORAS							
Peso (gramo)	168	162	170	134	164	178	176
Color	10	10	9	10	8	10	10
Textura	10	10	9	9	9	10	10
2 HORAS							
Peso (gramo)	140	132	136	85	138	154	154
Color	8	10	9	8	7	10	10
Textura	8	9	9	8	8	10	10
3 HORAS							
Peso (gramo)	120	104	96	45	110	134	138
Color	8	10	8	7	6	9	10
Textura	8	9	8	7	7	9	9
4 HORAS							
Peso (gramo)	98	80	78	40	76	118	124
Color	8	9	8	7	4	8	10
Textura	8	9	8	6	5	8	8
5 HORAS							
Peso (gramo)	86	58	50	36	60	96	106
Color	8	9	8	6	4	8	9
Textura	8	8	7	5	4	8	8
6 HORAS							
Peso (gramo)	74	44	34	30	36	80	90
Color	7	9	7	4	3	7	9
Textura	7	8	5	4	4	7	7
7 HORAS							
Peso (gramo)	64	36				66	84
Color	7	9				7	9
Textura	7	7				7	7
8 HORAS							
Peso (gramo)	52	32				50	72
Color	6	8				6	8
Textura	6	7				6	6
9 HORAS							
Peso (gramo)	44	32				44	64
Color	5	7				4	8
Textura	5	7				6	5
10 HORAS							
Peso (gramo)	38	32				40	58
Color	4	6				4	8
Textura	4	5				5	5

6.3. Análisis de resultados

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular la humedad de cada fruta como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 18: Porcentaje de humedad en las frutas

Tiempo (hora)	% humedad						
	Piña	Naranja	Frutilla	Pera	Manzana	Uvilla	Mora
0	84,9	85,9	92,0	86,8	85,6	81,3	84,8
1	65,9	62,4	74,4	37,5	63,6	68,9	71,2
2	64,9	63,2	67,0	29,2	66,8	65,7	70,5
3	68,2	59,0	50,3	78,5	60,1	66,3	73,2
4	62,5	55,9	68,9	74,3	40,9	67,7	73,5
5	70,9	48,0	36,0	75,7	58,9	58,3	67,8
6	68,7	54,1	44,9	66,8	18,9	61,3	67,0
7	69,3	63,7				60,0	77,7
8	61,8	73,4				49,3	68,1
9	66,7	85,9				67,6	72,3
10	69,1	85,9				71,3	74,5

Con el porcentaje de humedad obtenido en la anterior tabla se realizan las siguientes gráficas.

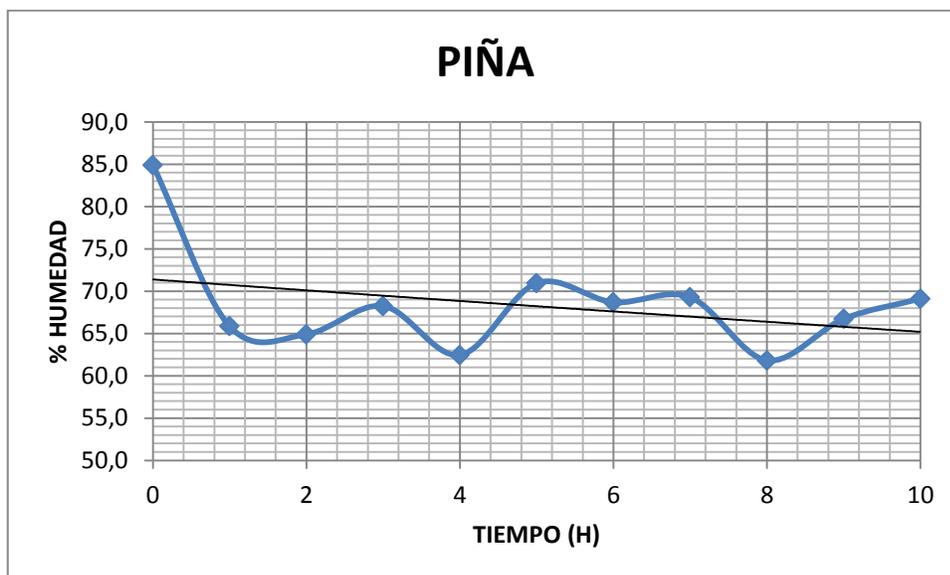


Figura 29: Gráfica humedad vs tiempo de la piña

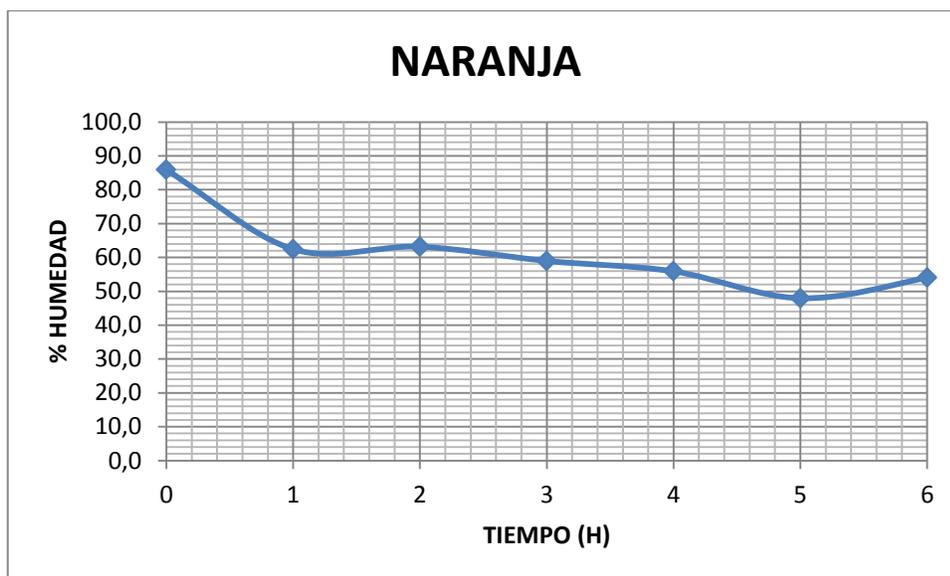


Figura 30: Gráfica humedad vs tiempo de la naranja

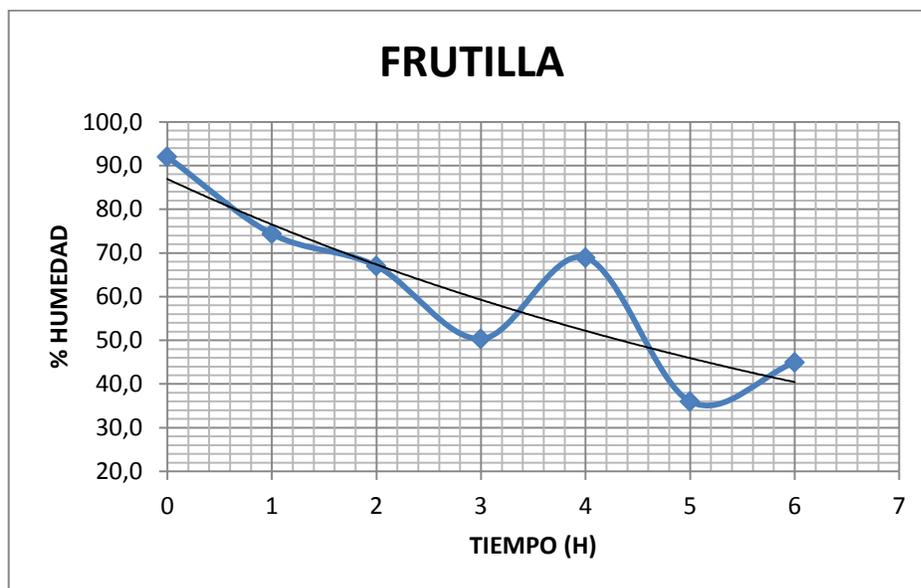


Figura 31: Gráfica humedad vs tiempo de la frutilla

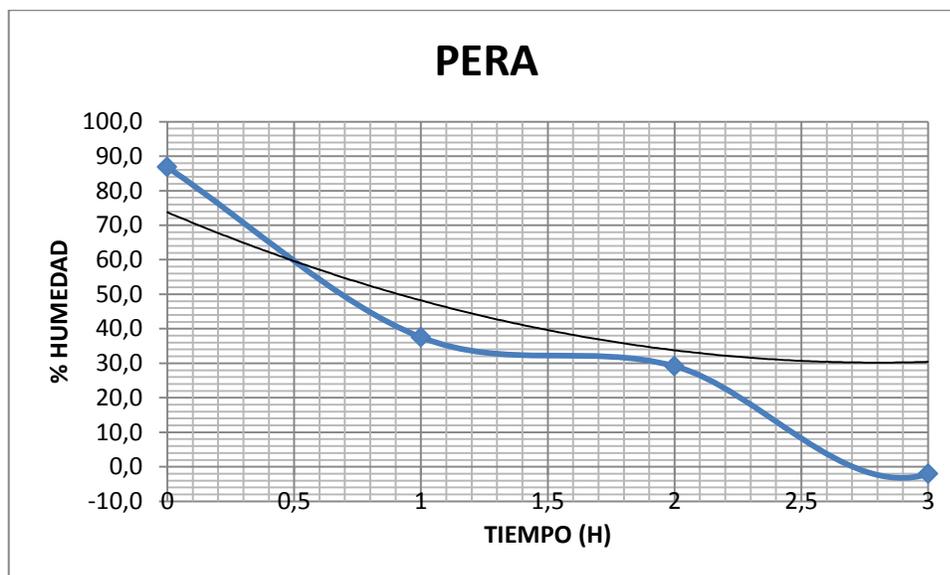


Figura 32: Gráfica humedad vs tiempo de la pera

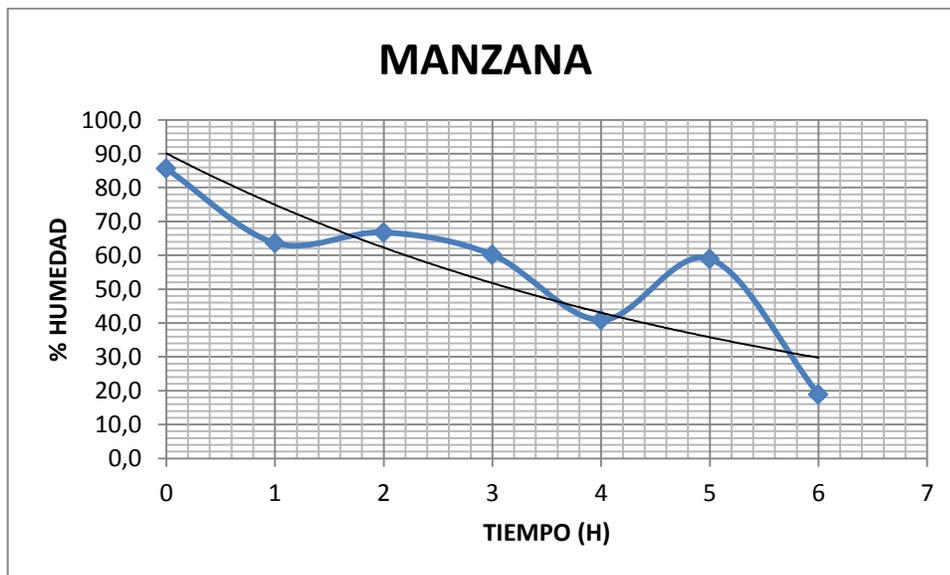


Figura 33: Gráfica humedad vs tiempo de la manzana

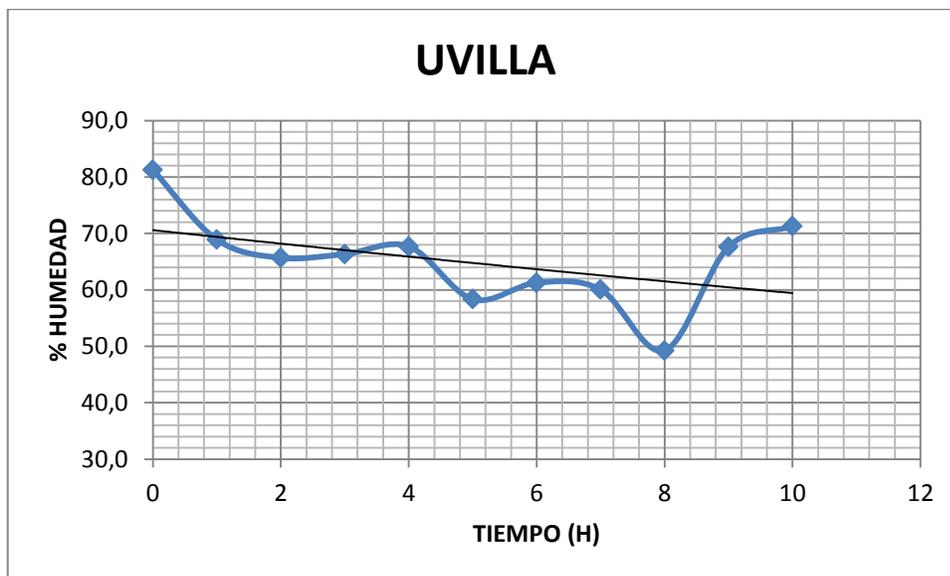


Figura 34: Gráfica humedad vs tiempo de la uvilla

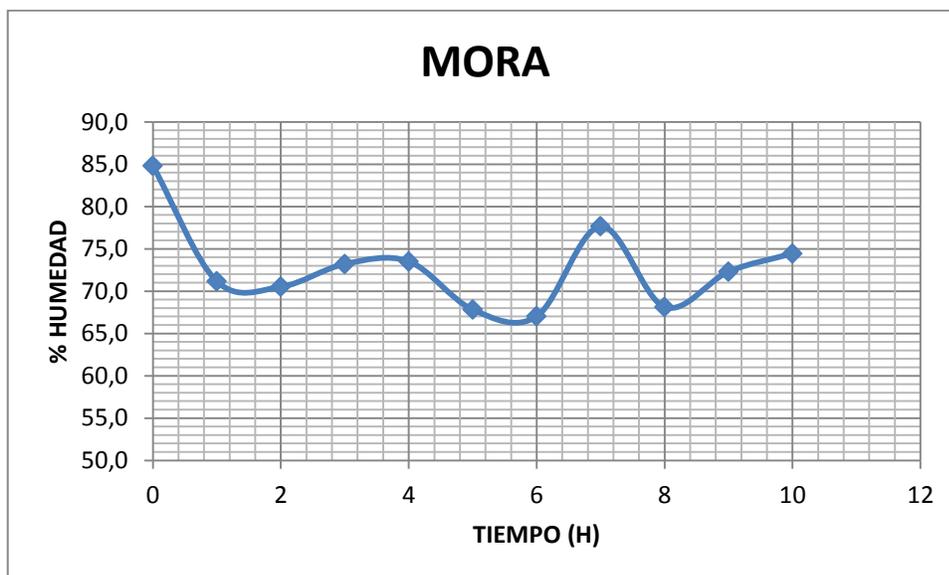


Figura 35: Gráfica humedad vs tiempo de la mora

Las gráficas anteriores presentan una tendencia similar en sus curvas lo que indica que todas las frutas tienen un descenso de la humedad y un menor porcentaje de agua a medida que transcurre el tiempo; sin embargo se puede identificar que no todas se secan igual, unas lo hacen más rápido y otras se tardan más tiempo.

La fruta que se seca en menor tiempo es la pera y las que se demoran más son piña, uvilla y mora.

Todas las frutas al estar expuestas a calor cambian en cierta medida sus características físicas, por tal motivo hay reducción de su tamaño inicial, cambios en su textura y degradaciones en su color. Igual que en el tiempo de secado no todas las frutas reaccionan igual y por lo tanto unas van a sufrir más cambios que otras. La manzana es la fruta que presenta un mayor cambio en su color sin embargo su tamaño no disminuye en gran medida. La piña presenta cierta variación en su color pero es la fruta con mayor reducción de área. La mora es la fruta que no varía significativamente en su color y textura; una cosa similar sucede con la uvilla. La pera es una de las frutas que se oxida

rápida al estar expuesta al ambiente por ello al inicio su color cambia, sin embargo en el transcurso de todo el proceso tanto el color como la textura se mantienen igual.

Los diferentes cambios en las frutas se pueden visualizar en las siguientes figuras.



Figura 36: Piña a las 2 horas de secado

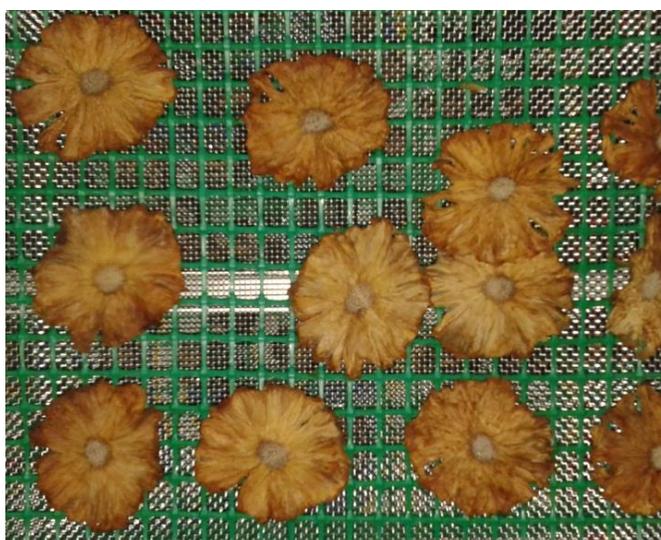


Figura 37: Piña a las 10 horas de secado

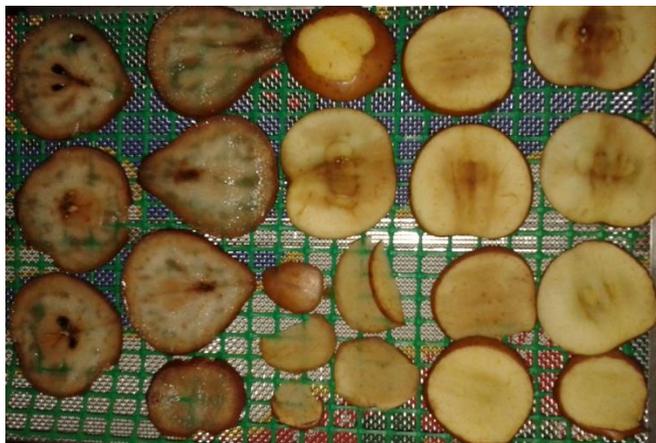


Figura 38: Pera y manzana a las 2 horas de secado

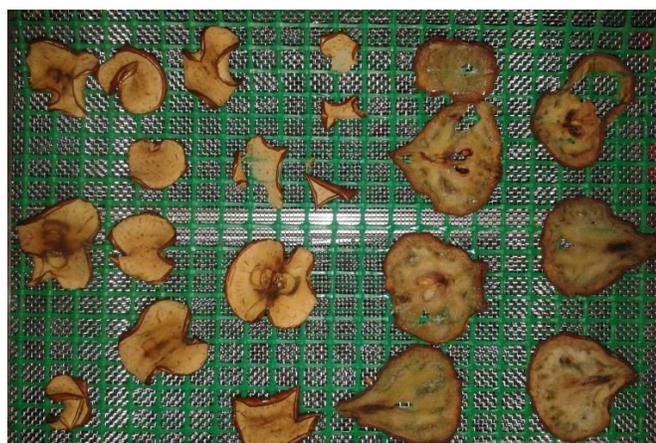


Figura 39: Pera y manzana a las 6 horas de secado



Figura 40: Naranja a las 2 horas de secado

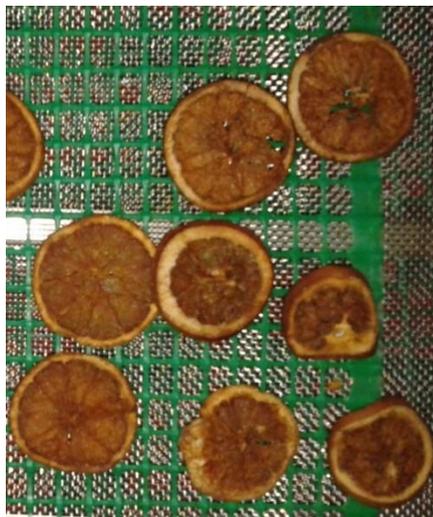


Figura 41: Naranja a las 10 horas de secado



Figura 42: Uvilla a las 2 horas de secado



Figura 43: Uvilla a las 10 horas de secado



Figura 44: Mora a las 2 horas de secado



Figura 45: Mora a las 10 horas de secado

De los análisis antes expuestos podemos concluir que el tiempo de secado es inversamente proporcional al porcentaje de humedad final y directamente proporcional a los cambios de textura, color y tamaño.

CAPITULO 7

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La elaboración de los manuales de operación y mantenimiento es una de las partes fundamentales dentro de la ejecución de un proyecto, este manual permite conocer y estandarizar las acciones requeridas para operar correctamente un equipo, permitiendo alargar la vida útil del mismo.

El formato asignado para el manual de operación es el siguiente:

Cuadro 8: Formato de Manual de Operaciones

 <p style="font-size: small;">DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA</p>	MANUAL DE OPERACIONES		Revisión No.: X
	NOMBRE DE LA MÁQUINA		Código: IMEC-DV-0X
	Elaborado por:		Fecha: XX/XX/XXX
	Aprobado por:		
<p>PROCEDIMIENTO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ACCIÓN #1 (ENCENDIDO) 2. ACCIÓN #2(MANIPULACIÓN) <li style="text-align: center;">... 3. ACCIÓN # n (APAGADO) 			

El código del equipo viene dado por las siguientes siglas:

IMEC-DV-M0X

Donde:

IMEC: Ingeniería Mecánica

DV: Deshidratador al vacío

M0X: Tipo de manual, para ello tenemos el siguiente orden:

- M01: Manual de operación
- M02: Manual de mantenimiento

Para la elaboración del manual de mantenimiento se optó por un formato similar, a diferencia que se detallan las acciones de mantenimiento y los suministros y repuestos requeridos.

Cuadro 9: Formato de Manual de Mantenimiento

	MANUAL DE MANTENIMIENTO		Revisión No.: X					
	NOMBRE DE LA MÁQUINA		Código: IMEC-DV-M02					
	Elaborado por:		Fecha: XX/XX/XXX					
	Aprobado por:							
<p>1. NOMRE DE LA ACCIÓN DE MANTENIMIENTO</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center;">SUMINISTROS O REPUESTOS:</td> <td>SUMINISTRO 1</td> </tr> <tr> <td>SUMINISTRO 2</td> </tr> <tr> <td>SUMINISTRO 3</td> </tr> <tr> <td>SUMINISTROn</td> </tr> </table> <p>2. PRECAUCIONES</p> <p>3. PROCEDIMIENTO</p>				SUMINISTROS O REPUESTOS:	SUMINISTRO 1	SUMINISTRO 2	SUMINISTRO 3	SUMINISTROn
SUMINISTROS O REPUESTOS:	SUMINISTRO 1							
	SUMINISTRO 2							
	SUMINISTRO 3							
	SUMINISTROn							

Los manuales de operación y mantenimiento se encuentran en los anexos F y G respectivamente.

7.1. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del equipo están dadas por los datos obtenidos en el capítulo 4 “Diseño” y capítulo 5 “Construcción y ensamble”, las mismas que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 19: Especificaciones técnicas del deshidratador al vacío

Datos técnicos	
Peso	40 kg
Dimensiones	573 x 805 x 915 mm
Alimentación	110/220 Vac (50/60 Hz)
Temperatura de operación	0 hasta 60 °C
Presión de operación	3 psi
Tiempo de funcionamiento	1 hasta 10 horas
Capacidad producto seco	1 kg
Capacidad producto húmedo	13 kg
Potencia de bomba	½ Hp

7.2. Programa de mantenimiento

Cuadro 10: Programa de mantenimiento

No.	ACCIÓN DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA
1.	Limpieza general	SEMANTAL
2.	Ajuste de accesorios	MENSUAL
3.	Lubricación	DIARIO
4.	Cambio de aceite	SEMANTAL

CAPITULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Cualquier proyecto tiene diferentes etapas para su desarrollo, cada una determina cada aspecto a tomar en cuenta durante la ejecución del mismo, entre las etapas tenemos: estudio de mercado, estudio técnico, estudio organizacional y estudio financiero las cuales permiten identificar si el proyecto es o no rentable.

El deshidratador al vacío es un equipo relativamente nuevo en el área alimenticia, por tal motivo se procede a evaluar el análisis económico y financiero de los productos procesados, es decir de las frutas deshidratadas, debido a que si se cuenta con información del mercado de este producto. Este estudio permitirá determinar si el presente proyecto es factible al poder fabricar frutas deshidratadas con el equipo.

Antes de realizar el respectivo análisis de la factibilidad de procesar frutas deshidratadas y que estas sean rentables se procede a determinar el costo de inversión, el cual está dado por el costo de realizar el deshidratador al vacío.

8.1. Análisis económico

El costo del deshidratador al vacío viene dado por el costo directos los cuales incluyen la materia prima y la mano de obra requerida para la fabricación del mismo, y los costos indirectos.

8.1.1. Costos directos

Los costos directos de la fabricación del deshidratador al vacío incluyen: la materia prima y los accesorios utilizados tanto en el sistema de control de

temperatura y de presión; los mismos que se detallan en el anexo H, apéndice 1, 2 y 3.

En la siguiente tabla se resume los costos directos.

Tabla 20: Costos directos

Orden	Descripción	Valor total [USD]
1	Materia prima	163,52
2	Ítems	11,27
3	Equipos y accesorios	496,98
SUBTOTAL		671,77
IVA 12%		80,61
TOTAL		752,38

8.1.2. Costos indirectos

Entre los costos indirectos del proyecto se encuentran: costo de consumibles, energía y maquinados externos, los cuales se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 21: Costo de consumibles

Orden	Descripción	Proveedor	Unidad	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Electrodo GTAW EWTh-2 (rojo) 7 x ø3/32 [in]	Gasequip	U	5	1,95	9,75
2	Polifan acero/inox Gr.60 4-1/2 x 7/8 [in]	Gasequip	U	10	3,27	32,70
3	Gas Argón	Servigases	m ³	8	22,32	178,56
4	Magnum Pro-Torch Collets (porta electrodo) ø3/32 [mm]	Gasequip	U	2	0,9	1,8
5	Magnum Pro-Torch Collet body (difusor de gas) ø3/32 [mm]	Gasequip	U	2	1,8	3,6
6	Magnum Pro-Torch nozzles alumina (cerámica) N°6	Proinsolquip	U	2	1,16	2,32
7	Magnum Pro-Torch nozzles alumina gas (cerámica para laminador de flujo) ø3/32 [mm]	Proinsolquip	U	2	2,10	4,20
8	Varilla GTAW E308L 1.6 mm	Proinsolquip	Kg	2	16,63	33,26
9	Cepillo alambre para ac. inox. 5 filas	Proinsolquip	U	5	5,00	25,00
10	Fibra Fandeli ultrafino gris	ACAZA	U	4	0,89	3,57
11	DCorte acero/inox plano 14 x 7/8 x 1/8 [in]	Gasequip	U	2	7,25	14,50
	Plasma Proff55 Electrodo	Proinsolquip	U	2	4,02	8,04
13	Plasma Proff55 Tobera 1.2 mm	Elimed	U	2	3,98	7,96
14	Gel decapante H500	HGB	L	1	6,76	6,76
15	Torno Inserto MGMN300-M NC3030 (tronzar)	Uvidia Carlos	U	1	1,33	1,33
16	Broca Titanio (amarilla) 6mm	Castillo Hermanos	U	2	0,89	3
17	Torno Inserto TNMG-160408 (triangular)	Uvidia Carlos	U	1	0,83	0,83
					SUBTOTAL	\$ 337,18
					IVA 12%	\$ 40,46
					TOTAL	\$ 377,64

Tabla 22: Costo de maquinados externos

Orden	Descripción	Proveedor	Unidad	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Conformado de cabezas Toriesféricas	Proyectos mecánicos	U	2	225	450
2	Cuacho	Catein	U	1	35	35
					SUBTOTAL	485
					IVA 12%	58,20
					TOTAL	543,20

Tabla 23: Energía utilizada por equipos y herramientas

Orden	Maquina	Potencia KW	Horas Consumo	Valor unitario [cUSD/KWh]	Valor total [USD]
1	Plasma	22	8	0,0731	12,86
2	Soldadora	22	10	0,0731	16,08
3	Torno	2,4	1	0,0731	0,18
4	Tronzadora	2,2	1	0,0731	0,16
5	Amoladora	2,2	5	0,0731	0,80
6	Taladro	0,75	1	0,0731	0,05
TOTAL					30,13

8.1.3. Costo de mano de obra directa

Para el cálculo del costo de la mano de obra se debe sacar el valor de la hora hombre, de la siguiente forma:

Tabla 24: Costo de mano de obra directa

Orden	Descripción	Cantidad	Unidad	Horas	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Soldador	1	Horas/hombre	80	3,31	264,80
2	Ayudante	1	Horas/hombre	80	2,38	190,40
Valor total MOD (USD)						455,20

8.1.4. Costo de la mano de obra indirecta

Tabla 25: Costo de mano de obra indirecta

Orden	Descripción	Cantidad	Unidad	Horas	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Jefe de planta	1	Horas/hombre	20	6,45	129
Valor total MOI (USD)						129

8.1.5. Costo total de proyecto

Tabla 26: Costo total del proyecto

COSTOS DIRECTOS		
Orden	Descripción	Valor total [USD]
1	Materia prima	183,14
2	Ítems	12,62
3	Equipos y accesorios	556,62
4	Mano de Obra D.	455,20
SUBTOTAL		1207,58
COSTOS INDIRECTOS		
1	Consumibles	377,64
2	Maquinado	543,20
3	Costo eléctrico	30,13
4	Mano de Obra I.	129
SUBTOTAL		1079,97
TOTAL		2287,55

8.2. Análisis financiero

Para proceder con el análisis financiero es necesario tomar en cuenta el capital, el mismo que viene dado por el análisis económico antes descrito. Sin embargo hay que tomar en cuenta la capacidad máxima, para determinar la cantidad de productos que se pueden elaborar.

- CAPACIDAD MÁXIMA

Primero se determina que el producto contiene 150 gramos de piña, el cual es igual que la competencia

Luego se determina la cantidad de peso húmedo y número de bandejas necesario para los 150 g del producto, tomando como referencia la cantidad de fruta que se utilizó en las pruebas del capítulo 6.

$$Peso_{húmedo} = \frac{Peso_{seco} * 200}{38}$$

$$Peso_{húmedo} = \frac{150 * 200}{38} = 789,47 \text{ g}$$

$$\# \text{ bandejas} = \frac{Peso_{seco} * 1}{38}$$

$$\# \text{ bandejas} = \frac{150 * 0,7}{38} = 2,76 \text{ bandejas}$$

Para secar 150 g del producto es necesario 3 bandejas. Debido a que el horno tiene 8 bandejas es posible secar 400 g de producto. Si el horno funciona dos veces al día durante 20 días es posible secar 16000 g, decir 106 productos al mes.

8.2.1. Costo de operación

El costo de operación involucra el costo del producto y de la energía eléctrica que consume el equipo, para ello se toma en cuenta precios de productos deshidratados en el mercado, como se muestra en la siguiente tabla. Para el costo referencial del producto se disminuye en \$0,16 al costo de la competencia.

Tabla 27: Precio de productos deshidratados en el mercado

MARCA	P.V.P.	PESO(gr)
Natures Heart	3,56	150
Mi producto	3,40	150

Luego se procede a determinar el costo unitario de la piña en masa húmeda, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 28: Costo unitario de materia prima

Fruta	Unidad	Cantidad	Costo	Costo unitario
Piña	Gr	200	\$ 0,25	\$ 0,00125

Finalmente se calcula el costo de la materia prima y mano de obra para 150gr de producto.

$$\text{Costo materia prima} = \text{Peso}_{\text{húmedo}} * \text{Costo unitario}$$

$$\text{Costo materia prima} = 789,47 * 0,00125$$

$$\text{Costo materia prima} = \$0,99$$

$$\text{Costo mano obra} = \text{Tiempo} * \text{Costo HH}$$

$$\text{Costo mano obra} = 0,25 * 2,21$$

$$\text{Costo mano obra} = \$0,55$$

El costo de la energía que consume el equipo está dado por el tiempo de funcionamiento, es decir el equipo funciona 10 horas, 2 veces al día durante 20 días, por lo tanto se tiene un total de 240 horas de funcionamiento al mes.

$$\text{Cenergia} = \text{Horas} * \$kwh$$

$$\text{Cenergia} = 400 * 0,09 = \$36$$

8.2.2. Determinación del valor actual neto (VAN)

Antes de determinar el VAN y el TIR, es necesario determinar el flujo de caja anual, el cual refleja el valor de la inversión inicial, los egresos e ingresos proyectados cada mes según la cantidad de productos procesados y vendidos. Como podemos ver en el anexo H, apéndice 4: el costo referencial del producto es de \$3,40 y la cantidad vendida es de 106 unidades al mes.

Mientras que para los egresos se toma en cuenta los siguientes aspectos: materia prima, mano de obra, materiales y herramientas, depreciación del equipo, gastos administrativos, transporte, entre otros.

- Depreciación de la maquinaria

Es la pérdida de valor de un activo físico, a medida que transcurre el tiempo, debido al deterioro físico, obsolescencia. La depreciación no es un costo, pero afecta al flujo de caja por la disminución de generación de flujos futuros. (Slier Muñoz & Carter Pereria, 1999). La depreciación viene dado por la fórmula:

$$Dp = \frac{P - F}{N}$$

Donde, P es el valor inicial, F es el valor final y N es el periodo en años. Para el presente proyecto la depreciación del equipo viene dado por:

$$Dp = \frac{2287,55 - 300}{10}$$

$$Dp = 198,755$$

A continuación procedemos a realizar una proyección de las ventas generadas durante los próximos 5 años para poder calcular el Flujo Neto, BNA (Beneficio Neto Actualizado), BNA Acumulado de la siguiente manera:

$$BNA = \frac{F_{neto}}{(1 + TMAR)^{Año}}$$

Donde:

$$F_{Neto} = Ingresos - Egresos$$

$$TMAR = 15\% \text{ (Tasa mínima aceptable de rendimiento)}$$

Además podemos determinar que en el segundo año recuperamos nuestra inversión porque las ganancias (\$2387,48) son mayores a la inversión inicial (\$2287,55).

Tabla 29: Flujo de caja proyectado

AÑO	INGRESOS	EGRESOS	Flujo Neto	BNA	FFAcumulado
0	0	2287,55	-2287,55	-2287,55	
1	4325	2889,60	1435,20	1248,00	1248,00
2	4541,04	3034,08	1506,96	1139,48	2387,48
3	4541,04	3034,08	1506,96	990,85	3378,33
4	4541,04	3034,08	1506,96	861,61	4239,94
5	4757,28	3178,56	1578,72	784,90	5024,84

Para calcular el VAN (Valor actual neto), aplicamos la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{\text{Año } 1}^{\text{Año } 5} BNA - Inversión\ inicial$$

$$VAN = 5024,84 - 2287,55 = 2737,29$$

Este valor indica que es un proyecto rentable, porque es mayor a 1.

8.2.3. Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR es la tasa interna de retorno de un proyecto de inversión que permite que el BNA sea igual a la inversión (VAN igual a 0). La TIR es la máxima TMAR que puede tener un proyecto para que sea rentable, pues una mayor tasa ocasionaría que el BNA sea menor que la inversión (VAN menor que 0). Para su cálculo, tenemos que despejar la TIR de la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{\text{Año } 1}^{\text{Año } 5} \frac{F_{\text{neto}}}{(1 + TIR)^{\text{Año}}} - Inversión\ inicial$$

$$TIR = 58\%$$

Este índice también nos indica que el proyecto es rentable, porque es mayor a la TMAR que asignamos para nuestro proyecto (15%).

8.3. Relación beneficio costo (R B/C)

La relación beneficio/costo, como su nombre lo indica, nos muestra la cantidad de dólares que obtengo de ganancia o beneficio por cada dólar invertido en el proyecto, para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$RB/C = \frac{FFAcumulado_{Año5}}{Inversión\ inicial}$$

$$RB/C = \frac{5024,84}{2287,55}$$

$$\frac{RB}{C} = 2,20$$

Tabla 30: Resumen de viabilidad del proyecto

VIABILIDAD DEL PROYECTO		
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD		
INDICE	Resultado	Análisis
VAN	2737,29	Rentable
TIR	58%	Rentable
R B/C	2,20	Rentable
REPAGO	2	Rentable

CAPITULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

- El deshidratador al vacío se diseñó según los principios establecidos de transferencia de calor por conducción y también bajo la norma ASME, Sección VIII, División 1, “Diseño de recipientes a presión”, la cual indica los procedimientos a seguir para recipientes sometidos a presión externa e interna.
- El deshidratador al vacío funciona a una presión de 3 psi permitiendo que el agua de las frutas se evapore a 60 °C, como resultado se obtuvo una humedad final aproximada de 13% permitiendo que el producto seco dure por mucho más tiempo.
- La deshidratación al vacío permitió una reducción del tiempo de secado de las frutas en aproximadamente 5 horas en comparación con hornos por convección, permitiendo un ahorro de energía y también logrando aumento de la productividad en el proceso de deshidratación.
- La tasa de secado promedio para las diferentes frutas es de 32 gr/h, es decir que en cada hora se elimina aproximadamente 32 gr de agua.
- El deshidratador de frutas fue fabricado con acero inoxidable AISI 304 y fue diseñado de forma cilíndrica con tapas toriesféricas permitiendo que los microorganismos y bacterias no se acumulen en aristas.
- La capacidad promedio del deshidratador al vacío es de 8 kg de masa húmeda de fruta para obtener 1 kg de producto seco, sin embargo la capacidad máxima es de 13 kg para la uvilla, logrando obtener 2,6 kg de producto seco. Esto se debe a que la uvilla es una fruta pequeña que no ocupa tanto espacio en comparación con las demás.

- El proyecto es rentable, debido a que el TIR (58%) es mayor a la TMAR (15%); además su relación beneficio/costo (R B/C) es de 2,20; lo que indica que por cada dólar invertido se obtiene \$1,20 de ganancia.

9.2. Recomendaciones

- A pesar que el equipo es de forma cilíndrica es recomendable realizar una limpieza después de ser utilizado y de ser posible utilizar vapor de agua a altas presiones para evitar acumulación de bacterias que puedan afectar a largo plazo a la calidad del producto final.
- Utilizar guantes de seguridad para retirar las bandejas y evitar posibles quemaduras.
- Verificar el nivel de aceite de la bomba antes de cualquier proceso de deshidratación.
- Siempre cumplir con las acciones del manual de operaciones y mantenimiento para evitar fallos inoportunos en la máquina y a su vez alargar la vida útil de la misma.
- Es recomendable que el espesor de la fruta sea uniforme en cada rodaja para evitar que el secado no sea uniforme.
- Colocar un solo tipo de fruta en el deshidratador para evitar cambios en el color y mayor tiempo de secado.
- No variar los parámetros establecidos de secado, tanto de presión como de temperatura.
- Fomentar el conocimiento del proceso de deshidratación en el área alimenticia, ya que es un recurso sustentable y sobretodo saludable para la población ecuatoriana.
- Al finalizar la presente investigación se puede indicar que la tecnología de secado al vacío es adecuada para secar frutas sin la afectación de sus propiedades organolépticas por lo que se sugiere realizar estudios donde se

utilice frutas exóticas tales como el taxo, pitahaya, pepino, achotillo, tuna, entre otros.

- Por otra parte, en el aspecto tecnológico se pueden hacer ensayos de secado al vacío reduciendo la presión interna del recipiente a fin de aumentar la tasa de secado.

BIBLIOGRAFÍA

Taylor & Francis Group (2006). Handbook of industrial drying.

Velez R., J., & Torres D., M. (1994). Evaluación de propiedades físicas de frutas: melón, papaya, plátano y sandía. En CIT, *Información Tecnológica* (págs. 39-42). La Serena: Sociedad editorial del norte.

Almache, L., Gallegos, P., Guasumba, J., & Espinosa. (2006). *Diseño y construcción de un prototipo para secado de arroz al vacío con capacidad de cinco kilogramos de arroz con cáscara*. Sangolquí: Espe.

De la Torre, A. G., (1980). *Cálculo, diseño y construcción de un secador batch con vacío y bandejas para el uso en el laboratorio de operaciones unitarias con fines didácticos*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A., Albors Sorolla, A. M., & Barat Baviera, J. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia: Editorial de la UPV.

Guasumba Codena, J. (s.f.). Desarrollo experimental de un sistema de secado rápido con tecnología de vacío, para productos agroindustriales y forestales. Centro de Investigaciones, Tecnológicas, Energéticas y Ambientales Citecna Corp.

Guasumba, J. (s.f.). *Sistemas Térmicos Conceptos Básicos*.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.

Kreith, F., & Bohn, M. S. (2001). *Principios de transferencia de calor*. Ediciones Paraninfo.

Blank, L. T., & Tarquin, A. J. (1999). *Ingeniería Económica*. MC Graw Hill.

- Jon Chua, K., & Kiang Chou, S. (2005). *New hybrid drying technologies*. Singapore: Department of mechanical engineering, National University of Singapore.
- Keey, R. (1978). *Introduction to Industrial Dying operations*. New York : Pergamon Press.
- Mcketta, J. J. (1997). *Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 60 - Uranium Mill*. New York: Marcel Dekker INC.
- Megyesy, E. F. (2001). *Pressure Vessel Handbook*. Tulsa, Oklahoma: Pressure Vessel Handbook publishing, Inc.
- Nonhebel, G., & Moss H., A. A. (2002). *El secado de sólidos en la industria química*. Barcelona: Reverté S.A.
- Orrego Alzate, C. E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Manizales: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- Whitman, W. C., & Johnson, W. M. (s.f.). *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado*. Paraninfo.
- Slier Muñoz, L. F., & Carter Pereria, A. (1999). *Apuntes de clase: Evaluación de Proyectos*. Lota: Centro de Información Técnica.
- Kawamura, S., & Suezawa, Y. (1961). *Mechanism of Gas Flow in a Fluidized Bed at Low Pressure*.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Deng, Y., & Zhao, Y. (2008). Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples. *Food Science and Technology*, 1575-1585.

- Arnaldos, J. B. (1998). *Vacuum Fluidization: Application to Drying*. Nueva York: Fundación de Ingeniería.
- ASME. (1992). ASME BPVC VIII. *Código ASME para calderas y recipientes a presión*.
- JM Industrial Technology S.A. (Julio de 2009). Obtenido de <http://www.jmi.com.mx/resistencias.htm>
- MicroFood. (2012). Obtenido de <http://microfood.eu/es-oferta.html>
- E. Bachiller B, S.A. (2011). *Bachiller Barcelona*. Obtenido de http://www.bachiller.com/productos/equipos_de_proceso/procesado_de_solidos/secadores_al_vacio/paddledry.html
- IDEX Corporation. (2014). *GAST*. Obtenido de http://www.gastmfg.com/vphb/vphb_s4.pdf
- Jiangyin Hongda Powder Equipment Co., Ltd. (2010). *Hondamach*. Obtenido de <http://www.hongdamach.com/html/es/Productos/350.html>
- Savi, A. e. (s.f.). *Codols Technology*. Obtenido de <http://www.codols.com/tecnologias/secadores-al-vacio-italvacuum>
- Taylor & Francis Group, LLC. (2006). *Handbook of industrial drying*.
- Universidad nacional de la Plata. (s.f.). *Termocuplas*. Obtenido de <http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/DI/termocuplas.pdf>