

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

“Diseño mecánico y construcción de un secador de cacao
(*Theobroma cacao L.*) al vacío para medianos y grandes
productores en la provincia de Manabí”

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

César Ricardo Jimbo Yépez
Freddy Alexander Arboleda Muñoz

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su infinito amor.

A mis padres, Fredy y Lourdes, por siempre apoyarme en todo lo que me propuse. A mi hermano Víctor, por estar a mi lado en toda mi época universitaria. A mis amigos de la carrera y del grupo B.S.C, por compartir vivencias dentro y fuera de las aulas de clase. A mi novia Nathaly por estar conmigo y apoyarme siempre.

Freddy Alexander Arboleda Muñoz

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar a esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis padres porque con su ejemplo me enseñaron a mantener siempre la humildad sin importar lo alto que se haya llegado.

Agradezco a mis hermanos por darme siempre esa voz de aliento para seguir adelante con mis ideales y metas.

Agradezco a mi tía Nardela Jimbo Mendoza por haber cuidado de mí como una madre en estos años de estudio alejado de mi familia. Dios la bendiga, y que nos permita ser recíprocos con usted.

César Ricardo Jimbo Yépez

DECLARACIÓN EXPRESA

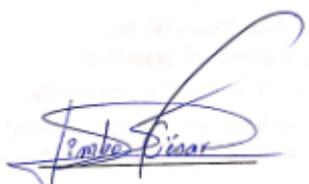
La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

César Ricardo Jimbo Yépez

Freddy Alexander Arboleda Muñoz

Ing. Ernesto Rolando Martínez Lozano

Y el patrimonio intelectual del mismo a la facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) Y Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).



César Jimbo Yépez



Ing. Ernesto Martínez
Lozano



Freddy Arboleda Muñoz

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad realizar un análisis del diseño de un secador de cacao al vacío; que comprendía dos áreas de la Ingeniería Mecánica, tales como: transferencia de calor y diseño mecánico. La finalidad principal del desarrollo del proyecto fue alcanzar las propiedades requeridas por las normativas nacionales e internacionales en el menor tiempo posible, para la comercialización del cacao en el mercado extranjero. El proyecto fue enfocado hacia la optimización de la capacidad de secado por parte de los productores asegurando con ello una mejor competitividad en el mercado por la venta de un producto de calidad. Se contemplaron tres factores muy importantes de diseño; humedad relativa, temperatura de secado, y tiempo de secado. Para el proceso de secado, se consideró que el producto pasaba primero por un proceso de fermentado, con lo cual se logró así reducir la humedad de la almendra a un 30% con un reposo de aproximadamente 5 días. En el proceso de diseño los parámetros estimados fueron los siguientes: la procedencia del grano fue del cantón Junín de la provincia de Manabí; la humedad relativa del aire es de 82% en promedio, y una temperatura promedio de 24,6 °C. Se consideró una producción diaria de 5 toneladas en una jornada de 8 horas de trabajo; se trazó como meta reducir la humedad de la almendra a un 7% en la jornada de trabajo establecida. El proceso de diseño mecánico estuvo comprendido por el dimensionamiento de la cámara de secado al vacío; la presión interna del recipiente, así como el material que lo compone, fueron factores importantes para el diseño del mismo. Se realizó el diseño de las paletas que se mantendrían en contacto continuo con el material a secar. Luego de pasar por todo el proceso de diseño, se procedió a seleccionar los diferentes equipos que conformaron al secador de vacío, tales como: bomba de vacío, el motor-reductor, la fuente de calor, entre otros. Se consideraron además los costos de diseño y de construcción.

Palabras clave: Humedad relativa, temperatura de secado, presión de vacío, tiempo de secado.

ABSTRACT

The present project took as a purpose to realize an analysis of the design of a dryer of cocoa to the gap; that was comprising two areas of the Mechanical engineering, such like: heat transfer and mechanical design. The main purpose of the development of the project was to reach the properties needed by the national and international regulations in the least possible time, for the commercialization of the cocoa on the foreign market. The project was focused it was doing the optimization of the capacity of drying on the part of the producers assuring with it a better competitiveness on the market for the sale of a quality product. Three very important design factors were contemplated; relative moisture, temperature of drying, and time of drying. For the drying process, it was considered that the product was happening first for a process of fermented, with which one managed to limit this way the moisture of the almond to 30 % with a rest of approximately 5 days. In the design process the dear parameters were the following ones: the origin of the grain was of the canton Junín of the province of Manabí; the relative moisture of the air is 82 % in average, and a temperature mediated of 24,6 °C. It was considered to be a 5 tons daily production in a day of 8 working time; it was planned like goal to limit the moisture of the almond to 7 % in the established work day. The process of mechanical design was comprised by the sizing of the camera of drying to the gap; the pressure interns of the receptacle, as well as the material that composes it, there were important factors for the design of the same one. There was realized the design of the palettes that would keep in touch continuously with the material to be dried. After happening for the whole design process, one proceeded to select the different teams that agreed to the gap dryer, such like: vacuum pump, the engine - differential, the heat source, between others. There were considered to be also the costs of design and of construction.

Keywords: relative humidity, Drying temperature, vacuum pressure, drying time

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	I
1.1. Descripción del problema.....	I
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Marco teórico.....	2
CAPITULO 2.....	14
2. Metodología del diseño.....	14
2.1. Análisis del proceso de secado.....	14
2.2. Alternativas de diseño.....	15
2.3. Parámetros de diseño.....	19
2.4. Selección del secador.....	19
2.5. Diseño conceptual.....	24
2.6. Cálculos mecánicos.....	26
2.7. Cálculo Termodinámico.....	39
CAPITULO 3.....	15
3. Resultados.....	15
3.1. Cálculos mecánicos.....	15
3.2. Diseño de la cámara de secado.....	15
3.3. Diseño de las paletas.....	53
3.4. Diseño del eje de transmisión.....	55
3.5. Diseño de las etapas del motor reductor.....	57
3.6. Diseño de la compuerta de salida del material.....	57
3.7. Calor requerido para el secado.....	58
3.8. Calculo del coeficiente de convección dentro de la cámara.....	59
3.9. Perdidas de calor.....	59
3.10. Cálculo del tiempo de secado.....	60
3.11. Costos del secador al vacío.....	61

3.12. Costos de secado	64
CAPITULO 4.....	67
4. Conclusiones y recomendaciones	67
4.1. Conclusiones.....	67
4.2. Recomendaciones	67
Anexo I-Diseño del tanque	66
5. Diseño de la cámara de secado	66
Anexo II-Diseño de Paletas	70
6. Diseño de paletas	70
6.1. Paletas superiores	70
6.2. Paletas inferiores	73
Anexo III-Diseño del eje de transmisión.	77
7. Diseño del eje de transmisión.....	77
Anexo IV-Cálculos Termodinámicos.....	82
8. Cálculo del calor requerido para secar el cacao.....	82
9. Cálculo del coeficiente interno de convección.....	82
10. Cálculo del coeficiente externo de convección.....	83
11. Cálculo de las pérdidas de calor.	84
12. Cálculo del calor total.	84
13. Cálculo del coeficiente de radiación de convección.	84
14. Cálculo del tiempo de secado	85
Anexo V-PLANOS	86
Bibliografía.....	87

ABREVIATURAS

ANECACAO Asociación Nacional de Exportadores de Cacao

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

INIAP Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias

MAGAP Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca

ASME American Society of Mechanical Engineers

SIMBOLOGÍA

Km/h	Kilometro por Hora
Kg	Kilogramo
°C	Celsius
Kg/m ³	Kilogramo por Metro Cúbico
m	Metro
mm	Milímetro
HP	Horse Power
m ³	Metro Cúbico
kWh	Kilovatio por Hora
Ton	Tonelada
KPa	Kilo pascal
N	Newton
N/m ³	Newton por Metro Cúbico
Nm	Newton-metro
MPa	Mega pascal
RPM	Revoluciones por Minuto
N/m	Newton por Metro
Kg/h	Kilogramo por Hora
Kg/s	Kilogramo por Segundo
W	Vatio
KJ/Kg	Kilo joule por Kilogramo
KJ/KG-K	Kilo joule por Kilogramo Kelvin
W/m-°C	Vatio por Metro Grado Celsius
W/m ² -°C	Vatio por Metro Cuadrado-Grado Celsius
m/s ²	Metro por segundo cuadrado
m ² /s	Metro Cuadrado por Segundo
Kg/m-s	Kilogramo por Metro-Segundo
W/m ² -K	Vatio por metro Cuadrado-Kelvin
W/m-K	Vatio por Metro-Kelvin
W/s	Vatio por Segundo
Ω	Ohmio

V	Voltio
A	Amperio
S	Segundo
m ³	Metro Cúbico
m ³ /h	Metro Cúbico por Hora
CFM	Pie Cúbico por Minuto
KN/m	Kilo Newton por Metro
J/s	Joule por Segundo
kW	Kilovatio
h	Horas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.3.1.1	Proceso natural de secado.....	18
Figura 1.3.1.2	Proceso natural de secado.....	18
Figura 1.3.2.1	Cacao fino de aroma.....	19
Figura 1.3.2.2	Cacao CCN-51.....	20
Figura 1.3.6.1.5	Cartas psicométricas.....	25
Figura 1.3.4.2.2	Isotermas de humedad de equilibrio.....	26
Figura 1.3.5.	Selección del secador vs forma de la materia prima.....	28
Figura 2.2.1	Secador natural.....	31
Figura 2.2.2	Secador de plataforma con gas licuado y sus partes.....	32
Figura 2.2.3	Secador al vacío con sus partes.....	33
Figura 2.5	Diseño de forma del secador de cacao al vacío.....	39
Figura 2.6.1	Representación esquemática de líneas de apoyo para el diseño de recipientes cilíndricos expuestos a presiones externas.....	42
Figura 2.6.2.1.1	Diagrama de Cuerpo libre para una paleta superior sometida a presión hidrostática.....	44
Figura 2.6.2.1.2	Diagrama de cuerpo libre para una paleta superior sometida a presión hidrostática.....	44
Figura 2.6.2.1.3	Modelado de las paletas para diseño de las mismas.....	45
Figura 2.6.2.1.4	Teoría de la falla de Mohr Modificada para materiales frágiles.....	46
Figura 2.6.2.2.1	Esquema del conjunto eje-paletas.....	47
Figura 2.6.2.2.2	Factor de confiabilidad.....	50
Figura 2.6.2.2.3	Factor de superficie.....	50
Figura 2.6.3.1	Motor eléctrico requerido para la transmisión de potencia.....	51
Figura 2.6.3.2	Esquema del tipo de reducción requerido en el sistema mecánico para obtener la velocidad requerida a la salida.....	51
Figura 2.6.4.1	Esquema del modelado de la compuerta.....	52
Figura 2.6.4.2	Esquema de la carga distribuida sobre la compuerta.....	53
Figura 2.7.1	Esquema del balance de masa en la cámara de secado.....	54
Figura 2.7.2.2.1	Esquema de resistencias para secador sin aislamiento térmico.....	56
Figura 2.7.2.2.2	esquema de resistencias para secador con aislamiento térmico.....	57

Figura 3.11 Diagrama de Gantt para la construcción del secador al vacío.....	78
Figura 5.1 Carta geométrica para componentes bajo presión externa.....	81
Figura 5.2 Carta para determinar el espesor del casco de los componentes bajo presión externa cuando se construyeron de acero austenítico tipo 304.....	82
Figura 6.1.1 Distribución de la carga sobre las paletas superiores.....	85
Figura 6.1.2 Esfuerzo aplicado sobre la superficie de las paletas superiores.....	85
Figura 6.1.3 Sección transversal de las paletas superiores.....	86
Figura 6.2.1 Diagrama de carga aplicada en las paletas inferiores.....	88
Figura 6.2.2 Esfuerzo aplicado sobre la superficie de la placa inferior.....	89
Figura 6.2.3 Sección transversal de las paletas inferiores.....	90
Figura 7.1 Datos para determinar el límite de resistencia a la fatiga.....	93
Figura 7.2 Factor teórico de concentración del esfuerzo.....	94
Figura 7.3 Sensibilidad a la muesca.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Requisitos de calidad del cacao en grano beneficiado.....	21
Tabla 2 Contenidos de varias sustancias en porcentaje por cada almendra que pesa 1.0 y 1.8 gramos.....	22
Tabla 3 Densidad de diferentes tipos de cacao.....	34
Tabla 4 Matriz de decisión.....	38
Tabla 5 Factor de carga.....	49
Tabla 6 Factor de tamaño.....	49
Tabla 7 factor de temperatura.....	49
Tabla 8 Constantes para la ecuación 44.....	61
Tabla 9 Matriz de decisión para el tipo de fuente de calor.....	66
Tabla 10 Dimensiones del secador.....	67
Tabla 11 Parámetros para el diseño de las paletas superiores.....	68
Tabla 12 Resultados obtenidos del diseño de las paletas superiores.....	69
Tabla 13 Parámetros requeridos para el diseño de las paletas inferiores.....	69
Tabla 14 resultados obtenidos para las paletas inferiores.....	70
Tabla 15 Parámetros requeridos para el cálculo del torque aplicado al eje.....	70
Tabla 16 Parámetros para determinar el diseño del eje de transmisión.....	71
Tabla 17 Resultados obtenidos del diseño del eje de transmisión en dos tipos de materiales.....	71
Tabla 18 Parámetros utilizados en el cálculo de las etapas.....	72
Tabla 19 Descripción de la caja de reducción.....	72
Tabla 20 Parámetros de diseño de la compuerta.....	73
Tabla 21 Flujos de entrada y salida del grano.....	73
Tabla 22 Datos para obtener el flujo de energía del cacao.....	73
Tabla 23 Datos para obtener el coeficiente de convección dentro de la cámara de secado.....	74
Tabla 24 Datos para obtener el flujo de calor por pérdidas.....	75
Tabla 25 Datos para obtener el tiempo de secado.....	75
Tabla 26 Costo de materiales y equipo.....	76
Tabla 27 Costos de diseño de equipo.....	76

Tabla 28 Costos de mano de obra.....	77
Tabla 29 Costos indirectos del equipo e instalación.....	77
Tabla 30 Costo total de secado.....	79
Tabla 31 Resultados de la primera iteración para el diseño de la cámara de secado...	83
Tabla 32 Resultados de la segunda iteración para el diseño de la cámara de secado..	83
Tabla 33 Resultado de la tercera iteración para el diseño de la cámara de secado.....	84
Tabla 34 Resultados obtenidos de la primera iteración para el dimensionamiento de las paletas superiores.....	87
Tabla 35 Resultados obtenidos de la segunda iteración para el dimensionamiento de las paletas superiores.....	87
Tabla 36 Resultados obtenidos de la tercera iteración para el dimensionamiento de las paletas superiores.....	88
Tabla 37 Resultados obtenidos de la tercera iteración para el dimensionamiento de las paletas inferiores.....	91
Tabla 38 Resultados obtenidos de la tercera iteración para el dimensionamiento de las paletas inferiores.....	91
Tabla 39 Parámetros requeridos para el diseño del eje.....	93

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Pared de la cámara de secado

PLANO 2 Eje de transmisión

PLANO 3 Tapa inferior

PLANO 4 Tapa superior fija

PLANO 5 Tapa superior móvil

PLANO 6 Paletas superiores

PLANO 7 Paletas inferiores

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

Actualmente el cacao (*Theobroma cacao L.*) es un cultivo que ha tenido un interés comercial, a tal grado de ser uno de los productos de gran demanda internacional. El cacao se utiliza principalmente para elaborar el chocolate, que previamente pasa por algunos procesos industriales como el secado, tostado, triturado y prensado, para obtener la manteca de cacao. En este caso nos enfocaremos en el secado.

Existen dos tipos de secado, que son el natural y el artificial; el método natural utiliza la luz del sol por 4 días aproximadamente para que el cacao quede con un porcentaje de humedad de 7% según lo indica las normas internacionales; esto depende de las condiciones climáticas.

Este tipo de secado presenta problemas cuando el clima no favorece al secado y por ende disminuye la calidad del grano. Por ese motivo se utiliza mucho el método de secado artificial, pero presenta problemas al secar ya que solamente quema el exterior de la almendra pero no lo seca por dentro, esto se debe a la falta de conocimiento del proceso de secado, falta de tendales, o falta de tecnologías que mejoren el proceso de secado.

Para resolver este problema se ha planteado un diseño de secadora que utiliza una bomba de vacío, para crear un vacío interior donde se almacene el cacao, y que resista la diferencia de presión.

Esta máquina secadora aumentará la velocidad de secado y disminuirá el calor requerido. Este equipo debe ser construido con materiales disponibles en el mercado nacional.

1.2. Objetivo general

Diseñar un secador de cacao que permita acelerar el proceso de secado de la almendra, incrementando la producción del mediano productor de cacao usando condiciones de vacío.

1.2.1. Objetivos específicos

- Realizar un análisis termodinámico al proceso de secado.
- Realizar el análisis mecánico de los principales elementos.
- Construcción de un prototipo

1.3. Marco teórico

1.3.1. Proceso de secado del cacao

El proceso de secado es quizás la etapa más importante de la producción del cacao; en ella está involucrada tanto la conservación del producto, así como el sabor y contextura del mismo.

Existen diversos métodos de secado de cacao, muchos de los cuales vienen empleándose desde los principios de la producción de cacao, debido a su bajo costo de implementación, considerando los materiales así como la mano de obra (agropecuarios.net, 2013).

Entre los procesos de secado tenemos los siguientes:

➤ **Secado natural**

En este método se contempla el efecto del aire sobre el grano del cacao; este viene a ser el método más convencional, ya que el mismo depende de las condiciones climáticas del sector o región. El movimiento del aire de secado se debe a la acción del viento, y la energía pedida para evaporar la humedad de la almendra depende de la capacidad de secado (absorción de humedad) del aire y de la incidencia directa de la energía solar. Existen diversas formas de poner en práctica este método; muchas de estas han evolucionado con el tiempo, las necesidades y las condiciones climáticas.

➤ **Secado artificial**

En este tipo de método existen básicamente dos tipos de aplicaciones; una aplicación usa temperaturas altas, y la otra aplicación usa temperaturas bajas.

Este proceso nos da la facilidad de hacer uso de diversas tecnologías, así como disímiles fuentes de energía; el proceso como tal, brinda ventajas y desventajas, pero no es tan dependiente como el proceso natural.



Figura 1.3.1.1 Proceso natural de secado

Fuente: Agropecuarios.net, 2013



Figura 1.3.1.2 Proceso artificial de secado

Fuente: Agropecuarios.net. 2013

1.3.2. Producción de cacao en el Ecuador

El cacao es una fruta de procedencia tropical, su árbol tiene flores pequeñas y pétalos largos; su fruto es leñoso de forma alargada, y aparece en la culminación de los árboles y debajo de sus ramas. Dependiendo del tipo de cacao pueden ser de color amarillo, blanco, verde o rojo.

El grano está cubierto de una pulpa rica en azúcar con la que se puede hacer jugo, y el grano transformado en chocolate tiene un agradable sabor. En el Ecuador se encuentran dos tipos de cacao: (www.proecuador.gob.ec).

- **Cacao fino de aroma.-** El cacao fino y de aroma tiene características distintivas de aroma y sabor buscadas por los fabricantes de chocolate. Representa únicamente 5% de la producción mundial de cacao. Del total de la exportación ecuatoriana se estima que un 80% es cacao fino de aroma.
- **Cacao CCN-51.-** Conocido también como colección Castro Naranjal, el color característico del fruto es el rojo. Este fruto es reconocido por su alto rendimiento en la extracción de semielaborados, ingredientes esenciales para la producción a escala de chocolates y otros. Este tipo de cacao representa el 20% del cacao exportado en el Ecuador.



Figura 1.3.2.1 Cacao fino de aroma

Fuente: www.anecacao.com. 2015



Figura 1.3.2.2 Cacao CCN-51

Fuente: www.anecacao.com. 2015

El Ecuador posee una gran superioridad en este producto; más del 70% de la producción mundial del cacao fino y de aroma se lo encuentra en nuestras tierras, debido a las propiedades climáticas con las que cuenta el país, dando una mejor producción de este cacao, y convirtiéndonos en el mayor productor de cacao fino y de aroma del mundo (ANECACAO, 2015).

Las provincias donde más se cultivan cacao son: Manabí (100.961 Has cosechadas), Los Ríos (83.500 Has cosechadas) y Guayas (91.700 Has cosechadas) de un total de 490.000 Has cosechadas en todo el país. En el año 2014 se produjeron 235.5 mil toneladas métricas, que corresponden aproximadamente a la producción de las 3 primeras provincias (ANECACAO, 2015).

1.3.3. Características físicas y químicas del cacao

En este punto del proyecto, las características físicas y químicas de la almendra de cacao son de gran importancia ya que los grandes productores toman a consideración esos factores al momento de seleccionar el producto.

La calidad física del cacao se determina por el tamaño y peso de la almendra; también influyen el porcentaje de fermentación; contenido de testa o cascarilla; contenido de humedad y defectos.

A mayor tamaño y peso de las almendras, menor será la testa o cascarilla, la misma que representa un desperdicio para la industria. El contenido de humedad en la almendra no debe ser mayor del 7% según la NORMA INEN 176, 2006

Tabla 1 Requisitos de calidad del cacao en grano beneficiado

Requisitos	Unidad	ARRIBA					CCN51
		A.S.S.P.S	A.S.S.S	A.S.S	A.S.N	A.S.E	
Cien gramos pesan	G	135-140	130-135	120-125	110-115	135-140	135-140
Buena fermentación (mín.)	%	75	65	60	44	26	***65
Ligera fermentación (mín.)	%	10	10	5	10	27	11
Violeta (máx.)	%	10	15	21	25	25	18
Pizarroso (pastoso) (máx.)	%	4	9	12	18	18	5
Moho (máx.)	%	1	1	2	3	4	1
Totales (análisis sobre 100 pepas)	%	100	100	100	100	100	100
Defectuosos (totales 500 gramos) (máx.)	%	0	0	1	3	**4	1
Total Fermentado (mín.)	%	85	75	65	54	53	76
A.S.S.P.S	Arriba Superior Sumer Plantación Selecta						
A.S.S.S	Arriba Superior Sumer Selecto						
A.S.S	Arriba Superior Selecto						
A.S.N	Arriba Superior Navidad						
A.S.E	Arriba Superior Época						
*	Coloración marrón violeta						
**	Se permite la presencia de granza solamente para el tipo A.S.E.						
***	La coloración varía de marrón a violeta						

Fuente: NORMA INEN 176, 2006

En la calidad química del cacao se toman a consideración la grasa, proteína y polifenoles, índice de saponificación, y características de ácidos grasos que se encuentran dentro de la almendra.

La manteca de cacao es una mezcla de glicéridos, y es importante en la precepción del sabor del cacao; a esta le corresponde cerca del 50% del peso seco del grano, proteína entre 15 Y 20% de peso del grano seco, y a los polifenoles de la almendra del 12 al 18% de todo el peso seco del grano según el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2010).

Tabla 2 Contenidos de varias sustancias en porcentaje por cada almendra que pesa 1.0 y 1.8 gramos

Sustancias	%máx. en cotiledón	% máx. en cascara
Agua	3.2	6.6
Grasa (manteca de cacao)	57	5.9
Cenizas	4.2	20.7
Nitrógeno total	2.5	3.2
Teobromina	1.3	0.9
Cafeína	0.7	0.3
Almidón	9	5.2
Fibra cruda	3.2	19.2

Fuente: INIAP, 2010

1.3.4. Procesos y parámetros para el secado

Siempre que la partícula sólida es sometida a un proceso de secado, se presentan dos tipos de transferencia de manera simultánea:

1. Transferencia de energía (principalmente como calor) desde el entorno para evaporar la superficie húmeda.
2. Transferencia de humedad interna a la superficie del sólido y su subsecuente de evaporación debido al proceso 1.

El proceso 1 que se comprende de la eliminación del agua como vapor de la superficie del material, depende básicamente de las condiciones externas de temperatura, humedad, caudal, área de exposición y la presión.

El proceso 2 comprende al movimiento de la humedad en el interior del sólido; esta es una función de la naturaleza física de los sólidos, la temperatura y su contenido de humedad.

En una operación de secado alguno de estos procesos puede ser la limitación del factor que rige la tasa de secado, aunque ambos proceden simultáneamente durante todo el ciclo de secado (Mujumdar, 2006).

A continuación se procede a dar una explicación detallada de los procesos que se han mencionado.

1.3.4.1. Condiciones externas

En este proceso, las variables a considerar son temperatura, humedad, rapidez de cambio, dirección del flujo de aire, la forma física del sólido y el método de soporte del sólido durante la operación de secado.

Estas condiciones externas son principalmente importantes en el estado inicial de la remoción de humedad (Mujumdar, 2006).

A continuación se presentan los parámetros considerados como condiciones externas:

1.3.4.2. Entalpía

La energía interna y el flujo de trabajo por unidad de masa se han agrupado convenientemente en un compuesto de energía llamado entalpía (Mujumdar, 2006).

La entalpía se define mediante la expresión:

$$H = u + PV \left[\frac{J}{Kg} \text{ ó } \frac{Nm}{Kg} \right] \text{ (ec. 1)}$$

1.3.4.3. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica se define como el calor necesario para elevar la temperatura de una unidad de masa de sustancia por una temperatura de la unidad. Para un proceso de presión constante, la capacidad calorífica está dada por:

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p \text{ (ec. 2)}$$

Donde el flujo de calor Q es la suma del cambio de la energía interna ∂u y el trabajo realizado con la presión $P\partial V$ (Mujumdar, 2006).

La ecuación 2 podría ser extendida como sigue:

$$C_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad (\text{ec. 3})$$

1.3.4.3.1. Humedad absoluta entre la mezcla gas-vapor

El aire húmedo es un mezcla de vapor de agua y gas, compuesto de una masa de vapor de agua m_w y una masa de gas m_G (aire). El contenido de humedad o humedad absoluta puede ser expresada como:

$$Y = \frac{M_w}{M_G} \frac{\psi P^0_w}{P - \psi P^0_w} \quad (\text{ec. 4})$$

Para el vapor de agua y aire cuando $M_w = 18.01$ Kg/Kmol y $M_G = 28.96$ Kg/Kmol, de manera que la ecuación 4 sería reescrita (Mujumdar, 2006). de la siguiente manera:

$$Y = 0.622 \frac{\psi P^0_w}{P - \psi P^0_w} \quad (\text{ec. 5})$$

1.3.4.3.2. Temperatura de bulbo seco

Es la temperatura que resulta de la mezcla vapor-gas; normalmente esta variable se determina por la inmersión de un termómetro en la mezcla (Mujumdar, 2006).

1.3.4.3.3. Punto de rocío

Esta es la temperatura en la cual una mezcla de vapor-gas se satura cuando se enfría a una presión constante de contacto con un líquido.

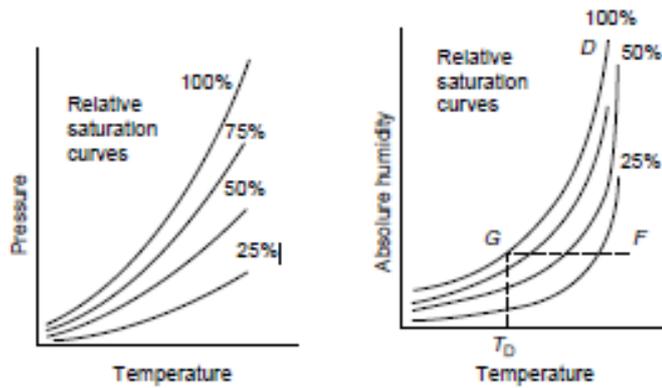


Figura 1.3.4.1.5 Dos formas de cartas psicrométricas

Fuente: Arun S. Majumdar, 2006

1.3.4.3.4. Volumen húmedo

El volumen húmedo V_H de una mezcla vapor-gas es el volumen en metros cúbicos de 1 Kg de gas seco y acompañado de vapor a la presión y temperatura que prevalecen.

Para una mezcla con una humedad absoluta la ley del gas ideal da la humedad del volumen como:

$$V_H = 0.082 \left(\frac{1}{M_G} + \frac{Y}{M_W} \right) \frac{T}{P} \quad (\text{ec. 6})$$

1.3.4.3.5. Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura constante alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla vapor-gas insaturada moviéndose rápidamente.

1.3.4.4. Condiciones internas

Como resultado de la transferencia de calor a un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro de los sólidos, mientras que la evaporación de la humedad se desarrolla desde la superficie, esto produce una migración de humedad desde dentro del sólido a la superficie, que se produce a través de uno o más mecanismos tales como difusión, flujo capilar, presión interna entre otros.

El gradiente de temperatura en el sólido también creará un gradiente de presión de vapor que a su vez dará lugar a la difusión de vapor de humedad a la superficie.

A continuación presentamos las condiciones internas:

1.3.4.4.1. Contenido de humedad de los sólidos

La húmeda contenida en solución sólida o líquida ejerce una presión de vapor hasta un punto según la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido, y la temperatura.

Un sólido húmedo expuesto a un suministro de gas fresco continúa perdiendo humedad al punto en el cual la presión de vapor de la humedad en el sólido es igual a la presión parcial del vapor en el gas.

Los sólidos pueden ser clasificados como sigue:

- No higroscópico, capilar-medio poroso
- Higroscópico-medio poroso
- Coloidal (no poroso)

1.3.4.4.2. Isotermas de humedad

Un producto seco se llama higroscópico si es capaz de enlazar agua con una reducción simultánea de presión de vapor (Mujumdar, 2011).

Las isotermas de sorción medidas experimentalmente bajo condiciones isotérmicas son usadas para describir las propiedades higroscópicas de un producto.

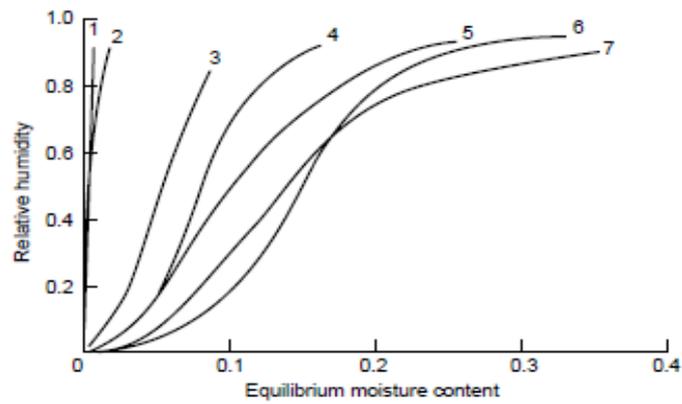


Figura 1.3.4.2.2 Típicas isothermas de humedad de equilibrio en la temperatura de las sustancias: fibra (1) asbesto, PVC (2) 508 C, carbón de madera (3), papel kraft (4), yute (5), trigo (6), papas (7)

Fuente: Arun S. Majumdar, 2006

1.3.5. Selección de secadores

Con pocas excepciones, la mayoría de los productos de la industria se someten en algún momento al proceso de secado. Un producto debe ser adecuado para cualquier procesamiento posterior a la venta.

A continuación se muestran una tabla de selección del secador según las aplicaciones:

Dryer Selection versus Feedstock Form

Nature of Feed	Liquids			Cakes		Free-Flowing Solids					Formed Solids
	Solution	Slurry	Pastes	Centrifuge	Filter	Powder	Granule	Fragile Crystal	Pellet	Fiber	
<i>Convection Dryers</i>											
Belt conveyer dryer							×	×	×	×	×
Flash dryer				×	×	×	×			×	
Fluid bed dryer	×	×		×	×	×	×		×		
Rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Spray dryer	×	×	×								
Tray dryer (batch)				×	×	×	×	×	×	×	×
Tray dryer (continuous)				×	×	×	×	×	×	×	
<i>Conduction Dryers</i>											
Drum dryer	×	×	×								
Steam jacket rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Steam tube rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Tray dryer (batch)				×	×	×	×	×	×	×	×
Tray dryer (continuous)				×	×	×	×	×	×	×	

Figura 1.3.5 Selección del calor vs forma de la materia prima

Fuente: Arun S. Majumdar, 2006

CAPITULO 2

2. Metodología del diseño

2.1. Análisis del proceso de secado

El proceso de secado requiere de una fuente de energía que proporcione el calor necesario para extraer la humedad residual en la almendra de cacao. En el diseño se considera las tres formas de transferencia de energía, conducción, convección y radiación; para el diseño de secadores hemos de obtener el “Número de Biot”, el cual nos indica que en cuerpos cuya forma se asemeja a una placa, un cilindro o una esfera, el error introducido al asumir que la temperatura en cualquier instante será menor del 5% si el número de Biot es menor de 0,1.

Bajo la premisa de condiciones de vacío, en la cámara existirá un flujo de aire pero a presiones menores a la atmosférica.

Los secadores de vacío son prácticamente iguales a los secadores de bandeja, excepto que funcionan a vacío porque el calor se transmite por conducción o por radiación. El vacío se consigue evacuando los gases de la cámara que contiene las bandejas (Earle, 1998).

Una vez que la almendra de cacao ingresa a la cámara de secado, el agua de la superficie exterior empezará a evaporarse debido a la convección, conducción y radiación, por lo cual se hará un cálculo de la cantidad de calor necesaria para la vaporización. La energía térmica necesaria para vaporizar agua en cualquier estado se puede calcular por medio de los calores latentes (Earle, 1998).

Un punto importante a tratar será la tasa de calor que existe desde la superficie del secador a la superficie exterior del cacao, y la tasa de calor entre la superficie exterior del cacao y el centro del mismo, ya que es de suma importancia mantener la humedad menor a 8% en todo el volumen del cacao.

2.2. Alternativas de diseño

En una industria tan extensa y diversificada como la de la alimentación es de esperar que se utilice un número elevado de tipos diferentes de aparatos de secado. Aunque los principios básicos del secado se pueden aplicar a cualquier tipo de secadores, estos se pueden clasificar según su tipo de operación, tipo de entrada de calor, estado del material en el secador, presión de operación, temperatura de operación, flujo de aire o gas de calentamiento, etc. (según sea el requerimiento) (Earle, 1998).

En el capítulo 1, sección 1.3.5 se puede observar una clasificación de secadores, y la manera de seleccionarlo según su aplicación basada en el tipo de sólido así como la temperatura de trabajo (Mujumdar, 2006).

A continuación se mencionan algunos de los secadores usados comúnmente y se dará una breve reseña del mismo:

2.2.1. Secadores naturales

Son secadores construidos con plataforma de madera y cemento, y los más apropiados se hayan acondicionados con superficies especiales fabricadas de segmentos plásticos perforados; aunque la madera es el mejor material porque su comportamiento es más homogéneo en cualquier época del año.

El techo de los túneles o marquesinas es de plástico UV, exclusivo para invernaderos (20 micras de espesor), el cual se coloca sobre una estructura metálica o plástica en forma de arco o de túnel y evita la condensación de la humedad.

Para la construcción de estos secadores se debe tomar en cuenta la dirección del aire, debido a que estos secadores no trabajan con aire forzado a fluir, sino con la velocidad natural del aire y este debe ser grande para que exista una mejor transferencia de calor del grano al medio.



Figura 2.2.1 Secador natural

Fuente: Sandra Carolina Martínez Mejía-Basem Hanna Nassar Canahuati, 2013

Ventajas de este tipo de secador

- La humedad requerida es alcanzada en condiciones climáticas ideales.
- No hay riesgo de contaminación de olores anormales
- Mayor uniformidad en el secado
- Estructura poco especializada

Desventajas de este tipo de secador

- Dependencia de las condiciones climáticas
- Baja eficiencia de producción por la duración del secado
- Riesgo de producción de moho del grano por el largo tiempo de secado

2.2.2. Secador de plataforma a base de gas licuado

Es un secador mecánico con un quemador de gas, un horno de combustión, una chimenea para extraer el humo, y la inyección del aire que lo realiza un ventilador centrífugo para succionar el aire caliente del horno y empujarlo a la cama de secado. La figura 2.2.2 presenta las partes principales de este tipo de secadores.

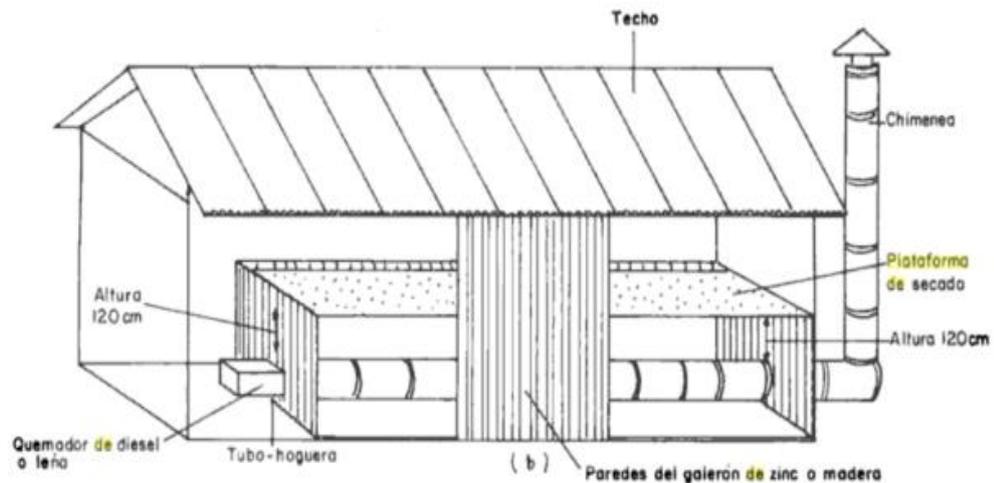


Figura 2.2.2 Secador de plataforma con gas licuado y sus partes más significativas

Fuente: Miguel Malespín, 2002

Ventajas de este tipo de secador

- Menor tiempo de secado.
- Mejor eficiencia en la combustión.
- Se obtiene una temperatura constante.
- Poca utilización de recursos humanos.
- Bajo riesgo de contaminación del grano.

Desventajas de este tipo de secador

- Costo de inversión es alto.
- Costo de la fuente de energía (gas licuado) alto.
- Dificultad al mover y retirar el cacao, debido a las altas temperaturas

2.2.3. Secador al vacío

Es un tipo de secadora que utiliza un tanque presurizado, una bomba de vacío, un eje con paletas de movimiento, motor eléctrico, sistema de transmisión de potencia a base de poleas, una caldera. El cacao entra al tanque presurizado, que está conectado con la bomba de vacío, la cual comienza a succionar el aire dentro del tanque para crear una presión menor a la atmosférica y así disminuir la temperatura de saturación del agua.

Luego la caldera produce vapor para que circule dentro de las chaquetas alrededor del tanque presurizado, así calentar la superficie y transferir el calor hacia el grano.

Por último el eje con las paletas, dentro de la cámara de secado, comienzan a moverse, por parte de la potencia transmitida del motor, con el motivo de que el grano se mueva y que la transferencia de calor sea más uniforme.

A continuación un esquema del sistema de secador al vacío, con sus partes.

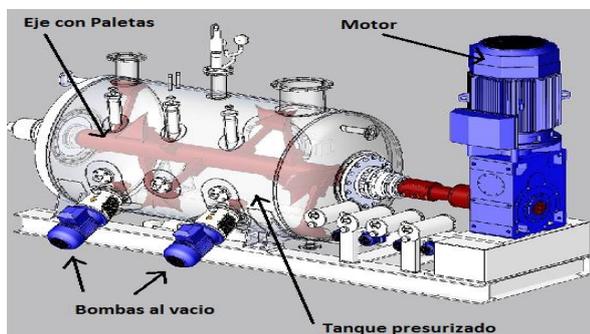


Figura 2.2.3 Secador al vacío de granos con sus partes más representativas

Fuente:

www.bachiller.com/productos/equipos_de_proceso/procesado_de_solidos/secadores_al_vacio/

Ventajas de este tipo de secador

- Perfecta homogeneidad y uniformidad de secado
- Tiempos de secados reducidos.
- Consumo de energía menor

Desventajas de este tipo de secador

- Coste alto de la fabricación del equipo
- Coste alto de mantenimiento del equipo

2.3. Parámetros de diseño

- El secado se realizará a una presión menor a la atmosférica.
- La temperatura de secado será menor a 75° C y mayor a 50° C.
- El cacao es proveniente de Junín-Manabí, cuyas condiciones climáticas son las siguientes: temperatura promedio de 28° C, velocidad del viento 32 Km/h, humedad relativa
- El cacao ha sido sometido al proceso de fermentación.
- El cacao se encuentra con un porcentaje de humedad después del fermentado de 30%.
- Se pretende llegar a una humedad relativa de 8% (máximo) en la almendra de cacao.
- Capacidad del secador: 1000 kg

2.4. Selección del secador

Existen dos métodos de secado, el natural y artificial, con distintos tipos de secadores. Se han analizado tres tipos de secadores: el secador natural tipo marquesina, secador de plataforma en base a gas licuado, y el secador de vacío. La capacidad a la que se va a diseñar el secador es de 1 tonelada métrica (1000 kg) de cacao, por lo que se debe calcular el volumen del secador utilizando los valores de densidad de cacao.

Tabla 3 Densidad de diferentes tipos de cacao

Tipo de caco	Densidad (kg/m3)
Cacao en baba	900
Cacao húmedo fermentado	775
Cacao grano seco	635

Fuente: Sandra Carolina Martínez Mejía-Basem Hanna Nassar Canahuati, 2013

En esta tabla se presenta la densidad del cacao fermentado que tiene una densidad de 775 kg/m³, por lo que podemos obtener el volumen que nos dio un valor de 1.29 m³ de volumen. Con este valor de volumen podemos analizar los costos de secado de cacao con los diferentes métodos.

A continuación se realiza un análisis de costo de fabricación, operación, mantenimiento, entre otros, con el fin poder generar una matriz de decisión que nos permita analizar las opciones y definir el tipo de secador.

2.4.1. Costos de fabricación y operación de estos tipos de secadoras.

Para esta sección se realizará un cálculo aproximado de los costos de fabricación y operación para las diferentes secadoras que se mencionaron con anterioridad.

2.4.1.1. Secadora natural

Este tipo de secadora requiere techos con plásticos UV de calibre 6, bandejas de madera donde se contenga el cacao y columnas de madera para formar la estructura del techo.

Para el caso de las bandejas, se calculó el volumen del cacao para una tonelada y con ese valor se obtuvieron las dimensiones de la bandeja, que son de 2.5 X 3.75 m y una capa de llenado de 0.068 m. El precio de tablas de madera de 800 X 150 mm son de \$14.25, entonces el precio total de la fabricación de las bandejas son \$445.31.

Para el caso de las columnas nos dio un costo de \$1876.32, y el plástico UV un valor de \$50.34. Entonces la fabricación de este secador nos da un valor de \$2371.97.

En lo que respecta a costos de operación, no requiere insumos adicionales debido a que esta secadora trabaja con la energía solar, solo se debe considerar la mano obra de la persona que trabajará moviendo el cacao para que tenga un secado más homogéneo.

Considerando el valor de una rutina diaria de una persona ronda en los \$16.00, el valor total será \$80, tomando en cuenta que este proceso de secado natural requiere aproximadamente de 5 días de secado.

2.4.1.2. Secadora de plataforma con gas licuado

Para este tipo de secadora hay que considerar las siguientes partes:

- Bandeja
- Ventilador centrífugo
- Tanque de gas
- Quemador
- Chimenea

Para el caso de la bandeja, se procedió con el mismo cálculo utilizando el volumen del cacao, y nos dio las siguientes dimensiones 1.5 X 2 X 0.75 m por lo que el costo de construcción de esto nos da un valor de \$643.5. Aparte requeriremos un ventilador centrífugo de 5 hp que tiene un costo de \$1800.

Se requerirá también de un tanque de gas de 45 kg que ronda \$150, una boca de Aluminio-Cobre que ronda entre \$110. Un quemador ronda entre los \$180, una chimenea de 4 m de largo está entre \$362, dándonos un valor total de \$3245.5.

En lo que respecta a los costos de operación, esta secadora requiere de una alimentación de gas continua, el quemador consume 2.19 galones/ hora y el tanque tiene 75 galones aproximadamente, por lo que en cada secada se consumen 23% del tanque, por lo que el costo de este sería de \$35.05. El ventilador centrífugo consume energía eléctrica, y el valor de este consumo es aproximadamente \$1.19 diario. Así mismo el costo de la mano de obra es de \$16.00 por una rutina diaria. Entonces el costo total de operación un día de trabajo será \$52.24.

2.4.1.3. Secadora de vacío

Este tipo de secadoras requiere de los siguientes componentes principales:

- Tanque diseñado a presión
- Bomba de vacío
- Motor eléctrico
- Eje con paletas
- Poleas y bandas
- Rodamientos
- Caldera

El tanque a presión debe de tener una capacidad de 1.5 m³ y tiene un costo aproximado de \$9752.00. El costo de la bomba de vacío de 30 hp está entre los \$5362.00. Se requieren de una caldera de 6 hp, y esta oscila entre los \$5074.66. El motor que se requiere es potencia aproximadamente 35 hp, y su valor ronda entre los \$1600. Todo el sistema tiene un costo total aproximado de \$21793.66.

Los costos de producción involucran los componentes como la bomba de vacío, el motor eléctrico, y la caldera. Por cada tonelada seca, la máquina se tarda 2 horas en secar, por lo que la bomba de vacío consume 44.74 kWh que tiene un costo de \$1.79, el motor eléctrico consume 52.18 kWh que tiene un costo de \$2.08, y la caldera consume 17.88 kWh que tiene un costo de \$0.90. Por lo que el costo de producción para una tonelada de cacao fermentado es de \$4.77.

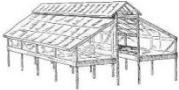
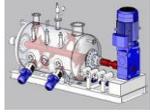
2.4.1.4. Matriz de decisión

La matriz de decisión involucra algunos aspectos del diseño en todo proyecto a realizar; para la elaboración de dicha tabla, consideramos algunos puntos tales como el costo de operación, el costo de fabricación, el costo de mantenimiento, la ergonomía del diseño, el tiempo de secado, entre otros.

La ponderación usada para elaborar la matriz de decisión se lo considera de la siguiente manera:

- (4) Muy bueno
- (3) Bueno
- (2) Regular
- (1) Malo

Tabla 4 Matriz de decisión

	Secador natural 	Secador de plataforma a gas. 	Secador al vacío 
Costo de fabricación	2	2	1
Costo de operación	2	2	3
Tiempo de secado	1	2	4
mantenimiento	3	3	3
Total	8	9	11

Fuente: Autores, 2015

La ponderación favorece al secador al vacío por costos de operación y tiempo de secado, debido a que este tipo de sistemas seca en menos de la mitad del tiempo que secarían en otro tipo de sistema la misma cantidad de cacao; ver tabla 4.

Los principales componentes del secador de cacao al vacío son:

1. Paletas
2. Bomba de vacío
3. Motor eléctrico
4. Cámara de secado (cilindro)
5. Eje
6. Resistencias eléctrica

Se sabe que la capacidad de la cámara de secado debe ser para una tonelada de cacao, con lo que se puede deducir el área aproximada del secador.

Cacao.

C: 1 ton.

ρ : 775 Kg/m³ (grano fermentado)

$$\rho = m/v \text{ (ec. 7)}$$

$$v = m/\rho$$

Donde:

$$v = 1,29 [m^3]$$

Con el valor del volumen ocupado por la cantidad de cacao seleccionada, se procede a determinar brevemente las dimensiones que tentativamente tendría la cámara de secado:

$$v = AxL \text{ (ec. 8)}$$

$$A = \pi r^2$$

$$H = 0,5 [m]$$

Donde:

$$A = v/L$$

$$\pi r^2 = v/L$$

$$r^2 = v/Lx\pi$$

$$r = \sqrt{v/Lx\pi}$$

$$r = 0,90 [m]$$

Con las siguientes dimensiones para el diseño de la cámara de secado:

$$L = 1,20 [m]$$

$$D_0 = 1,80 [m]$$

Se da una sobre medida con la finalidad de dejar una holgura entre las paletas y las paredes del cilindro.

Se define de manera previa una longitud para las paletas que van a estar soldadas al eje:

$$K = 0,50 [m]$$

El espesor del cilindro estará dado según el diseño mecánico, el mismo que será realizado mediante la norma ASME VIII (diseño de tanques a presión).

La selección del motor que impulsará el eje en el interior de la cámara de secado, será seleccionado según las condiciones mecánicas que se presente basados en los siguientes parámetros.

- Potencia requerida
- Par torsión
- Inercia
- Carga aplicada

2.6. Cálculos mecánicos

2.6.1. Dimensionamiento de la cámara de secado

La cámara de secado es un recipiente sometido a una presión que actúa externamente; para ello, se hace uso de las normas que indican los pasos y consideraciones a tomar para el diseño de este tipo de recipientes.

La normativa ASME en la sección VIII, división 1, nos brinda la información requerida para el cálculo y diseño de los recipientes sometidos a presión externa.

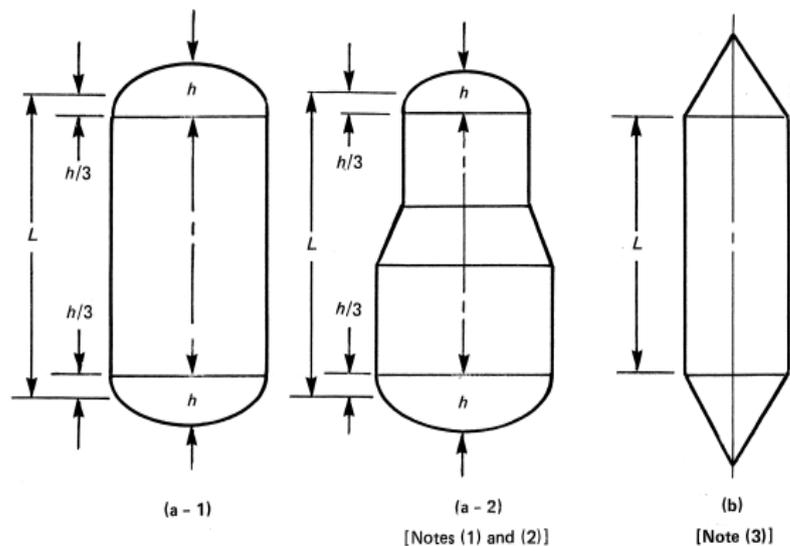


Figura 2.6.1 Representación esquemática de líneas de apoyo para el diseño de recipientes cilíndricos expuestos a presiones externas

Fuente: ASME, sección VIII, división 1, 2001

Tomando los valores obtenidos en la sección 2.5 de este documento, procedemos a indicar los pasos a seguir para el diseño del tanque sometido a presión otorgados por el código ASME VIII, división 1.

Datos iniciales:

D_0 [mm]

L [mm]

1. Empezamos asumiendo un valor de “ t ” y determinamos los radios “ L/D_0 ” y “ D_0/t ”
2. Ingresamos a la figura 5.1 que corresponde a la subparte 3 de la sección II, parte D (Anexo 1); en el valor de “ L/D_0 ” determinado en el primer paso, para valores de $L/D_0 > 50$, ingresar en la carta con el valor de $L/D_0 = 50$, y para valores de $L/D_0 < 0,05$, ingresar en la carta con el valor de $L/D_0 = 0,05$
3. Moverse horizontalmente a la línea de “ D_0/t ” determinado en el paso 1, desde este punto de intersección moverse verticalmente hacia abajo para determinar el valor del “factor A”
4. Usando el valor de “A” calculado en el tercer paso, ingresar en la figura 5.2 de los materiales aplicables en la subparte 3 de la sección II, parte D

(Anexo 1) para el material en cuestión. Ir verticalmente a una intersección con la línea de materiales/temperatura para la temperatura de diseño

5. La resultante obtenida a partir de la intersección en el paso 4, moverse horizontalmente a la derecha y tomar el valor del “factor B”
6. Usando el “factor B”, calcular el valor de la máxima presión de trabajo admisible “Pa” usando la siguiente formula:

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} [KPa] \text{ (ec. 9)}$$

7. Para valores de “A” dirigiéndose a la izquierda de la línea material/temperatura, el valor de “Pa” puede calcularse utilizando la siguiente formula:

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} [KPa] \text{ (ec. 10)}$$

8. Se compara el valor calculado de Pa en el paso 6 o 7 con “P”. si “Pa” es menor que “P”, se selecciona un valor mayor para “t” y repetir el proceso de diseño hasta obtener un valor de “Pa” igual o mayor que “P”.

2.6.2. Dimensionamiento de paletas y eje

2.6.2.1. Diseño de paletas

Para definir el material de las paletas, así como los esfuerzos a los que va a estar sometida, es importante poder precisar las fuerzas que actúan en las mismas.

Para la fuerza resultante aplicada sobre las paletas, se ha modelado a las mismas como una superficie sumergida, debido a que el material a más de apoyar su peso sobre la superficie, ejerce también una presión sobre esta.

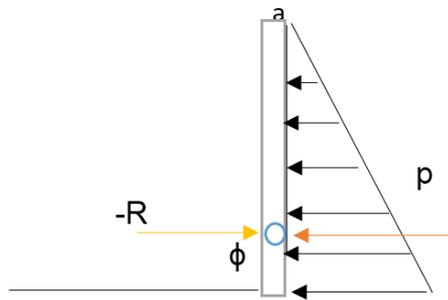


Figura 2.6.2.1.1 Diagrama de cuerpo libre para una paleta superior sometida a presión

Fuente: Ferdinand P. Beer, 2007

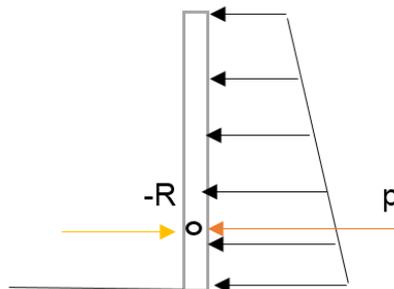


Figura 2.6.2.1.2 Diagrama de cuerpo libre para una paleta inferior sometida a presión

Fuente: Ferdinand P. Beer, 2007

En los diagramas 2.6.2.1.1 y 2.6.2.1.2, “p” es la fuerza ejercida por el cacao y -R es la resultante igual y opuesta a las fuerzas ejercidas por el cacao en la superficie.

Las ecuaciones para el cálculo de estas fuerzas son las siguientes:

$$p = \rho * g * \bar{y} * l * h [N] \text{ (ec. 11)}$$

Donde:

l : longitud de las paletas [m]

h : altura de las paletas [m]

ρ : densidad del cacao [N/m^3]

La resultante viene dada por la siguiente configuración:

$$\Sigma f=0$$

$$-R = p [N] \text{ (ec. 12)}$$

Luego de haber definido la fuerza, procedemos a calcular los esfuerzos a los que serán sometidas; para realizar el diseño de las paletas, modelaremos a estas como una viga empotrada:



Figura 2.6.2.1.3 Modelado de las paletas para diseño de las mismas

Fuente: Autores, 2016

El esfuerzo aplicado en la paleta es de flexión pura; previamente se definió el ancho de las mismas, por lo que, para corroborar este valor haremos uso de “La Teoría de Mohr Modificada”.

Para el uso de esta teoría, se define el esfuerzo de flexión normal y el esfuerzo cortante por torsión:

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{(Fl)c}{I} [\text{KPa}] \text{ (ec. 13)}$$

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = \frac{(Fa)r}{J} [\text{KPa}] \text{ (ec. 14)}$$

Luego se procede a calcular el esfuerzo cortante máximo y los esfuerzos principales:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} [\text{KPa}] \text{ (ec. 15)}$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} + \tau_{m\acute{a}x} [\text{KPa}] \text{ (ec. 16)}$$

2.6.2.2. Diseño del eje

El eje lleva acoplado 4 paletas, las mismas que generan un momento de torsión (torque) en este; el torque se expresa por medio de la ecuación:

$$T = F * r \text{ [Nm] (ec. 20)}$$

Donde:

$$F = -R$$

$r = \text{ancho del aspa}$

Este torque es el generado por una paleta; para obtener el torque total generado por las paletas, se debe multiplicar ese torque por el número de paletas. Consecuentemente se puede obtener a su vez la potencia mínima requerida por el eje, la cual viene expresada por:

$$P = T * \omega \text{ [Hp] (ec. 21)}$$

Donde ω es la velocidad angular a la cual está girando el eje.

Para efecto del diseño del eje de transmisión se procede a definir un diagrama de cuerpo libre:

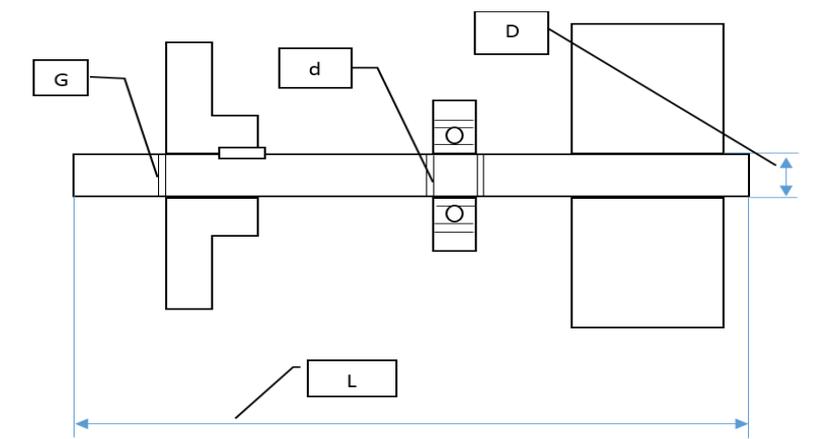


Figura 2.6.2.2.1 Esquema del conjunto eje-paletas

Fuente: Autores, 2016

Para su cálculo se empieza realizando algunas asunciones:

Diámetro mayor del eje (D) [mm]

Diámetro menor del eje (d) [mm]

Radio del entalle (J) [mm]

Longitud (L) [m]

Material: Acero AISI 1020 rolado en frio

Las propiedades de este acero como “la resistencia última” y “la resistencia a la fluencia” que serán usadas en las ecuaciones se tomarán de la tabla 39 mostrada en el anexo 3.

La ecuación a usar para el diseño del eje de transmisión obedece al criterio de “ED-Goodman” y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f * M_a)^2 + 3(K_{fs} * T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f * M_m)^2 + 3(K_{fs} * T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \text{ (ec. 22)}$$

Donde:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \text{ (ec. 23)}$$

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1) \text{ (ec. 24)}$$

Los valores de q y $q_{cortante}$ se proceden a obtener de la figura 7.3 presentada en el anexo 3; de igual manera, los valores de K_t y K_{ts} se pueden obtener de la figura 7.2 presentados en el anexo 3.

El valor de la resistencia última (S_{ut}) se lo puede obtener en la tabla 39 de materiales presentada en el anexo 3. Las variables M_m , M_a , T_m , T_a son los momentos de flexión medio y alternantes y los momentos de torsión medio y alternantes respectivamente.

El valor de S_e fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$S_e = C_{carga} * C_{tam} * C_{sup} * C_{temp} * C_{conf} * S_e \text{ [MPa]} \text{ (ec. 25)}$$

Donde:

Tabla 5 Factor de carga

Factor de carga	
Flexión	Ccarga: 1
Carga axial	Ccarga: 0,70
Torsión pura	Ccarga: 1

Fuente: Norton, 2011

Tabla 6 Factor de tamaño

Factor de tamaño	
Para $d \leq 0,3$ in (8mm)	Ctamaño: 1
Para $0,3$ in $< d \leq 10$ in	Ctamaño: $0,869d^{-0,097}$
Para 8 mm $< d \leq 250$ mm	Ctamaño: $1,189d^{-0,097}$

Fuente: Norton, 2011

Tabla 7 factor de temperatura

Factor de temperatura	
Para $T \leq 450$ °C (840 °F)	Ctemperatura: 1
Para 450 °C $< T \leq 550$ °C	Ctemperatura: $1-0,0058(T-450)$
Para 840 °F $< d \leq 1020$ °F	Ctemperatura: $1-0,0032(T-840)$

Fuente: Norton, 2011

Tabla 4-4

Factores de confiabilidad
para $S_d = 0.08 \mu$

% de confiabilidad	C_{conf}
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Figura 2.6.2.2 Factor de confiabilidad

Fuente: Norton, 2011

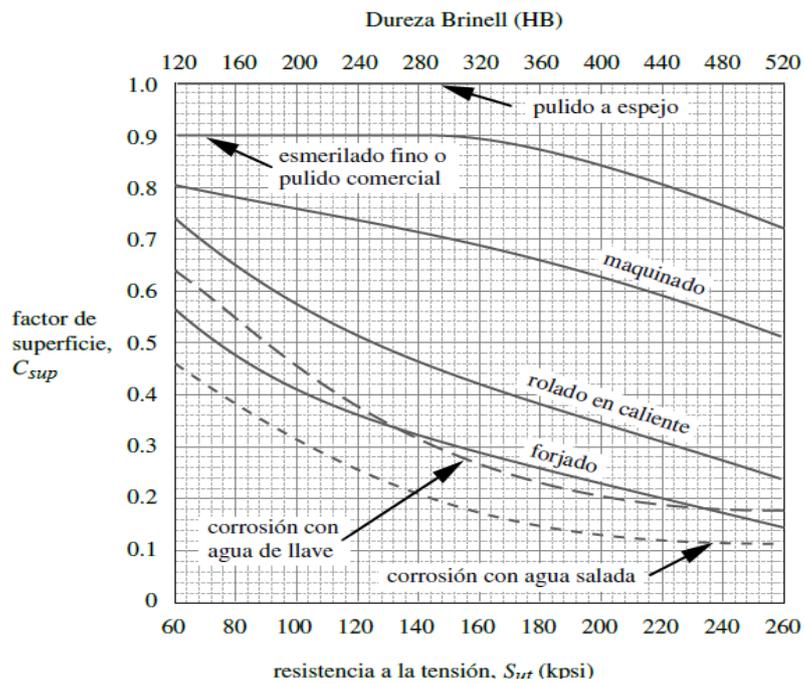


Figura 2.6.2.3 Factor de superficie

Fuente: Norton, 2011

Luego de haber realizado el respectivo cálculo, se podrá obtener un factor de seguridad, el cual para nuestro diseño hemos decidido que no sea inferior a 2, caso contrario se procede a iterar.

2.6.3. Diseño de las etapas del motor-reductor

Se conoce que el par-torsi3n necesario para poder mantener el cacao en movimiento, est3 dado por la ec. 21 de la secci3n 2.6.2.2 el mismo que fue de 2 Hp.

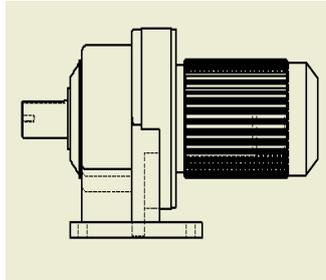


Figura 2.6.3.1 Motor el3ctrico requerido para la transmisi3n de potencia

Fuente: Autodesk Inventor

El motor debe poder transmitir esta potencia requerida, y a su vez debe poder pasar de las RPM nominales del motor el3ctrico a las requeridas por el eje de transmisi3n.

Esta secci3n estuvo enfocada en determinar el n3mero de etapas necesarias para la caja reductora, con el fin de ilustrar el n3mero de reducciones que deber3a tener la caja reductora del sistema de transmisi3n ya que en el mercado el proveedor define el tipo de caja reductora para las caracter3sticas brindadas para el motor.

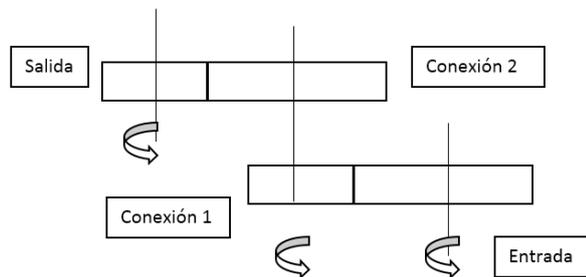


Figura 2.6.3.2 Esquema del tipo de reducci3n requerido en el sistema mec3nico para obtener la velocidad requerida a la salida

Fuente: Autores, 2016

ω_{salida} [RPM]

$\omega_{entrada}$ [RPM]

Conociendo las RPM de entrada y salida del sistema, se procedió a determinar la relación de velocidad por medio de la siguiente ecuación:

$$m_V = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}} \text{ [ec. 26]}$$

Al resultado se le sacó la raíz cuadrada, dando como resultado un valor mayor al que se puede obtener con una relación de 10:1 (límite de diseño), por lo que se procedió a sacar la raíz cúbica de la relación, teniendo como resultado un valor que estaba dentro de los límites de 10:1.

Luego se procedió a determinar el número de dientes necesarios para el engrane por medio de la siguiente relación:

$$\text{Relación de engranaje} \cdot \text{dientes del piñón} = \text{dientes del engrane}$$

Se empezó con un valor mínimo de dientes de piñón para obtener el número de dientes del engrane; el valor a escoger del número de dientes del engrane es el valor más cercano a un resultado entero.

2.6.4. Diseño de la compuerta de salida de material

La compuerta va a cumplir dos funciones tales como: permitir la salida del material después del haber secado y sellar el compartimento interior con el fin de mantener el vacío dentro de la cámara de secado.

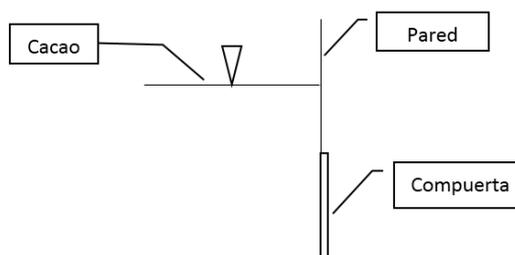


Figura 2.6.4.1 Esquema del modelado de la compuerta

Fuente: Autores, 2016

Se consideraron las cargas aplicadas en la compuerta bajo el siguiente diagrama:

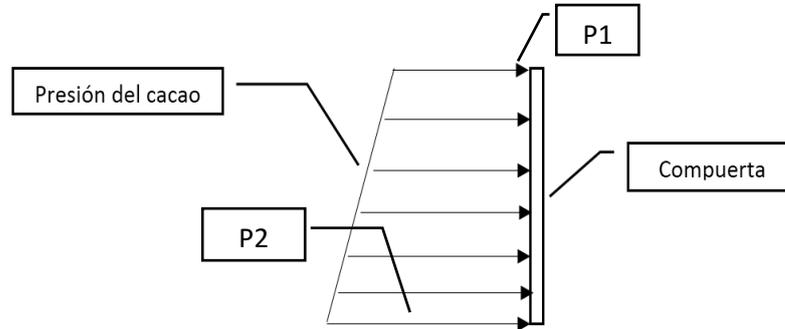


Figura 2.6.4.2 Esquema de la carga distribuida sobre la compuerta

Fuente: Autores, 2016

Las cargas aplicadas sobre la compuerta obedecen a las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = \rho * g * h * \bar{y} \text{ [N/m] (ec. 27)}$$

$$P_2 = \rho * g * h * \bar{y} \text{ [N/m] (ec. 28)}$$

La carga total del cacao aplicada sobre la compuerta resultó:

$$P_T = P_1 * L + \frac{1}{2} P_2 * L \text{ [N] (ec. 29)}$$

No hubo la necesidad de extender más allá el cálculo debido a que en el diagrama no está contemplado la presión atmosférica, la cual en magnitud es mucho mayor que la ejercida por el cacao. Tomando en cuenta la condición de vacío, y lo mencionado previamente sobre las cargas aplicadas, la compuerta llegó a tener los mismos parámetros que los definidos para la cámara de secado, ya que igualmente va a estar sometida a condiciones de vacío.

Se podrá observar con más detalle lo mencionado en la sección 3.4 de este documento.

2.7. Cálculo Termodinámico

2.7.1. Balance de masa

Basados en la metodología del análisis termodinámico, empezaremos haciendo un análisis de flujo másico y a su vez un balance de energía. Se especificó que la capacidad de secar cacao del equipo es de 1000 kg, y se pretende secarlo en 3 horas. Con estos datos podemos obtener el flujo másico de cacao húmedo con la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{c_i} = \frac{m_{total}}{t} \text{ [Kg/h]} \text{ (ec. 30)}$$

Donde:

\dot{m}_{c_i} : Flujo másico del cacao húmedo que entra, kg/s.

m_{total} : Masa total de cacao a secar, kg.

t : Tiempo total a secar, s.

En el siguiente grafico se analiza el balance de masa que existe en la cámara de secado.



Figura 2.7.1 Esquema del balance de masa en la cámara de secado

Fuente: Autores, 2016

Se sabe que el cacao es proveniente del cantón Junín de la provincia de Manabí, con una humedad de 30% bh aproximadamente, lo cual nos indica que el cacao está compuesto de un 30% de agua y un 70% de sólido seco, y se pretende que el porcentaje final de humedad sea de 8%. Dicho esto se puede calcular el flujo de vapor de agua se utilizando la siguiente relación:

$$\dot{m}_{c_i} = \dot{m}_{c_o} + \dot{m}_v \text{ [Kg/h]} \text{ [ec. 31]}$$

Donde:

\dot{m}_{c_i} : Flujo de cacao húmedo, kg/s.

\dot{m}_{c_o} : Flujo de cacao seco, kg/s.

\dot{m}_v : Flujo de vapor, kg/s.

Para encontrar el flujo de cacao seco, se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{c_o} = \frac{(m_{total} * X_f) + m_{cs}}{t} \text{ [Kg/h]} \text{ (ec. 32)}$$

Donde:

X_f : Porcentaje de humedad a la salida del cacao, %.

m_{cs} : Masa de cacao seco (sin contenido de agua), kg.

Este valor de flujo de vapor de agua será de mucha utilidad para los cálculos termodinámicos y de selección de la bomba de vacío.

2.7.2. Modelo del secado de cacao

2.7.2.1. Cálculo de calor requerido para el secado

Para el cálculo de flujo de energía hacemos consideraciones que nos serán de gran utilidad al momento de hacer un modelado, y saber que ecuaciones se deben usar:

1. La cámara de secado tiene una temperatura interior mayor a la del cacao.
2. Existe aire circundante cuya temperatura es mayor a la del cacao
3. Existe una fuente de calor radiante
4. El cacao va a estar en continuo contacto con las paletas que se mantienen en movimiento.

Bajo estas consideraciones, debemos tener en cuenta que a pesar de que la superficie interna de la cámara de secado tiene mayor temperatura que la del cacao, el grano no mantiene un contacto estable con el mismo, y en la transferencia de calor, el tiempo de contacto es crucial para permitir la transferencia.

El aire circundante permite una transferencia de calor por convección, ya que la cámara de secado no cuenta con una fuente externa de flujo de aire.

El calor radiante lo va a generar las resistencias térmicas que van a ser instaladas en el interior de la cámara de secado

El cacao ingresa a la cámara de secado a temperatura ambiente y con un porcentaje de humedad del 30%.

Tomando estas consideraciones, el calor que requiere el cacao para poder secarse esta dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{cacao} = \Delta\dot{m}_w * h_{fg} + \dot{m}_{cacao} * Cp_{cacao} * (T_{out} - T_{in}) \text{ [W] (ec. 33)}$$

Donde:

\dot{Q}_{cacao} : Calor requerido para secar el cacao, W.

$\Delta\dot{m}_w$: Flujo másico de evaporización del agua, kg/s.

h_{fg} : Calor latente de evaporización, kJ/kg.

\dot{m}_{cacao} : Flujo másico de cacao, kg/s.

Cp_{cacao} : Calor específico del cacao, kJ/kg-K.

T_{out} : Temperatura de los granos de cacao a la salida, °C.

T_{in} : Temperatura de los granos de cacao a la entrada, °C.

Las propiedades de calor latente de evaporización del agua deben estar dadas a una temperatura de saturación de 70 °C, ya que es la temperatura de saturación que se estima llegar, disminuyendo la presión hasta la presión de saturación del agua a esa temperatura.

2.7.2.2. Pérdidas de calor

Parte del calor entregado por la fuente de energía se pierde por las paredes del tanque por conducción. Este calor se debe determinar por medio de resistencias térmicas como se muestra en la figura.

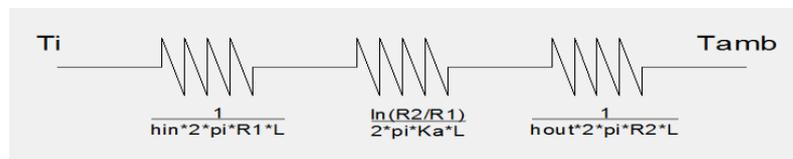


Figura 2.7.2.2.1 Esquema de resistencia para secador sin aislamiento térmico

Fuente: Incropera, 2004

Para el esquema 2.7.2.2.1 de resistencias no se consideró que el tanque tenga (Incropera, 2004) a aislamiento. En el caso de que contenga aislamiento, se debe considerar la resistencia térmica del material de aislamiento, debido a que es alta en comparación a las demás resistencias. Para la obtención del calor que se pierde se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{in} - T_{amb}}{\frac{1}{h_{in} * 2\pi * r_1 * L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 * \pi * k_a * L} + \frac{1}{h_{out} * 2 * \pi * r_2 * L}} \text{ [W] (ec. 34)}$$

Donde:

$\dot{Q}_{perdido}$: Calor que se pierde por las paredes del tanque, W.

T_{out} : Temperatura dentro del tanque, °C.

T_{amb} : Temperatura del ambiente exterior, °C.

r_1 : Radio interno del tanque, m.

r_2 : Radio externo del tanque, m.

k_t : Conductividad térmica del tanque, W/m - °C

L : Altura del tanque, m.

h_{in} : Coeficiente de convección interna, W/m² - °C

h_{in} : Coeficiente de convección externa, W/m² - °C

Se debe analizar también la pérdida de calor con aislamiento, si este calor perdido no tiene mucha diferencia no se coloca aislamiento. En la siguiente figura se presenta las resistencias térmicas considerando aislamiento.

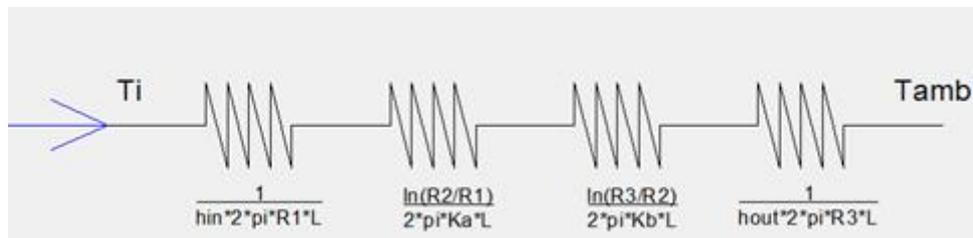


Figura 2.7.2.2 Esquema de resistencias para secador con aislamiento térmico

Fuente: Incropera, 2004

Para el cálculo de la pérdida de calor con aislamiento se usa la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{in} - T_{amb}}{\frac{1}{h_{in} * 2\pi * r_1 * L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 * \pi * k_t * L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 * \pi * k_a * L} + \frac{1}{h_{out} * 2 * \pi * r_3 * L}} \text{ [W] (ec. 35)}$$

Donde:

r_3 : Radio externo del tanque mas el espesor del aislamiento, m.

k_b : Conductividad térmica del tanque, W/m - °C

Para obtener el valor de calor perdido se debe encontrar los coeficientes de convección interna y externa. En el cálculo del coeficiente de convección interna se debe determinar si la transferencia es por convección natural, convección forzada, ó que los dos métodos actúan al mismo tiempo. Para esto se usa la siguiente relación:

$$a = \frac{Gr_D}{Re^2} \text{ (ec. 36)}$$

Donde:

a : Factor determinante del modo de transferencia de calor.

Gr_D : Número de Grashof.

Re : Número de Reynolds.

Se considera convección natural si $a \gg 1$, se considera convección forzada si $a \ll 1$, y se considera los dos modos de transferencia de calor si $a \approx 1$.

Para el cálculo del número de Grashof se usa la siguiente ecuación:

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \text{ (ec. 37)}$$

Donde:

g : Aceleración gravitacional, m/s².

β : Coeficiente de expansión volumétrica, 1/K.

T_s : Temperatura superficial del grano, °C.

T_∞ : Temperatura dentro de la cámara de secado, °C.

D : Diámetro del grano de cacao promedio, m.

ν : Viscosidad cinemática del aire, m²/s.

Para las propiedades del aire se deben calcular a temperatura promedio entre T_s y T_∞ , y a la presión dentro de la cámara de secado. La ecuación para obtener el valor de Re es la siguiente:

$$Re = \frac{4 \cdot m_{vgrano}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \text{ (ec. 38)}$$

Donde:

m_{vgrano} : Flujo másico del vapor de un grano, kg/s.

D : Diámetro del grano de cacao promedio, m.

μ : Viscosidad del vapor saturado de agua a T_∞ , kg/m-s.

Como el análisis de transferencia de calor es muy complejo considerando toda la masa de cacao que entra, el análisis se realizará para un solo grano, por lo que el flujo másico del grano se puede encontrar con la siguiente ecuación:

$$m_{vgrano} = \frac{m_g(X_o - X_f)}{t} \text{ [Kg/s] (ec. 39)}$$

Donde:

m_g : Masa promedio del grano de cacao, kg.

X_o : Porcentaje de humedad de entrada de cacao.

X_f : Porcentaje de humedad de salida de cacao.

t : Tiempo estimado de secado, s

El valor del factor a es de 0., por lo que se dice que se considera que existe solo convección forzada.

Para el cálculo de la constante de convección dentro del tanque se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_i = \frac{Nu \cdot k}{D} \text{ [W/m}^2\text{-K] (ec. 40)}$$

Donde:

h_i : Coeficiente de convección interno, W/m²-K.

N_u : Número de Nusselt.

k : Conductividad térmica del aire, W/m-K.

Para el cálculo del número de Nusselt se modela el grano como una esfera y se utiliza la siguiente fórmula:

$$\overline{N_{uD}} = 2 + \frac{0.589Ra^{1/6}}{[1+(0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \text{ (ec. 41)}$$

Donde:

$\overline{N_{uD}}$: Número de Nusselt promedio.

Ra : Número de Rayleigh.

Pr : Número de Prandtl.

El número de Rayleigh se lo obtiene con la siguiente ecuación:

$$Ra = Gr_D * Pr_{air} \text{ (ec. 42)}$$

Donde:

Gr_D : Número de Grashof.

Pr_{air} : Número de Prandtl del aire.

Todas las propiedades del aire deben ser evaluadas a T=70 °C y P=31.18 KPa, que son la temperatura y presión de saturación del agua dentro de la cámara de secado.

Con el valor obtenido del número de Nusselt, del coeficiente de conductividad térmica del vapor de agua, y del diámetro del grano de cacao, se determina el valor del coeficiente de convección interno.

Para el cálculo del coeficiente de convección externo se determina el número de Reynolds en el exterior del tanque, por lo que usamos la siguiente expresión:

$$Re_{ext} = \frac{V \cdot D}{\nu} \text{ (ec. 43)}$$

Donde:

Re_{ext} : Número de Reynolds exterior.

V : Velocidad promedio del aire, m/s.

D : Diámetro exterior del tanque.

Para el cálculo del número de Nusselt se utiliza la correlación de Zhukauskas [16], la cual es:

$$\overline{Nu_{D_{ext}}} = C * Re_{ext}^m * Pr^n * \left[\frac{Pr_{air}}{Pr_{air_s}} \right]^{0.25} \text{ (ec. 44)}$$

Donde:

$\overline{Nu_{D_{ext}}}$: Número de Nusselt en el exterior del secador.

C : Constante de la ecuación.

m : Constante de la ecuación.

n : Constante de la ecuación.

Pr_{air} : Número de Prandtl.

Pr_{air_s} : Número de Prandtl a temperatura superficial del secador.

Todas las propiedades son evaluadas a temperatura ambiental, excepto Pr_s , que es evaluada la temperatura superficial del secador. Para la obtención de los valores de las constantes, se utiliza la tabla 8:

Tabla 8 Constante para la ecuación 44

Re_D	C	m
1-40	0.75	0.4
40-1000	0.51	0.5
$10^3-2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5-10^6$	0.076	0.7

Fuente: Incropera, 2004

El valor de n depende del número de Prandtl, si $Pr_{air} \leq 10$ entonces $n=0.37$, si $Pr_{air} > 10$ entonces $n=0.36$.

Entonces para el cálculo del coeficiente de convección externo se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_{out} = \frac{\overline{NuD_{ext}} * k_{air}}{D_t} \text{ [W/m}^2\text{-K]} \text{ (ec. 45)}$$

Donde:

h_{out} : Coeficiente de convección externa, W/m²-K.

k_{air} : Coeficiente de conductividad térmica, W/m-K.

D_t : Diámetro exterior del tanque, m.

Con todos estos valores podemos encontrar el calor que se pierde por las paredes de la cámara de secado o tanque.

2.7.2.3. Calor total entregado al sistema

El flujo de calor que se debe suministrar es la suma del calor requerido por el cacao para secarse y el flujo de calor por pérdidas, el mismo que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{cacao} + \dot{Q}_{perdido} \text{ [W/s]} \text{ (ec. 46)}$$

Para calcular el valor óhmico de las resistencias eléctricas se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_f}{I_f} \text{ [\Omega]} \text{ (ec. 47)}$$

Donde:

R : Valor óhmico de la resistencia, Ω .

I_f : Corriente de trabajo de la resistencia, A.

V_f : Voltaje de trabajo de la resistencia (240 V), V.

Para calcular el valor de la corriente utilizamos la siguiente ecuación:

$$I_f = \frac{P'}{V_f} [A] \text{ (ec. 48)}$$

Donde:

P' : Potencia de la resistencia, W.

Para mejor distribución del calor, es necesario colocar varias resistencias debido a que es mucha potencia entregada al sistema para que una resistencia pueda otorgarlo, por lo que el flujo de calor requerido debe ser dividido para el número de resistencias que desean colocar.

2.7.2.4. Tiempo de secado

Con el fin de aumentar la producción, se decidió que el proceso de secado se dé en no más de cuatro horas. El cálculo del tiempo de secado, se lo obtuvo mediante la ecuación de tiempo de secado de vacío del libro Drying Technologies in Food Processing. Xiao Dong Chen, Arun S. Mujumdar. (2009), el cual es:

$$t_{\text{secado}} = \frac{L^2}{8k_d} \frac{h_{fg}}{(T_f - T_s)} \left[\frac{4k_d(X_o - X)}{Lh} + \frac{(X_o - X)^2}{(X_o - X_e)} \right] [s] \text{ (ec. 49)}$$

Donde:

t_{secado} : Tiempo de secado del producto, s.

L : Espesor del producto, m.

k_d : Conductividad térmica del grano seco, W/m-k.

h_{fg} : Calor latente de vaporización del agua, KJ/kg.

T_f : Temperatura dentro del tanque ($T=70^\circ\text{C}$), $^\circ\text{C}$.

T_s : Temperatura superficial del cacao húmedo, $^\circ\text{C}$.

h : Coeficiente de convección total W/m²-k.

X_o : Contenido de agua inicial, kg agua/kg cacao seco.

X : Contenido de agua, kg agua/kg cacao seco.

X_e : Contenido de agua en equilibrio, kg agua/kg cacao seco

Los valores de X_o y X no corresponden a los valores de porcentaje de humedad. Estos valores se lo obtienen con la siguiente fórmula:

$$X_o = \frac{m_{v_{\text{inicial}}}}{m_s} [\%] \text{ (ec. 50)}$$

$$X = \frac{m_v}{m_s} [\%] \text{ (ec. 51)}$$

Donde:

$m_{v_{\text{inicial}}}$: Masa de vapor inicial, kg.

- m_s : Masa de solido seco, kg.
 m_v : Masa de vapor final, kg.

La radiación juega un papel muy importante en este cálculo, debido a que parte del calor que recibe el grano proviene de radiación de las resistencias eléctricas, además que la fórmula de tiempo requiere un coeficiente conectivo total, por lo que es necesario el valor del coeficiente de convección de radiación, que se obtiene con la siguiente fórmula:

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(T_\alpha + T_s)(T_\alpha^2 + T_s^2) \text{ [W/m}^2\text{-K]} \text{ (ec. 52)}$$

Donde:

- h_{rad} : Coeficiente de convección de radiación, W/m²-K.
 ϵ : Emisividad del material de la resistencia.
 σ : Constante de Boltzmann, W/m²-K⁴.

El coeficiente total de convección está dado por la suma del coeficiente de convección natural y el coeficiente de convección por radiación, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$h_{total} = h_{in} + h_{rad} \text{ [W/m}^2\text{-K]} \text{ (ec. 53)}$$

2.7.3. Selección de la bomba de vacío

Para la selección de la bomba de vacío haremos uso de ciertas condiciones térmicas como lo son la que mencionamos a continuación:

C: capacidad máxima de carga

X_i : humedad inicial del grano (post-fermentado)

X_o : humedad final del grano (post-secado)

M_{ai} : masa inicial de agua

M_{ao} : masa final de agua

M_{vr} : masa de vapor de agua a remover

$$C = 1000 \text{ [kg]}$$

$$X_i = 30 \text{ [%]}$$

$$X_o = 8 \text{ [%]}$$

$$M_{a_i} = Xi(C)[Kg] \text{ (ec. 54)}$$

$$M_{a_o} = Xo(C) [Kg] \text{ (ec. 55)}$$

$$M_{v_r} = M_{a_i} - M_{a_o} [Kg] \text{ (ec. 56)}$$

Con este dato, se procede a tomar los datos de saturación del vapor agua; para ello haremos uso del texto de termodinámica, en donde encontramos los siguientes datos de saturación:

De los datos observados, se hará uso del volumen específico para proseguir con los respectivos cálculos expresados a continuación:

$$V = M_{v_r}/\rho [m^3] \text{ (ec. 57)}$$

$$\dot{V} = V/t [m^3/h] \text{ (ec. 58)}$$

$$\ddot{V} = \dot{V} \times 0,5885 [cfm] \text{ (ec. 59)}$$

$$hp = \ddot{V} * P \text{ (ec. 60)}$$

Según se puede apreciar, esta es la característica del tipo de bomba de vacío requerida para nuestro proceso de secado.

2.7.4. Selección de la fuente de energía

Para la selección de la fuente de calor, se utilizarán tres tipos de fuentes de calor; la primera que es aire calentado por medio de un quemador, la segunda que es usando vapor súper calentado y la tercera que es por medio de resistencias eléctricas; las tres consideran una fuente de calor distinta entre sí.

- Aire caliente: para calentar aire que pase a la cámara de secado, se debe hacer uso de un quemador muy comúnmente, el mismo que usa combustible para el proceso de calentamiento de aire
- Vapor súper calentado: para obtener vapor súper calentado que permita secar el cacao, es necesario usar una caldera, la misma que usa combustible para poder evaporar el agua contenida en su interior.
- Resistencias eléctricas: las resistencias eléctricas son elaboradas a base de un cable conductor, por medio del cual va a circular una corriente la

misma que genera calor debido al calentamiento del material del cual está hecho el alambre

A continuación se muestra una matriz de decisión que permite definir el tipo de fuente de calor más óptimo. Para ello se definen las ponderaciones de la siguiente manera. Ver tabla 9.

- (4) muy bueno
- (3) bueno
- (2) regular
- (1) malo

Tabla 9 Matriz de decisión para el tipo de fuente de calor

	Aire Caliente 	Vapor 	Resistencias 
Costo/fabricación	3	2	4
Costo/operación	3	2	4
Tiempo/respuesta	3	2	4
mantenimiento	3	2	4
repuestos	2	3	4
Total	14	11	20

Fuente: Autores, 2016

CAPITULO 3

3. Resultados

3.1. Cálculos mecánicos

El material seleccionado para la construcción de la cámara de secado y el de las paletas es acero inoxidable tipo 304 laminado en frío, debido a que presenta mejores propiedades mecánicas, y se lo puede encontrar localmente. Influye también el hecho de que se este material es resistente a la corrosión.

Para el eje de transmisión se usó acero AISI 1020 laminado en frío.

3.2. Diseño de la cámara de secado

Para el diseño de la cámara de secado fue necesario hacer iteraciones, debido a que se empezaba asumiendo el espesor de la plancha, así como su altura y diámetro.

Se seleccionó acero inoxidable debido a que este tiene mayor resistencia a la corrosión, así como también una mayor resistencia última y a la fluencia. Se seleccionó un espesor de plancha de 5 [mm] debido a que con este valor, se obtuvo una presión de trabajo ligeramente mayor a la presión externa de diseño, por debajo de este espesor, la presión de diseño reducía drásticamente, ubicando al diseño en una condición desfavorable según la norma. Ver tabla 33 del anexo 1

El procedimiento de los cálculos se los puede observar en el anexo 1.

Tabla 10 Dimensiones del secador

parámetro	cantidad	Unidad	Descripción
L	1,20	M	Altura de la cámara de secado
Do	1,90	M	Diámetro de la cámara de secado
T	5	Mm	Espesor de la plancha

Fuente: Autores, 2016

3.3. Diseño de las paletas

3.3.1. Paletas superiores

Para el diseño de las paletas, fue necesario realizar iteraciones empezando con valores para espesor de plancha de 10 [mm], 12 [mm] y 13 [mm], siendo 13 [mm], o su inmediato superior (según las medidas existentes en el mercado) el espesor adecuado, debido a que con esta medida se pudo obtener un factor de seguridad mayor a 2.

Como se puede observar en el Anexo 2, para un espesor de 12 [mm] se puede obtener un factor de seguridad $1,5 < N < 2$, lo cual no se considera mal diseño, no obstante se planteó que el mínimo factor de seguridad para el que se pretendía diseñar sería de 2 con el fin de ser un poco conservador.

Los detalles de los cálculos se los puede observar en el anexo 2.

Tabla 11 Parámetros para el diseño

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
H	0,25	M	Altura de paletas
Y	0,125	M	punto de aplicación de la carga
L	0,9	M	Longitud de las paletas
P	775	Kg/m ³	Densidad del cacao
G	9,8	m/s ²	Aceleración de la gravedad
P	213,6	MPa	Carga aplicada
Sut	1276	MPa	Resistencia última
In	0,046E-6	m ⁴	Inercia de las paletas
C	0,125	M	punto centro de la sección transversal

Fuente: Autores, 2016

Como se mencionó, el factor de seguridad obtenido en los cálculos fue de 2,4; esto nos indica que las paletas van a resistir los esfuerzos a los cuales van a estar sometidas. Los cálculos se encuentran detallados en el anexo 2.

Tabla 12 Resultados obtenidos del diseño de las paletas

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
e	13	Mm	Espesor de plancha
l	0,9	M	Ancho de las paletas
h	0,25	M	Altura de las paletas
N	2,4		Factor de seguridad

Fuente: Autores, 2016

3.3.2. Paletas inferiores

Para el diseño de las paletas inferiores, se consideró una carga previa de 1,7 [KN/m], debido a la columna de cacao que estaba por encima de su superficie libre, y en la parte inferior se hallaba aplicada otra fuerza de mayor magnitud, 3,42 [KN/m]; ambas formaban una carga distribuida de forma trapezoidal.

La carga total que resistían las paletas inferiores era de 478,4 [KN/m]; el cálculo fue de igual manera, un proceso iterativo. Se inició con un espesor de plancha superior al de la paleta superior hasta llegar a un espesor de plancha de 16 [mm] con un factor de seguridad de 2. Se consideró empezar con un espesor mayor debido a que estas paletas estaban sometidas a una presión mayor.

Los detalles del cálculo realizado se los puede observar en el anexo 2.

Tabla 13 Parámetros requeridos para el diseño de las paletas inferiores

Parámetros	Cantidad	unidades	Descripción
p1	1,7	KN/m	Altura de paletas
p2	3,42	KN/m	punto de aplicación de la carga
P	478,4	KN/m	Longitud de las paletas
L	0,9	M	Densidad del cacao
Sut	1276	MPa	Resistencia última
In	0,085E-6	m ⁴	Inercia de las paletas
c	0,125	M	Distancia al punto centro

Fuente: Autores, 2016

Tabla 14 Resultados obtenidos para las paletas inferiores

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
E	16	Mm	Espesor de plancha
L	0,9	M	Ancho de las paletas
H	0,25	M	Altura de las paletas
N	2		Factor de seguridad

Fuente: Autores, 2016

3.4. Diseño del eje de transmisión

El torque total aplicado por las cuatro paletas fue de 1536,48 [Nm], generando una potencia requerida por el eje de 2,6 [Hp] a 10 [RPM]. Bajo estas condiciones se realizaron dos cálculos de prueba, el primero con acero inoxidable tipo 304 laminado en frío por requerimientos de higiene, teniendo como resultado un diámetro mayor de 30,5 [mm], diámetro menor de 30 [mm] y un factor de seguridad de 2. El segundo fue con acero AISI 1020 laminado en frío por requerimientos de economía, teniendo como resultados un diámetro mayor de 47,5 [mm], diámetro menor de 47 [mm] y un factor de seguridad de 2,2.

Tabla 15 Parámetros requeridos para el cálculo del torque aplicado al eje

Parámetro	Cantidad	Unidades	Descripción
p1	213,6	N	Carga en paleta superior
p2	640	N	Carga en paleta inferior
R	0,9	M	Longitud de paletas
T	1536,48	Nm	Torque en el eje
Ω	12	RPM	Velocidad del eje
P	2,6	Hp	Potencia en el eje

Fuente: Autores, 2016

Tabla 16 Parámetros para determinar el diseño del eje de transmisión

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
D	47	Mm	Diámetro mayor del eje
D	46,5	Mm	Diámetro menor del eje
J	0,5	Mm	Radio de la muesca
L	1,10	M	Longitud del eje
Sut	365	MPa	Resistencia ultima
Sy	303	MPa	Resistencia a la fluencia
Kfs	1,56		Factor de concentración
Ka	0,94		Condición superficial
Kb	0,82		Factor de tamaño
Kc	0,59		Factor de carga
Kd	1,015		Factor de temperatura
Ke	0,814		Factor de confiabilidad
Se'	182,5	MPa	Resistencia a la fatiga
Se	79	MPa	Resistencia a la fatiga
Tm	1245,6	Nm	Par de torsión medio

Fuente: Norton, 2011

Tabla 17 Resultados obtenidos para el diseño del eje de transmisión en dos tipos de materiales

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
AISI 1020			Acero dulce para el eje
D	47,5	Mm	Diámetro menor del eje
L	1,10	M	Longitud del eje
N	2,2		Factor de seguridad
Tipo 304			Acero inoxidable para el eje
D	30	mm	Diámetro menor del eje
L	1,10	M	Longitud del eje
N	2		Factor de seguridad

Fuente: Autores, 2016

Se obtuvieron diferentes radios debido a las resistencias ultimas de cada material; era de esperarse un menor radio con el mismo factor de seguridad para el acero inoxidable tipo 304 laminado en frío debido a que la resistencia ultima de este material es tres veces mayor que el acero AISI 1020 rolado en frío.

3.5. Diseño de las etapas del motor reductor

Fueron 3 las etapas requeridas para lograr una reducción de 18:1, con piñones cuyo número de dientes es de 14, y engranes con 79 dientes. Para el cálculo fue necesario definir el ángulo de presión, ya que el mismo me brindaba el mínimo número de dientes para el piñón.

Se definió una relación de 18:1 debido a que en el mercado generalmente se encuentran motores con 1800 RPM.

Tabla 18 Parámetros utilizados en el cálculo de las etapas

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
ϕ	25	Grados	Ángulo de presión
Mv	180:1		Relación de velocidad
$\Omega_{entrada}$	1800	RPM	Velocidad del motor
Ω_{salida}	10	RPM	Velocidad de paletas

Fuente: Autores, 2016

Tabla 19 Descripción de la caja de reducción

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
N2	79		Número de dientes del engrane
N1	14		Número de dientes del piñón
E	3		Número de etapas

Fuente: Autores, 2016

Se puede deducir de la tabla 19 que las tres etapas de la caja reductora deberían tener tres engranes con 79 dientes así como tres piñones de 14 dientes; ambos, piñón y engrane vendrían a ser rectos, debido a su facilidad de construcción.

3.6. Diseño de la compuerta de salida del material

La presión ejercida por el cacao fue de 9696,5 Pa, la misma que resulta mucho menor a la presión exterior (presión atmosférica). El recipiente está sometido a condiciones de vacío; la compuerta al tener la función de sellar, se encuentra también sometida a condiciones de vacío, y para ello se definieron las siguientes dimensiones para la compuerta:

Tabla 20 Parámetros de diseño de la compuerta

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
A	0,5	M	Altura de la compuerta
A	0,5	M	Ancho de la compuerta
E	6	Mm	Espesor de la compuerta
Acero tipo 304			Acero inoxidable

Fuente: Autores, 2016

3.7. Calor requerido para el secado

En la siguiente tabla se presentan los datos de flujo de entrada y salida del cacao:

Tabla 21 Flujos de entrada y salida del grano

Flujo de producto	Entrada (30%)	Salida (8%)
Flujo sólidos seco (kg/s)	0.0648	0.0648
Flujo de agua (kg/s)	0.0278	0.0074
Flujo de cacao húmedo (kg/s)	0.0926	0.0722

Fuente: Autores, 2016

Estos datos servirán para los cálculos posteriores de los diferentes calores. El flujo másico del vapor de agua que la bomba extrae es la diferencia entre el flujo de agua, cual valor es 0.0204 kg/s. Para el cálculo del calor requerido se utilizan los datos que se presentan en la tabla 22.

El calor que el cacao requiere es de 47.53 kW. Pero el calor que debe entregar el sistema debe ser mayor por lo que existen pérdidas que deben ser calculadas.

Tabla 22 Datos para obtener el flujo de energía del cacao

Variable	Unidades	Valor	Descripción
\dot{m}_v	Kg/s	0.0204	Flujo másico de la salida del vapor de agua.
ΔH_{vap}	KJ/kg	2333.3	Calor latente de vaporización ($T_{sat}=70C$)
$\dot{m}_{cacao_{in}}$	Kg/s	0.0926	Flujo másico de cacao en la entrada
$C_{p_{cacao}}$	KJ/kg-C	2.541	Calor específico del cacao húmedo
T_{in}	°C	70	Temperatura de entrada del cacao
T_{out}	°C	25	Temperatura de salida del cacao

Fuente: Autores, 2016

3.8. Cálculo del coeficiente de convección dentro de la cámara.

Se analizó la transferencia de calor para un grano de cacao, por lo que resultó que la transferencia de calor es por convección natural, y el valor del coeficiente de convección interna es de $6.274 \text{ W/m}^2\text{-K}$. Para el cálculo del valor del diámetro promedio del grano se consideró que todos los granos tienen el mismo tamaño y masa, y con la fórmula de densidad se obtuvo el volumen del grano y posteriormente el valor del diámetro del mismo, cual tiene un valor de $7.662\text{E-}3\text{m}$. En la siguiente tabla se presentan los datos que se requirieron para el cálculo del valor del coeficiente de convección dentro de la cámara.

Tabla 23 Datos para obtener el coeficiente de convección dentro de la cámara de secado

Variable	Unidades	Valor	Descripción
ρ_{cacao}	Kg/m ³	775	Densidad del cacao húmedo
$m_{\text{cacao/grano}}$	kg	2.2	Masa del cacao en grano
T_{prom}	°C	47.5	Temperatura promedio entre T_s y T_a
T_s	°C	25	Temperatura superficial del grano
g	m/s ²	9.8	Aceleración gravitacional
D	m	0.0153	Diámetro promedio del grano
ν	m ² /s	$5.76\text{E-}5$	Viscosidad cinemática del aire a T_a y P_a
k	W/m-K	0.0279	Coefficiente de conductividad térmica del aire
Pr	-----	0.7043	Número de Prandtl

Fuente: Incropera, 2004

3.9. Pérdidas de calor

Primera mente en este cálculo se consideró que el tanque estaba sin aislamiento, por lo que el calor que se pierde da un valor de 1.087 kW . El valor es muy pequeño comparado con el flujo de calor que se requiere para secar el producto, por ese motivo no se considera que el tanque deba tener aislamiento. El cálculo del coeficiente de convección externo resultó un valor de $6.977 \text{ W/m}^2\text{-K}$. El valor de la temperatura superficial dio como resultado 50 °C . Los datos que se utilizaron para el cálculo de las pérdidas de calor se presentan en la tabla 24.

Tabla 24 Datos para obtener el flujo de calor por pérdidas

Variable	Unidades	Valor	Descripción
V	m/s	3.086	Velocidad promedio en el exterior
Dt	M	1.9	Diámetro exterior del tanque
v	M ² /s	1.59E-5	Viscosidad cinemática del aire exterior
C	----	0.26	Constante de la ecuación del número de Nusselt
M	----	0.6	Constante de la ecuación del número de Nusselt
n	----	0.37	Constante de la ecuación del número de Nusselt
Pr_{airs}	----	0.7068	Número de Prandtl del aire exterior a T _{sup}
K_{air}	W/m-k	0.0265	Coficiente de conductividad térmica del aire exterior
Pr_{air}	----	0.7068	Número de Prandtl del aire exterior
T_{amb}	°C	28	Temperatura promedio del exterior
T_α	°C	70	Temperatura del interior del tanque

Fuente: Incropera, 2004

3.10. Cálculo del tiempo de secado

El cálculo del tiempo de secado se utilizó la ecuación mencionada en la metodología. Este valor nos dio de 2.5 horas, que se considera muy bueno para secar 1 tonelada de cacao, que por lo general las secadoras convencionales demoran entre 12 a 16 horas. Los datos para calcular este tiempo se presentan en la tabla 25:

Tabla 25 Datos para obtener el tiempo de secado

Variable	Unidades	Valor	Descripción
L	m	0.0153	Longitud total del grano
K_d	W/m-K	0.4237	Coficiente de conductividad térmica del cacao.
ΔH	kJ/jg	2333	Calor latente de vaporización T=70
ρ_s	kg/m ³	635	Densidad del cacao seco
T_f	°C	70	Temperatura dentro del tanque
T_s	°C	25	Temperatura de inicio del cacao
X_o	----	0.4286	Contenido de vapor de agua inicial
X_e	----	0.03	Contenido de vapor en equilibrio
X	----	0.1143	Contenido de vapor de salida
h_{total}	W/m ² -K	9.801	Coficiente de convección total dentro del tanque

Fuente: Incropera, 2004

3.11. Costos del secador al vacío.

Como ya se especificó, los principales componentes del secador al vacío son: Tanque a presión, bomba de vacío, motor eléctrico, eje con paletas, tuberías de conexión a la bomba de vacío, resistencias eléctricas, sistema de transmisión de potencia. Se determinó que el costo de mano de hora-hombre es de \$7.00, y para la construcción del equipo se necesitan 4 personas, trabajando 8 horas diarias por 4 semanas.

Los costos indirectos involucran costos de insumos para la fabricación d de discos de corte, electrodos de soldadura, guantes, cascos de protección, mascarillas, orejeras), también incluyen viáticos para la instalación del equipo.

Tabla 26 Costos de materiales y equipos

Ítem	Descripción material y equipo	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
1	Tanque a presión	1	u	4737.00	4737.00
2	Motor eléctrico 2hp	1	u	360.00	360.00
3	Eje con paletas	1	u	303.42	303.42
4	Bomba de vacío	1	u	2616.00	2616.00
5	Sistema de reducción	1	u	1243.00	1243.00
6	Instrumento de medición de presión	1	u	5.56	5.56
7	Termocupla	1	u	3.33	3.33
8	Sistema de control de temperatura	1	u	178.00	178.00
9	Sistema de control de presión	1	u	163.00	163.00
10	Resistencias eléctricas (6000 W)	8	u	300	2400.00
SUBTOTAL(\$)					12009.31
I.V.A. (12%)					1441.11
TOTAL (\$)					13450.42

Fuente: sistelec s.a., 2016

**Tabla 27
diseño de**

Costos de insumos, viáticos, transporte, seguros, capacitación.	Total (USD)
Insumos	530.00
Viáticos	200.00
Transporte	300.00
Seguros	525.00
Capacitación	600.00
TOTAL (USD)	2155.00

**Costos de
equipo**

Fuente: Autores, 2016

Tabla 28 Costos de mano de obra

Ítem	Descripción de mano de obra	Cantidad	Unidad	Unitario (USD/h)	Total (USD)
1	Mano de obra	720	Horas	7.00	5040

Fuente: Autores, 2016

Tabla 29 Costos indirectos del equipo e instalación

Rubro costo	Total (USD)
Material y equipos	13450.32
Mano de obra	5040.00
Costos indirectos	2155.00
TOTAL (USD)	20645.32

Fuente: sistelec s.a./autores, 2016

Considerando que la utilidad del secador es de 18%, entonces el equipo debe venderse con un valor:

$$Venta = \frac{\$ 20645.32}{(1 - .018)}$$
$$Venta = \$ 25177.22$$

Ese es el precio del secador para venta. Secadores convencionales que usan GLP, están por los \$25000, pero su tiempo de secado es mayor a 12 horas.

A continuación se presentan el diagrama de Gantt para la construcción del equipo:

3.12. Costos de secado

Para determinar el costo de secado, se tomó en cuenta la energía utilizada (energía eléctrica) y el costo del personal de trabajo por cada secada. Se requiere una persona para que pueda operar la máquina, y se estimó que el sueldo sería de 500 USD/mes. El mantenimiento involucra limpieza del tanque, limpieza de tuberías, limpieza del eje y paletas, por lo que se estimó que tendrá un valor de 200 USD/mes.

Tabla 30 Costo total de secado

Costos de energía eléctrica	Unidad	Cantidad
Consumo energía eléctrica por parte de las resistencias	kW-h	125
Consumo de energía eléctrica por parte de la bomba de vacío	kW-H	111.85
Consumo de energía eléctrica por parte del motor eléctrico	kW-h	3.73
Consumo total	kW-h	240.57
Costo de energía eléctrica	USD/kW-h	0.07
Costo total de energía	USD	16.84
Costo del personal	USD/h	2.60
Costo del total del personal	USD	6.51
Costo de mantenimiento	USD	1.04
COSTO TOTAL POR SECADA	USD	26,99

Fuente: Autores, 2016

El costo total por secar 1 tonelada de cacao fermentado, es de 24.39 dólares americanos. Por lo que en una jornada de trabajo de 8 horas, el costo de secado es de 73.17 dólares, secado 3.2 toneladas de cacao.

CAPITULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Los resultados obtenidos cumplen con las expectativas planteadas al inicio del proyecto, los cuales eran reducir el tiempo de secado y el consumo de energía.
- Los equipos y materiales utilizados para la construcción, han sido seleccionados de manera local.
- El secado al vacío no es muy utilizado para el cacao, por su alto costo, por lo que es proyectado más para medianas y grandes productores, o grandes exportadoras que requieran un aumento en su producción.
- Las pérdidas de calor no representan un excedente comparado con el calor generado por lo que no fue considerado el cálculo de aislamiento.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar pruebas para poder determinar el tipo de motor-reductor que se necesite, debido a que la rotación del cacao debe ser lenta.
- La temperatura de secado máxima del cacao es de 70 °C, por lo que se recomienda hacer uso de un sensor de temperatura con el fin de controlar el proceso de secado.
- Se recomienda poner un aviso de seguridad cerca del secador que indique a las personas el no arrimarse a la estructura, debido a que esta no posee un aislamiento.
- Se recomienda tener mucha precaución con la manipulación de punto de acceso y salida, ya que estos poseen sellos que permiten mantener el vacío dentro de la cámara de secado los cuales deben estar siempre en óptimas condiciones

Anexo I-Diseño del tanque

5. Diseño de la cámara de secado

Se conoce:

$$L = 1,20 \text{ [m]}$$

$$D_0 = 1,90 \text{ [mm]}$$

Se empieza asumiendo el espesor de la plancha:

$$t = 10 \text{ [mm]}$$

Se calculan los radios que nos serán de ayuda para ingresar en la carta geométrica de componentes bajo presión externa:

$$L / D_0 = 0,6$$

$$D_0/t = 190$$

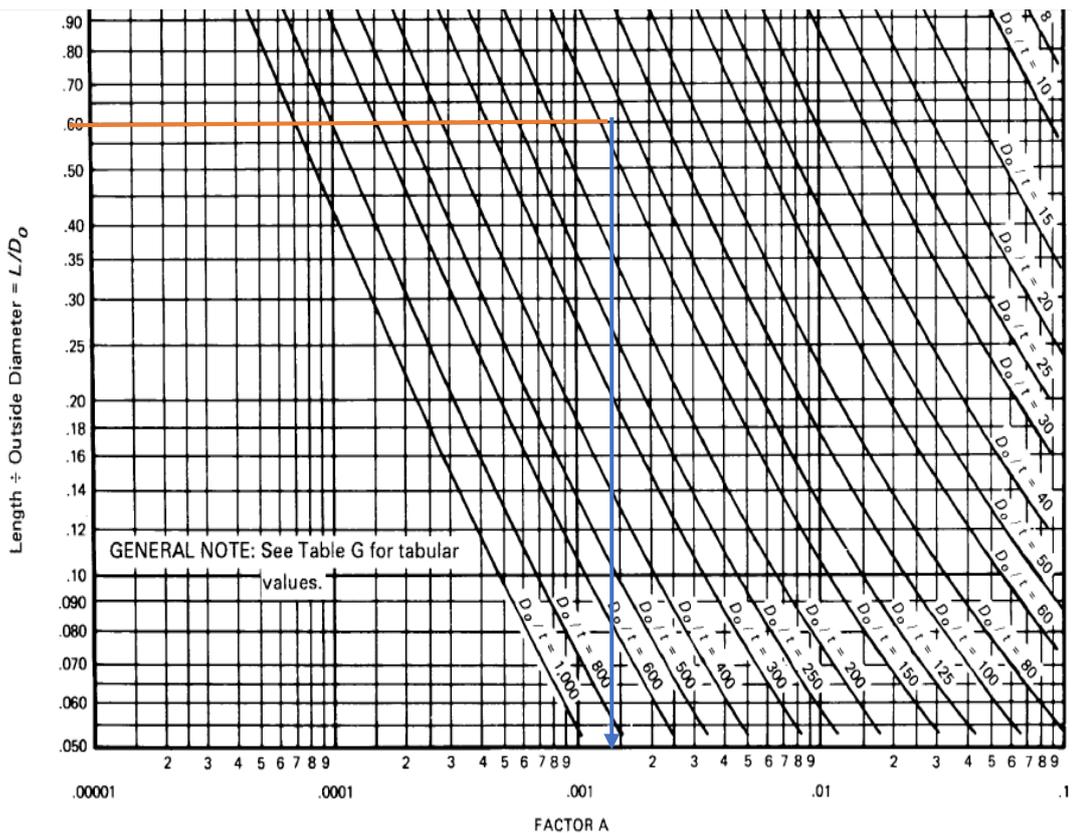


Figura 5.1 carta geométrica para componentes bajo presión externa para todos los materiales

Fuente: ASME Boiler and Pressure vessel Code, 2007

A = 9,001

El factor A nos permite determinar el factor B mediante la siguiente figura.

FIG. HA-1 CHART FOR DETERMINING SHELL THICKNESS OF COMPONENTS UNDER EXTERNAL PRESSURE WHEN CONSTRUCTED OF AUSTENITIC STEEL (18Cr-8Ni, Type 304) [Note (1)]

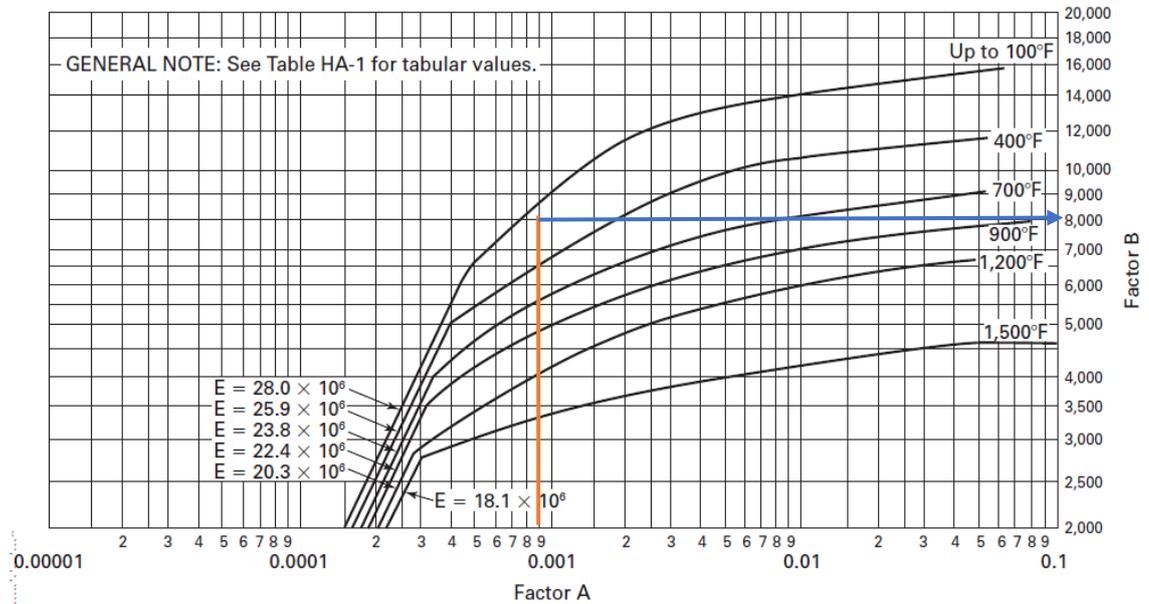


Figura 5.2 Carta para determinar el espesor del casco de los componentes bajo presión externa cuando se construyeron de acero austenítico tipo 304

Fuente: ASME Boiler and Pressure vessel Code, 2007

B = 8000

Con el valor de B se puede obtener la presión de trabajo:

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_0}{T}\right)}$$

$$P_a = \frac{4(8000)}{3(190)} = 56 [Psi]$$

La presión externa de diseño (P) es de 1 [atm]; la condición que se debe cumplir es la siguiente:

$$P_a \geq P$$

Bajo esta premisa podemos aducir que el espesor seleccionado es el adecuado, pero esto se puede optimizar con el fin de reducir costos.

Iteración 1

De aquí en adelante nos limitaremos solo a mostrar resultados.

Tabla 31 Resultados de la primera iteración para el diseño de la cámara de secado

Parámetros	Cantidad	Unidades
L	1,20	M
Do	1,90	M
t	8	Mm
L/ Do	0,6	adimensional
D0/t	237,5	adimensional
A	6,001	adimensional
B	6750	Psi
Pa	37,89	Psi
P	14,7	Psi

Fuente: Autores, 2016

Pa >>P

Iteración 2

Tabla 32 Resultado de la segunda iteración para el diseño de la cámara de secado

Parámetros	Cantidad	Unidades
L	1,20	M
Do	1,90	M
t	6	Mm
L/ Do	0,6	Adimensional
Do/t	316,7	Adimensional
A	4,501	Adimensional
B	6000	Psi
Pa	25	Psi
P	14,7	Psi

Fuente: Autores, 2016

Pa >>P

Iteración 3

Tabla 33 Resultado de la tercera iteración para el diseño de la cámara de secado

Parámetros	Cantidad	Unidades
L	1,20	M
Do	1,90	M
t	5	mm
L/ Do	0,6	Adimensional
D0/t	380	Adimensional
A	3,201	Adimensional
B	4850	Psi
Pa	17	Psi
P	14,7	Psi

Fuente: Autores, 2016

Pa>P

Anexo II-Diseño de Paletas

6. Diseño de paletas

6.1. Paletas superiores

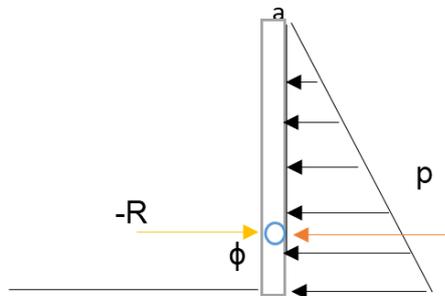


Figura 6.1.1 Distribución de la carga sobre las paletas superiores

Fuente: Ferdinand P. Beer, 2007

Empezamos determinando la magnitud de la presión ejercida sobre las paletas mediante la siguiente ecuación:

$$P = \rho * g * \bar{y} * l * h$$
$$P = 775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 0,125[m] * 0,90[m] * 0,25[m]$$
$$P = 213,6 [N]$$

Con la carga aplicada sobre las paletas, determinamos el esfuerzo que genera la carga; el tipo de esfuerzo que se aplica en el elemento es de flexión.

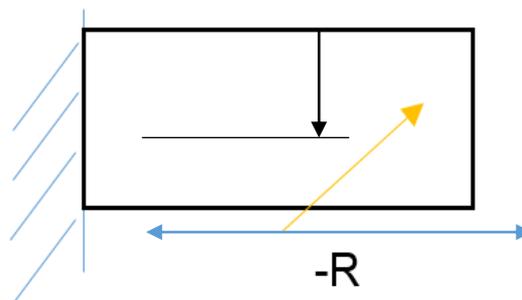


Figura 6.1.2 Esfuerzo aplicado sobre la superficie de la placa superior

Fuente: Autores, 2016

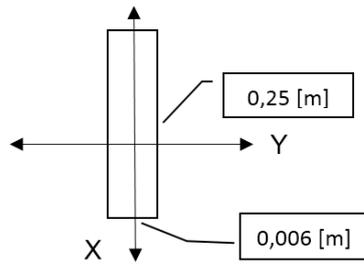


Figura 6.1.3 Sección transversal de las paletas superiores

Fuente: Autores, 2016

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{(Pl)c}{I} = \frac{213,6[N] * 0,9[m] * 0,125[m]}{\frac{1}{12} 0,25[m] * 0,006^3[m^3]}$$

$$\sigma_x = 5,33 [MPa]$$

Procedemos a determinar los esfuerzos principales, así como también el cortante máximo.

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{\left(\frac{5,33 \times 10^6 - 0}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\tau_{max} = 2,665 [MPa]$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} + \tau_{max} = \frac{5,33 \times 10^6 - 0}{2} + 2,66 \times 10^6$$

$$\sigma_1 = 5,33 [MPa]$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} = \frac{1276 [MPa]}{5340 [MPa]}$$

$$N = 0,2$$

Como podemos darnos cuenta, el factor de seguridad es inferior a uno, por lo que procedemos a iterar aumentando el espesor de la plancha.

De ahora en adelante se procede a mostrar las tablas de resultados pertinentes a cada una de las iteraciones.

Iteración 1

Luego de haber realizado el mismo procedimiento se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 34 Resultados obtenidos de la primera iteración para el dimensionamiento de las paletas superiores

Parámetros	Cantidad	Unidades
E	10	Mm
I	20,83E-9	m ⁴
σ_x	1152	MPa
ζ_{max}	576	MPa
σ_1	1152	MPa
σ_2	0	MPa
σ_3	0	MPa
Sut	1279	MPa
N	1,1	Adimensional

Fuente: Autores, 2016

Iteración 2

Tabla 35 Resultados obtenidos de la segunda iteración para el dimensionamiento de las paletas superiores

Parámetros	Cantidad	Unidades
e	12	Mm
I	36E-9	m ⁴
σ_x	666,6	MPa
ζ_{max}	333,3	MPa
σ_1	666,6	MPa
σ_2	0	MPa
σ_3	0	MPa
Sut	1279	MPa
N	1,9	Adimensional

Fuente: Autores, 2016

Iteración 3

Tabla 36 Resultados obtenidos de la tercera iteración para le dimensionamiento de las paletas superiores

Parámetros	Cantidad	Unidades
e	13	Mm
I	45,77E-9	m ⁴
σ_x	524,35	MPa
ζ_{max}	262,17	MPa
σ_1	524,35	MPa
σ_2	0	MPA
σ_3	0	MPA
Sut	1279	MPA
N	2,4	Adimensional

Fuente: Autores, 2016

Luego de haber realizado tres iteraciones, se puedo llegar a un resultado alentador, teniendo en cuenta el espesor de la plancha con respecto al factor de seguridad obtenido.

6.2. Paletas inferiores

Al igual que en las paletas superiores, en las paletas inferiores empezamos definiendo el tipo de cargas aplicadas en la superficie.

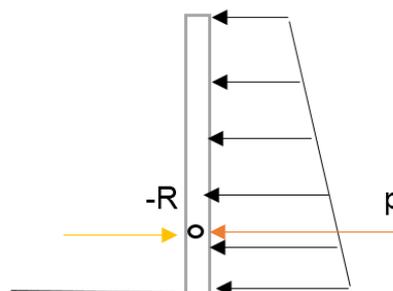


Figura 6.2.1 Diagrama de cargas aplicado en las paletas inferiores

Fuente: Ferdinand P. Beer, 2007

Cargas aplicadas sobre las paletas inferiores:

$$P_1 = \rho * g * h * \bar{y}$$

$$P_1 = 775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 0,25[m] * 0,25[m]$$

$$P_1 = 474,7 \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$P_2 = \rho * g * h * \bar{y}$$

$$P_2 = 775 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 0,5[m] * 0,375[m]$$

$$P_2 = 1424 \left[\frac{N}{m} \right]$$

La carga total aplicada sobre las paletas viene a ser representada por la carga trapezoidal distribuida sobre las paletas inferiores; este tipo de carga se compone de un rectángulo y un triángulo, cuyas áreas representan la carga aplicada por cada uno de los segmentos.

$$Pt = P_1 + P_2 = 474,7 \left[\frac{N}{m} \right] * 0,25[m] + 1424 \left[\frac{N}{m} \right] * 0,25[m]$$

$$Pt = 474,675 [N]$$

Al igual que en las paletas superiores, el tipo de esfuerzo que sentirían las paletas inferiores sería de flexión.



Figura 6.2.2 Esfuerzo aplicado sobre la superficie de la placa superior

Fuente: Autores, 2016

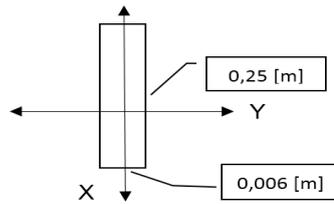


Figura 6.2.3 Sección transversal de las paletas superiores

Fuente: Autores, 2016

Empezamos los cálculos de esfuerzos asumiendo un espesor de paletas, el mismo que es superior al de la de las paletas superiores.

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{(Pl)c}{I} = \frac{474,67[N] * 0,9[m] * 0,125[m]}{\frac{1}{12} 0,25[m] * 0,014^3[m^3]}$$

$$\sigma_x = 934,128 [MPa]$$

Procedemos a determinar los esfuerzos principales, así como también el cortante máximo.

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{\left(\frac{934,128 \times 10^6 - 0}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\tau_{max} = 467,06 [MPa]$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} + \tau_{max} = \frac{5,33 \times 10^6 - 0}{2} + 2,66 \times 10^6$$

$$\sigma_1 = 934,128 [MPa]$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} = \frac{1276 [MPa]}{934,128 [MPa]}$$

$$N = 1,3$$

El factor de seguridad obtenido para el espesor de plancha seleccionado es superior a la unidad, pero no tiene confiabilidad; se desea que el factor de seguridad del diseño sea por lo menos de dos. Dicho esto, se procede a iterar.

Iteración 1

Tabla 37 Resultados obtenidos de la primera iteración para el dimensionamiento de las paletas inferiores

Parámetros	Cantidad	Unidades
e	15	Mm
I	70,31E-9	m ⁴
σ_x	759,49	MPa
ζ_{max}	379,75	MPa
σ_1	759,49	MPa
σ_2	0	MPa
σ_3	0	MPa
Sut	1279	MPa
N	1,6	Adimensional

Fuente: Autores, 2016

Iteración 2

Tabla 38 Resultados obtenidos de la segunda iteración para el dimensionamiento de las paletas inferiores

Parámetros	Cantidad	Unidades
e	16	Mm
I	85,33E-9	m ⁴
σ_x	625,78	MPa
ζ_{max}	312,89	MPa
σ_1	625,78	MPa
σ_2	0	MPa
σ_3	0	MPa
Sut	1279	MPa
N	2,04	Adimensional

Fuente: Autores, 2016

Anexo III-Diseño del eje de transmisión.

7. Diseño del eje de transmisión

Para el diseño del, empezamos determinando el momento de torsión aplicado por las paletas.

$$T = F * l$$

$$T_1 = 213,6[N] * 0,9[m]$$

$$T_1 = 192,24 [Nm]$$

$$T_2 = 474,67[N] * 0,9[m]$$

$$T_2 = 427,20 [Nm]$$

$$T_T = T_1 + T_2$$

$$T_T = 192,24[Nm] * 2 \text{ paletas} + 427,20[Nm] * 2 \text{ paletas}$$

$$T_T = 384,48[Nm] + 854,40[Nm]$$

$$T_T = 1238,88 [Nm]$$

Ahora se puede determinar la potencia transmitida por el eje:

$$P = T * \omega [Hp]$$

$$P = 1238,88[Nm] * \frac{10rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * 1 \frac{min}{60 seg}$$

$$P = 1297,35 \left[\frac{J}{s} \right] = 1,74 [Hp]$$

Ahora procedemos a realizar el diseño del eje; empezamos asumiendo los siguientes datos.

Tabla 39 Parámetros requeridos para el diseño del eje

Parámetros	Cantidad	Unidades	Descripción
D	12	Mm	Diámetro mayor del eje
d	11,5	Mm	Diámetro menor del eje
J	0,5	Mm	Radio de la muesca
L	1,10	M	Longitud del eje
S_{ut}	469	MPa	Resistencia ultima
S_y	393	MPa	Resistencia a la fluencia

Fuente: Autores, 2016

Empezamos determinando el límite de resistencia a la fatiga.

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Figura 7.1 Datos para determinar el límite de resistencia a la fatiga

Fuente: Norton, 2011

Como podemos observar, nos encontramos en el primer caso, por lo que:

$$S'_e = 0,5S_{ut}$$

$$S'_e = 234,5 \text{ [MPa]}$$

Ahora procedemos a determinar los concentradores de esfuerzos, para ello se hace uso de las siguientes relaciones:

$$\frac{D}{d} = 1,04$$

$$\frac{r}{d} = 0,04$$

Con estos valores de determina K_{ts} haciendo uso de la siguiente gráfica:

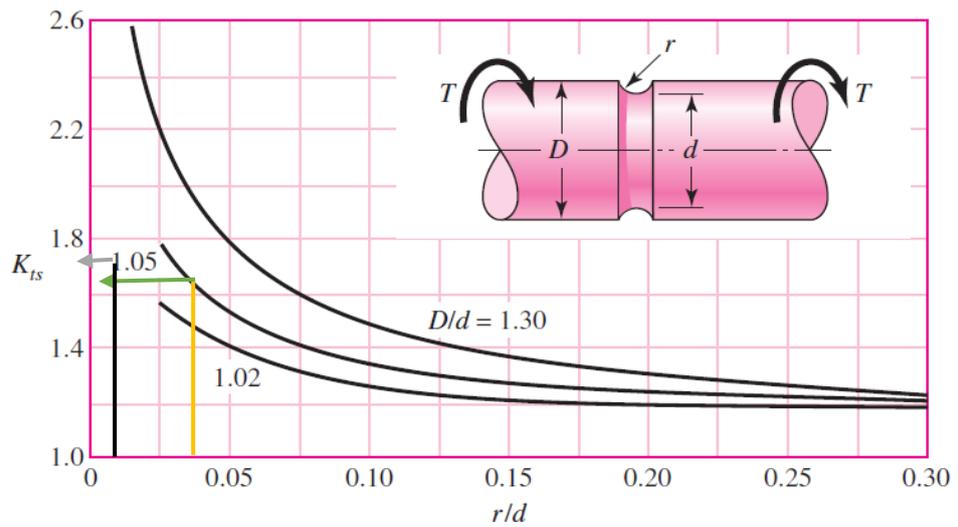


Figura 7.2 Factor teórico de concentración del esfuerzo

Fuente: Richard G. Budynas, 2008

El valor de K_{ts} viene ser 1.75, ahora debemos determinar la sensibilidad a la muesca; esta se determina mediante la siguiente curva.

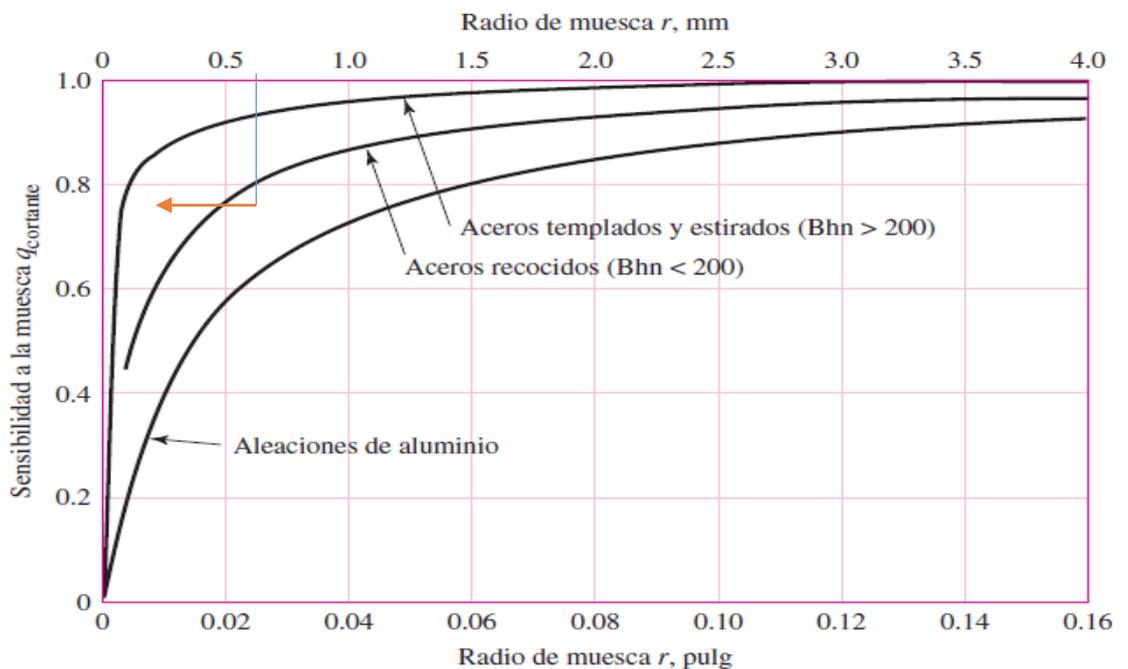


Figura 7.3 Sensibilidad a la muesca

Fuente: Richard G. Budynas, 2008

El factor de sensibilidad a la muesca para el cortante es de 0,75; existe otro tipo de sensibilidad a la muesca, pero para flexión inversa, para nuestro diseño

solo es necesario el factor para el cortante debido a que el eje está sometido solo a torsión.

Se puede calcular ahora el factor de concentración del esfuerzo por fatiga debido a la torsión.

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1,56$$

La ecuación a usar para definir el diseño del eje es la siguiente:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f * M_a)^2 + 3(K_{fs} * T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f * M_m)^2 + 3(K_{fs} * T_m)^2]^{1/2} \right\}$$

Basados en las consideraciones de que $M_a = T_a = M_m = 0$, la ecuación queda expresada de la siguiente manera

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_{ut}} [3(K_{fs} * T_m)^2]^{1/2} \right\}$$

Reemplazando datos en la ecuación, tenemos lo siguiente:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi 11,5^3} \left\{ \frac{1}{469E6} [3(1,56 * 1238,88)^2]^{1/2} \right\}$$

El factor de seguridad obtenido mediante la ecuación es el siguiente:

$$N = 0,045$$

El factor de seguridad es mucho menor a uno, por lo que se procede a iterar para poder llegar a un resultado confiable.

Debido a que el valor del factor de seguridad es reducido, se debe proceder a iterar. Con el fin de ser prácticos, se muestra a continuación la última iteración realizada.

Iteración 1

Definiendo un diámetro menor de 47 mm, se procede a realizar las siguientes operaciones:

$$\frac{D}{d} = 1,01$$
$$\frac{r}{d} = 0,01$$

Si nos dirigimos a la figura 7.2, y la figura 7.3 obtendremos el siguiente valor de K_{fs} .

$$K_{fs} = 1,56$$

Con estos valores procedemos a determinar el factor de seguridad.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi 47^3} \left\{ \frac{1}{469E6} [3(1,56 * 1245,6)^2]^{1/2} \right\}$$

Con este nuevo valor de diámetro, tuvimos un factor de seguridad de 2,8 lo cual nos indica que el eje va a poder soportar los esfuerzos aplicados.

Este análisis es similar para el acero inoxidable tipo 304; los cálculos no se presentan debido a que tienen la misma similitud con respecto a los realizados para el acero AISI 1020, no obstante, los resultados se muestran en la sección 3.4 de este documento.

Anexo IV-Cálculos Termodinámicos

8. Cálculo del calor requerido para secar el cacao.

$$\dot{Q}_{cacao} = \Delta \dot{m}_w * h_{fg} + \dot{m}_{cacao} * C_{p_{cacao}} * (T_{out} - T_{in})$$

$$\dot{Q}_{cacao} = (0.02037 \frac{kg}{s}) * (2333 \frac{kJ}{kg}) + (0.0925 \frac{kg}{s}) * (2.541 \frac{kJ}{kg}) * (70 - 25)^\circ C$$

$$\dot{Q}_{cacao} = 47.53 kW$$

9. Cálculo del coeficiente interno de convección.

Número de Grashof:

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2}$$

$$Gr_D = \frac{(9.81 \frac{m}{s^2})(0.0312)(70 - 25)(0.01532 m)^3}{(0.00005761 \frac{m^2}{s})^2}$$

$$Gr_D = 1493$$

Número de Rayleigh:

$$Ra = Gr_D * Pr_{air}$$

$$Ra = 1493 * 0.7043$$

$$Ra = 1052$$

Número de Nusselt:

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0.589Ra^{1/6}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$\overline{Nu}_D = 2 + \frac{0.589(1052)^{1/6}}{[1 + (0.469/0.7043)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$\overline{N_{uD}} = 3.448$$

Coefficiente interno de convección:

$$h_i = \frac{N_u * k}{D}$$

$$h_i = \frac{3.448 * 0.02788 \frac{W}{m \cdot K}}{0.01532 m}$$

$$h_i = 6.274 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

10. Cálculo del coeficiente externo de convección.

Número de Reynolds:

$$Re_{ext} = \frac{V * D}{\nu}$$

$$Re_{ext} = \frac{\left(3.086 \frac{m}{s}\right) (0.01532 m)}{0.00001597 \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{ext} = 367232$$

Número de Nusselt, correlacion Zhukauskas [16]:

$$\overline{N_{uD_{ext}}} = C * Re_{ext}^m * Pr^n * \left[\frac{Pr_{air}}{Pr_{air_s}} \right]^{0.25}$$

$$\overline{N_{uD_{ext}}} = 0.26 * (367232)^{0.6} * (0.7069)^{0.37} * \left[\frac{0.7069}{0.7068} \right]^{0.25}$$

$$\overline{N_{uD_{ext}}} = 499.2$$

Coeficiente de convección externa:

$$h_{out} = \frac{\overline{Nu}_{D_{ext}} * k_{air}}{D_t}$$

$$h_{out} = \frac{499.2 * 0.02655 \frac{W}{m \cdot K}}{0.01532 m}$$

$$h_{out} = 6.977 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

11. Cálculo de las pérdidas de calor.

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{T_{in} - T_{amb}}{\frac{1}{h_{in} * 2\pi * r_1 * L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 * \pi * k_a * L} + \frac{1}{h_{out} * 2 * \pi * r_2 * L}}$$

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{(70 - 25)^\circ C}{\frac{1}{(9.901 \frac{W}{m^2 \cdot K}) (2\pi)(0.94m)(1.2m)} + \frac{\ln \frac{0.95}{0.94}}{(2\pi) (14 \frac{W}{m \cdot K}) (1.2m)} + \frac{1}{(6.977 \frac{W}{m^2 \cdot K}) (2\pi)(0.95 m)(1.2 m)}}$$

$$\dot{Q}_{perdido} = 1.087 kW$$

12. Cálculo del calor total.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{cacao} + \dot{Q}_{perdido}$$

$$\dot{Q}_{total} = 47.53 kW + 0.881 kW$$

$$\dot{Q}_{total} = 48.61 kW$$

13. Cálculo del coeficiente de radiación de convección.

$$h_{rad} = \epsilon \sigma (T_\alpha + T_s) (T_\alpha^2 + T_s^2)$$

$$h_{rad} = (0.17) \left(5.67 \times 10^{-7} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) (343 + 298) K ((343)^2 + (298)^2) K^2$$

$$h_{rad} = 3.527 \frac{W}{m^2 - K}$$

14. Cálculo del tiempo de secado

Coefficiente total de convección interna:

$$h_{total} = h_{in} + h_{rad}$$

$$h_{total} = 6.274 \frac{W}{m^2 - K} + 3.527 \frac{W}{m^2 - K}$$

$$h_{total} = 9.801 \frac{W}{m^2 - K}$$

Tiempo de secado:

$$t_{secado} = \frac{L^2}{8k_d} \frac{h_{fg}}{(T_f - T_s)} \left[\frac{4k_d(X_o - X)}{Lh} + \frac{(X_o - X)^2}{(X_o - X_e)} \right]$$

$$t_{secado} = \frac{(0.01532m)^2}{8 \left(0.4237 \frac{W}{m - K}\right)} \frac{\left(2333 \frac{kJ}{kg}\right)}{(70 - 25)^\circ C} \left[\frac{4 \left(0.4237 \frac{W}{m - K}\right) (0.429 - 0.1143)}{(0.01532m) \left(9.801 \frac{W}{m^2 - K}\right)} + \frac{(0.429 - 0.1143)^2}{(0.429 - 0.03)} \right]$$

$$t_{secado} = 2.404 h$$

Anexo V-PLANOS

Bibliografía

- ANECACAO, D. d. (2015). *exportación ecuatoriana de Cacao del 2014*. ANECACAO, 1-6.
- Ángel Vian, J. O. (1952). *Elementos de Ingeniería Química*. Madrid: Aguilar.
- Beckett, S. T. (2009). *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. New York: WILEY-BLACKWELL.
- Campuzano, V. A. (2007). Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. *Caracterización Organoléptica del cacao para la selección de arboles con perfiles de sabor de interés comercial*. Quevedo, Los Rios, Ecuador.
- Caranqui, A. J. (2015). *Diseño de un secador rotatorio para granos de cacao con capacidad de 3 tonleadas diarias para la producción nacional*. Guayaquil.
- Cengel, Y. A. (2002). *Transferencia de Calor y Masa*. México: Mc Graw Hill.
- Earle, R. L. (1998). ingeniería de los alimentos. En R. L. Earle, *ingeniería de los alimentos* (págs. 83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100). Zaragoza: ACRIBIA, S. A.
- Ecuador, B. C. (2014). Cacao. *Reporte de coyuntura del sector agropecuario*, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29.
- Er, R. L. (s.f.).
- Estrada, J. M. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a presión*.
- Ferdinand P. Beer, E. R. (2007). *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
- Henry Alfonso Gilces Vera, F. M. (17 de junio de 2013). proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniero industrial. *Análisis y selección de proceso de secado de cacao y diseño de prototipo de una unidad secadora tipo plataforma*. Milagro, guayas, Ecuador.
- Incropera, F. P. (2004). *Transferencia de Calor*. México.
- INIAP. (2010). Secado. *Manejo técnico del cultivo de cacao en Manabí*, 107, 108, 109, 110.
- Levenspiel, O. (1993). *Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor*. Barcelona: Reverté s.a.
- Mujumdar, A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying. En A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* (págs. 4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18). singapur: Arun S. Mujumdar.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria*. México: Mc Graw Hill.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas*. México: PEARSON.

- O'Hanlon, J. F. (2003). *A User's Guide to Vacuum Technology*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- PROECUADOR. (2015). Información del mercado. *PROECUADOR-Chocolate en Estados Unidos*, 1-17.
- Relief, L. W. (2013). *Aprendiendo e innovando sobre la cosecha, fermentación y secado del cacao*. Centro América: Mercedes Campos, SIMAS.
- Richard G. Budynas, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- S. V. Jangam, C. L. (2010). *Drying of foods, Vegetables and fruits*. singapur.
- Salazar, M. K. (1990). *Diseño Térmico de un Secador de Cacao del Tipo Plataforma*. Guayaquil.
- sistelec. (19 de enero de 2016). factura electrónica. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Tadeusz Kudra, A. S. (2009). *Drying Technologies*. New York: CRC Press.