

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UNA SECADORA DE CACAO PARA ALMACENAJE
CON CAPACIDAD DE 2 T/DIA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,

que presenta el bachiller:

JOSE ARTURO CABALLERO CAVA

ASESOR: Dr. Luis Cotaquispe Zevallos

Lima, Junio del 2015



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : **DISEÑO DE UNA SECADORA DE CACAO PARA UNA CAPACIDAD DE 2 Tn/DÍA**

ÁREA : Diseño # 297

PROPUESTO POR : Dr. Ing. Luis Orlando Cotaquispe Zevallos

ASESOR : Dr. Ing. Luis Orlando Cotaquispe Zevallos

TESISTA : José Arturo Caballero Cava

CÓDIGO : 20070208

FECHA : 24 de Abril de 2015



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Se tiene la necesidad de conservar el cacao almacenado sin que la calidad de éste se vea afectado por la proliferación de bacterias y hongos.

Para ello, se diseñará un equipo secador capaz de procesar 2 Tn/día de cacao seco con una alimentación periódica y que reduzca su humedad en un 10% - 15% sin afectar la calidad del producto, utilizando para ello aire pre calentado. Se analizarán alternativas para realizar ésta tarea de manera que el producto no se vea afectado por agentes contaminantes y que su tránsito sea tal que no dañe físicamente el producto a la entrada, durante y a la salida de la máquina.

Definir las condiciones adecuadas para un buen proceso lo cual contribuirá a mantener la calidad de la almendra del cacao, como son una temperatura y dirección del flujo adecuados; y evaluar los elementos mecánicos de transmisión necesarios para conseguir un secado uniforme.





**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DISEÑO DE UNA SECADORA DE CACAO PARA UNA CAPACIDAD
DE 2 Tn/DÍA**

Introducción

1. Aspectos generales del cacao
2. Determinación del proyecto preliminar de la secadora
3. Diseño del sistema de secado
4. Cálculo estructural y selección de los equipos de transmisión de potencia.

Conclusiones

Recomendaciones

Planos

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Dr. Luis Cotaquispe Zevallos

Asesor





A mis padres y hermana por su apoyo incondicional y darme la fortaleza para seguir adelante y alcanzar este logro.

INTRODUCCION

La propuesta de tesis nace a partir de la necesidad de conservar el cacao almacenado durante los periodos fuera de la temporada de cultivo y cosecha, sin que éste se vea afectado por la proliferación de bacterias y hongos.

Para ello, se diseñará una máquina secadora capaz de procesar 2 T/día de cacao seco con una alimentación por batch y que reduzca su humedad hasta un promedio de entre 10% - 15% sin afectar la calidad del producto utilizando aire pre calentado. Se investigaran métodos para realizar ésta tarea de manera que el producto no se vea afectado por agentes contaminantes, por ejemplo no utilizar directamente combustibles fósiles; que su tránsito sea tal que no dañe físicamente el producto a la entrada, durante y a la salida de la máquina; encontrar las condiciones ideales para un buen proceso lo cual contribuirá a mantener la calidad de la almendra, como son una temperatura adecuada y la dirección del flujo; y calcular los elementos de transmisión necesarios para conseguir un secado uniforme.

Para el desarrollo del trabajo se utilizarán los parámetros climáticos de la región de Pisco, Ica, siendo esta una zona con gran humedad relativa en el aire (85%) y alcanzando temperaturas medias de 20°C, teniendo en cuenta que el proceso deberá poder adaptarse a los diferentes climas de la costa peruana.

El presente estudio hace uso de la información de libros sobre ingeniería del secado, tesis de secado de diferentes tipos de granos y frutos, así como papers sobre el secado de cacao como los expuestos en el análisis del proceso de deshidratación de cacao en la revista Agricultural Engineering International, reforzando estos estudios con los de secado de café, perteneciente a la misma familia de frutos sub-tropicales, como los expuestos por SECAFÉ, para así lograr una adecuada modelación del proceso de deshidratación del cacao.

ÍNDICE

LISTA DE SIMBOLOS Y UNIDADES

CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES DEL CACAO

1.1 Género	1
1.2 Variabilidad	1
1.2.1 Criollo	1
1.2.2 Forastero	1
1.2.3 Trinitario	2
1.3 Distribución	2
1.3.1 Distribución mundial.....	2
1.3.2 Distribución en el Perú	3
1.4 Hábitat.....	3
1.5 Región de cultivo	3
1.6 Cosecha.....	4
1.7 Beneficio del cacao.....	4
1.7.1 Secado (Tostado)	4
1.7.1.1 Secado natural	5
1.7.1.2 Secado artificial	5
1.8 Almacenamiento	5
1.9 Secado para almacenaje.....	6
1.10 Marco económico	6
1.10.1 Datos estadísticos de cacao peruano – junio 2012	6

CAPITULO 2: CONCEPCIÓN DEL DISEÑO

2.1 Estado del arte.....	11
2.1.1 Tratamiento de sólidos en los secadores.....	11
2.1.1.1 Flujo paralelo de gas con lecho estático.....	11
2.1.1.2 Flujo perpendicular de gas con lecho estático	11
2.1.1.3 Flujo perpendicular de gas con movimiento rotatorio.....	12

2.1.1.4 Lecho fluidizado	12
2.1.1.5 Secado en flash con flujo paralelo	13
2.1.2 Clasificación de secadores	13
2.1.2.1 Secador de bandejas o armario	13
2.1.2.2 Secador rotatorio	14
2.1.2.3 Secador de túnel	15
2.1.2.4 Secador de tambor	15
2.1.2.5 Secadores de lecho fluidizado	16
2.1.3 Análisis del proceso de deshidratación del cacao	17
2.1.3.1 Resultados de una modelación matemática sobre la base del modelo Thompson para el secado de cualquier grano	18
2.1.3.2 Pruebas de secado experimental y análisis computacional utilizando el método de elementos finitos para estudiar el proceso de secado	18
2.1.3.3 Efecto de la temperatura de secado y la velocidad del aire en la relación de secado y constante de secado del grano de cacao	20
2.1.3.4 Programa estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología para la cadena agroindustrial del cacao en México.	22
2.1.4 Generación del aire para el secado.....	22
2.1.5 Generación de calor para calentar el aire	23
2.1.5.1 Gases de combustión	23
2.1.5.2 Energía eléctrica	24
2.1.5.3 Vapor sobresaturado.....	24
2.2 Método diseño	25
2.2.1 Lista de exigencias	25
2.2.2 Estructura de funciones	28
2.2.3 Matriz morfológica.....	32
2.2.4 Conceptos de solución.....	34
2.2.5 Valoración técnico-económica.....	37
CAPITULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO	
3.1 Secado por aire caliente.....	40
3.1.1 Parámetros de secado.....	40

3.1.1.1 Psicrometría	40
3.1.1.1.1 Humedad Relativa (ϕ)	40
3.1.1.2 Transferencia de Calor	41
3.1.1.3 Características del grano	42
3.1.2 Tiempo de secado	44
3.1.2.1 Periodo de velocidad constante (R_c)	44
3.1.2.2 Periodo de velocidad decreciente	45
3.1.3 Isoterma de Sorción	46
3.1.4 Temperatura del producto durante el secado (T_p)	47
3.1.5 Contenido de humedad crítica (H_c)	49
3.1.6 Cálculos y resultados	49
3.1.6.1 Datos de entrada:	49
3.1.6.2 Procedimiento de cálculo	50
3.2 Análisis energético del secador	52
3.2.1 Análisis Termodinámico del Secador (Energía de calentamiento del aire)	54
3.2.1.1 Cantidad de agua eliminada	57
3.2.1.2 Energía de calentamiento del aire	58
3.3 Determinación del flujo de aire necesario para el proceso	61
3.4 Análisis de las caídas de presión en el sistema	63
3.5 Cálculo y selección de equipos	69
3.5.1 Intercambiador de calor de resistencias eléctrica	69
3.5.2 Ventilador Centrífugo	71
3.6 Aislantes térmicos	71
3.3.1 Radio crítico de aislantes	71
3.3.2 Coeficiente convectivo del aire exterior	72
 CAPITULO 4: CÁLCULO ESTRUCTURAL Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA	
4.1 Dimensionamiento del secador	75
4.2 Elementos del secador	75
2.3 Diseño estructural	76

4.3.1 Plancha perforada.....	76
4.3.2 Diseño del puente.....	77
4.3.3 Diseño del bastidor.....	78
4.3.3.1 Espesor de plancha.....	79
4.3.3.2 Perfiles estructurales.....	79
4.3.3.3 Cálculo estructural del bastidor.....	80
4.4 Selección del motor-reductor.....	82
4.5 Diseño del eje de uniformizado.....	85
4.5.1 Fuerzas actuantes sobre el eje.....	85
4.5.2 Dimensionamiento del diámetro del eje.....	87
4.5.3 Verificación por fatiga.....	90
4.6 Lista de planos.....	92
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES.....	95
BIBLIOGRAFIA.....	96
ANEXOS.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

$^{\circ}\text{C}$: Grados Celsius
A	: Área [m^2]
A_p	: Área perforada de la plancha [m^2]
A_s	: Área de secado [m^2]
a	: radio de la plancha circular [m]
C	: Capacidad de secado [kg]
c	: Esfuerzo cortante [MPa]
C_p	: Calor específico [Kj/Kg-K]
C_s	: Coeficiente por acabado superficial
C_t	: Coeficiente por tamaño
C_{temp}	: Coeficiente por temperatura
D_e	: Diámetro hidráulico a la entrada de la sección [m]
D_s	: Diámetro hidráulico a la salida de la sección [m]
d_{ep}	: Diámetro equivalente de la partícula [m]
d_{ee}	: Diámetro equivalente efectivo de la partícula [m]
E	: Módulo de elasticidad del hacer [kg/m^2]
e_a	: Espesor de aislante [m]
F	: Fuerza [N]
G	: Velocidad media del aire de secado [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
h	: Altura [m]
h_c	: coeficiente de transmisión de calor por convección [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]
H_{fg}	: calor latente de vaporización [kJ/kg]
I	: Momento de Inercia [$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$]
k	: Coeficiente de conductividad térmica [$\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$]

\dot{m}_a	: Flujo másico de aire [kg/h]
m_g	: masa de gas seco [kg]
m_s	: masa de materia seca [kg]
m_v	: masa de vapor [kg]
m_w	: masa de agua contenida en el solido [kg]
M_x	: Momento flector en el eje x [N-m]
M_y	: Momento flector en el eje y [N-m]
$Max y$: Máxima deflexión [m]
P_s	: Presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla [Pa]
\dot{Q}	: Flujo de calor [W]
\dot{q}_c	: Flujo de calor por convección [W]
\dot{q}_k	: Flujo de calor por conducción [W]
P_a	: Presión del aire [Pa]
P_v	: Presión parcial del vapor en la mezcla [Pa]
R_a	: Constante de gas ideal para el aire [J/kg-K]
r	: radio de aislante [m]
r_c	: Radio crítico de aislante [m]
r_o	: Radio externo del bastidor [m]
R_c	: Velocidad de secado constante [kJ/m ² -s]
R_d	: Velocidad de secado decreciente [kJ/m ² -s]
t	: Espesor de plancha [m]
T	: Torque [N-m]
T_∞	: Temperatura de referencia en el fluido o entorno [°C]
$T_{\infty i}$: Temperatura en el interior del bastidor [°C]
$T_{\infty e}$: Temperatura exterior (ambiente) [°C]
T_a	: Temperatura del aire [°C]

T_{BH}	: Temperatura de bulbo húmedo [°C]
T_{BS}	: Temperatura de bulbo seco [°C]
t_c	: Tiempo de secado en el periodo constante [h]
t_d	: Tiempo de secado en el periodo decreciente [h]
T_s	: Temperatura de la superficie [°C]
t_{secado}	: Tiempo de secado [h]
u	: velocidad del aire a través del lecho [m/s]
V_m	: Velocidad media del aire en la sección [m/s]
ν	: Módulo de Poisson
v_a	: Velocidad del aire [m/s]
w	: Velocidad angular [rad/s]
W	: Peso total [kg]
X	: Humedad absoluta o específica
x_c	: Humedad crítica [%]
x_e	: Humedad de equilibrio [%]
x_f	: contenido de humedad final [%]
X_h	: Contenido de humedad en base húmeda
x_i	: Contenido de humedad inicial del producto [%]
X_s	: Contenido de humedad en base seca
Δp_c	: Caída de presión a través de la cama de granos [mmca]
Δp_e	: Caída de presión a través de la entrada en expansión [mmca]
Δp_i	: Caída de presión a través del intercambiador de resistencias eléctricas [mmca]
Δp_p	: Caída de presión a través de la plancha perforada [mmca]
β_f	: Factor de concentración de esfuerzos efectivo a la flexión
β_t	: Factor de concentración de esfuerzos efectivo a la torsión
ε	: Fracción de vacíos o porosidad del lecho

- ϑ_a : Volúmen específico del aire [m^3/kg]
- μ : Coeficiente de rozamiento
- ν : Viscosidad del aire [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
- ρ_a : Densidad del aire [Kg/m^3]
- ρ_c : Densidad del cacao [Kg/m^3]
- σ_{eq} : Esfuerzo equivalente [MPa]
- σ_f : Esfuerzo de flexión [MPa]
- σ_{pul} : Resistencia a la fatiga en flexión pulsante [MPa]
- τ_t : Esfuerzo de torsión [MPa]
- τ_{tpul} : Resistencia a la fatiga en torsión pulsante [MPa]
- Φ : Factor de esfericidad
- \emptyset : Humedad relativa

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DEL CACAO

1.1 Genero

El Cacao (*Theobroma Cacao*) pertenece a la familia Malvaceae, subfamilia Sterculioideae, y comprende 22 especies en seis secciones. Todas las especies crecen en los bosques tropicales lluviosos y su distribución natural se extiende desde la cuenca del Amazonas por el sur hasta la región meridional de México. Su centro de diversidad se encuentra en la región amazónica en lo que hoy es Brasil, Perú, Ecuador, Venezuela y Colombia.

1.2 Variabilidad

Las formas de cacao se clasifican tradicionalmente en tres grupos genéticos: Criollo, Forastero y Trinitario¹

1.2.1 Criollo

Su clase es de árboles delgados y los frutos son típicamente de cubierta delgada y esculpada con pigmentación rojiza, siendo considerado un grupo de muy buena calidad. Las formas Criollo muestran signos de depresión endogámica y, frecuentemente, más bajos rendimientos y mayor susceptibilidad a plagas. El cultivo comercial se desarrolla principalmente en las áreas de origen, en Venezuela, México, Nicaragua, Guatemala y Colombia. El 5—10 % de la producción mundial de cacao pertenece a esta variedad

1.2.2 Forastero

La variedad Forastero se origina en la cuenca superior del Amazonas. Se caracteriza típicamente por su fruto verde con una cubierta de fruto gruesa, un mesocarpio fuertemente lignificado, semillas redondeadas y ligeramente aplanadas y cotiledones de color violeta. La mayoría del cacao que se cultiva en Brasil, Perú, Bolivia, África Occidental, América Central y el Caribe pertenece a este grupo. Con cerca del 80% de la producción mundial de cacao, el grupo de cultivares Forastero es el grupo

¹ MALESPÍN, M. “*El Cacao*”, editorial IICA, Nicaragua. 1982

comercialmente más importante. Ésta variedad posee un mayor rendimiento y es más resistente a enfermedades fungosas. Es conocido como cacao amargo.

1.2.3 Trinitario

De origen híbrido entre formas Criollo y Forastero. El grupo es respectivamente muy heterogéneo genéticamente y, morfológicamente, muy polimorfo, siendo imposible delimitarlo a través de características comunes y con algunos de éstos de mayor rendimiento y calidad que el forastero. Las plantas son normalmente muy robustas con frutos verdes o pigmentados y con semillas violeta claro a violeta oscuro. El 10% - 15 % de la producción mundial de cacao se proviene de la variedad Trinitario.

Tabla 1.1 Distribución en el Perú (Fuente: Acorde) - Elaborado por MAXIMIXE (2002)

Distribución por Variedad de Cacao			
Grupo Genético	%	Variedad	%
Trinitario	53,3	Huallaga Central	21,5
		Río Apurímac	15,4
		Alto Marañón	9,4
		La Convención	7,0
Forastero Amazónico	37,3	La Convención	28,0
		Huallaga Central	9,3
Criollo	9,4	Zona Norte	9,4

1.3 Distribución

1.3.1 Distribución mundial

El área natural de distribución del Theobroma cacao abarca desde la región de la cuenca del Amazonas y las Guyanas hasta el sur de México. Después de la llegada de los europeos a América, el cultivo del cacao se ha expandido al Caribe, Asia y África y es hoy día pantropical. Los productores más importantes son Costa de Marfil, Ghana e Indonesia.

1.3.2 Distribución en el Perú

La presencia de este fruto en el Perú se ha registrado para ocho departamentos (Cajamarca, Cuzco, Huánuco, Junín, Loreto, Madre de Dios, Piura y San Martín) entre los 0—500 msnm, aunque es posible que hayan más departamentos implicados que tengan el hábitat adecuado, como Ayacucho, Pasco y Ucayali.

1.4 Hábitat

El hábitat natural del *Theobroma cacao* es en el interior de los bosques lluviosos (sub-) tropicales sudamericanos comprendiendo zonas subtropicales secas a húmedas, así como zonas tropicales muy secas a húmedas. El cacao se cultiva habitualmente a elevaciones bajo los 300 msnm, y en ambientes boscosos especialmente abrigados como los de Colombia pueden alcanzar elevaciones de hasta 900 msnm.

1.5 Región de cultivo

El territorio principal de cultivo se encuentra entre los 10 °N y 10 °S. Es por ello que toda la región de tierras bajas orientales del Perú tiene potencial para el cultivo de este fruto. El área más apta se encuentra en los departamentos amazónicos centrales y septentrionales, en un rango de elevación de 0 a 500 msnm.

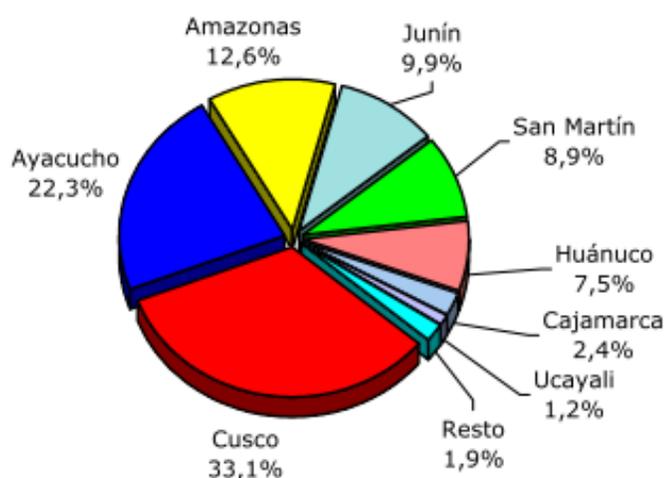


Figura 1.1 Distribución en el Perú (2002)

Fuente: MINAG

1.6 Cosecha

A veces considerada la fase inicial del beneficiado, comprende principalmente el corte de las mazorcas maduras del árbol y su acarreo al partidero donde las almendras serán extraídas de la mazorca en cuyo interior están adheridas junto con su pulpa y placenta.

Al cosecharse las mazorcas debe procurarse no dañar la parte basal del pedúnculo pues éste debe permanecer adherido al árbol para formar el cojín floral donde se formarán y aparecerán nuevamente las flores para la siguiente fructificación.

1.7 Beneficio del cacao

Luego de la extracción, el grano debe someterse a un proceso más o menos prolongado llamado beneficio o preparación del cacao², que consiste fundamentalmente en la fermentación y secado de los granos, pero también en su limpieza y clasificación con la finalidad de convertir el cacao en un producto apto para almacenarse y transportarse con las cualidades de sabor y aroma característicos de éste producto y que finalmente denotan la calidad del cacao.

En esta tesis se omitirá la fermentación, pues la finalidad es la de conseguir almacenar el cacao adecuadamente para su procesamiento fuera de la temporada de cosecha.

1.7.1 Secado (Tostado)

La finalidad principal de éste proceso es la de eliminar el exceso de agua en el grano hasta conseguir una humedad entre el 7% - 8%, límite considerado como unidad crítica para el almacenamiento. Es importante tener en cuenta que la humedad no debe bajar del 6% pues las almendras se vuelven quebradizas.

En la actualidad existen 2 métodos:

² MORENO, L, SANCHÉZ, J. “Beneficio del cacao”, editorial IICA, Honduras. 1989

1.7.1.1 Secado natural

Se exponen los granos directamente al sol en un patio de cemento, pero es preferible hacerlo sobre estirillas o tablas. El secado debe iniciarse en capas gruesas con el objeto de lograr un secado gradual y evitar que la cáscara del cacao se adhiera a la almendra. Al segundo o tercer día las capas deberán ser más delgadas y la masa se debe remover regularmente (cada media hora). El tiempo de sacado dependerá de la época y el lugar donde se realice, pero generalmente requiere de 6 a 10 días para conseguir un buen secado. Éste método posee desventajas como las condiciones climáticas (como lluvias o que el sol sea tapado por nubes, etc.), el largo tiempo necesario para realizar el proceso, y al ser un proceso realizado al aire libre hay presencia de plagas y hongos. Por otro lado posee la ventaja de ser un método muy económico.

1.7.1.2 Secado artificial

Se realiza por medio de secadoras con fuentes de calor como leña, combustibles fósiles o resistencias eléctricas. Requiere de cuidados especiales, pues la temperatura debe subir lentamente y debe estar en un rango de entre 50°C y 80°C (tema que será analizado en el presente documento) manteniéndose por todo el periodo de secado. Existen varios diseños de secadoras artificiales de las cuales su selección dependerá del volumen de cosecha obtenido. Su desventaja ésta un costo más elevado que le método al sol (aunque puede ser cubierto con las mayores utilidades obtenidas al ser un proceso más rápido) y en el control del proceso para evitar quemar el producto u obtener granos muy deshidratados que se parten fácilmente y pierden el aroma (cualidad de gran importancia en la industria del cacao).

1.8 Almacenamiento

El cacao seco debe almacenarse lejos de a fuentes de olores fuertes tales como establos, cocinar y otros, pues el grano los adquiere fácilmente. Los almacenes deberán estar limpios, ventilados, iluminados y secos; evitando la proliferación de hongos e insectos. Los granos deberán ser ensacados en sacos de yute con revestimiento interno de polietileno apilados sobre parihuelas de madera. Cuando el cacao posee una humedad del 7%, puede mantenerse almacenado por un periodo aproximado de 4 meses.

1.9 Secado para almacenaje

Si bien se ha hablado del proceso de secado anteriormente, era como parte del proceso denominado beneficio, que busca darle la calidad al cacao. Cuando se habla de secado para almacenaje lo que se busca es la posibilidad de guardar producto para su procesamiento fuera de la temporada de cosecha.

En este caso la humedad final³ de la semilla deberá estar entre 12% y 15% siendo los métodos utilizados los mismos que en el beneficio del secado o tostado y siendo este el objetivo al que apunta este documento.

1.10 Marco económico

1.10.1 Datos Estadísticos de Cacao Peruano – Junio 2012

EXPORTACIONES DE CACAO EN GRANO, ENTERO O PARTIDO

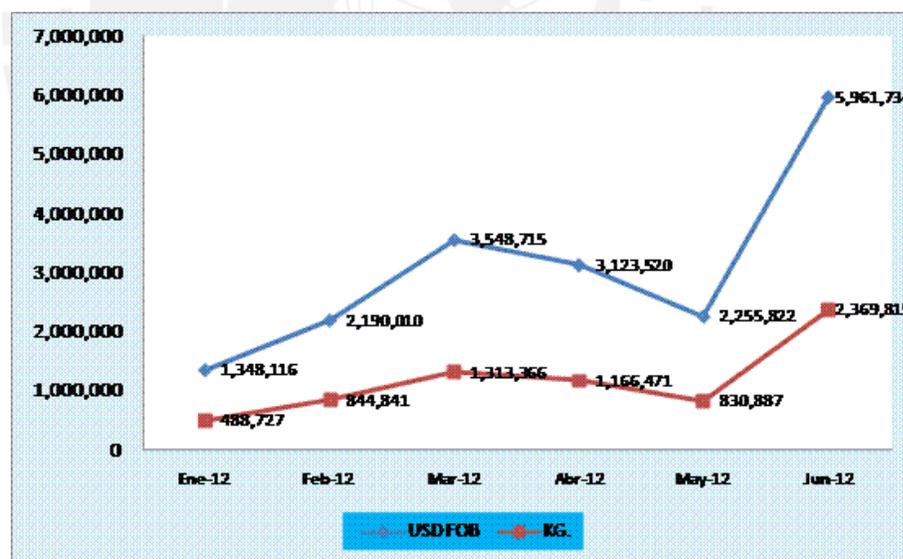


Figura 1.2 Exportaciones de cacao en grano, entero o partido [1] – Junio 2012

FUENTE: ADUANAS

³ GALVEZ RAMIREZ, CANDIDO. “Almacenamiento y Conservación de Semillas”: Material Vegetal de Reproducción: Manejo, Conservación y Tratamiento. Pág. 8.

PRINCIPALES EMPRESAS EXPORTADORAS

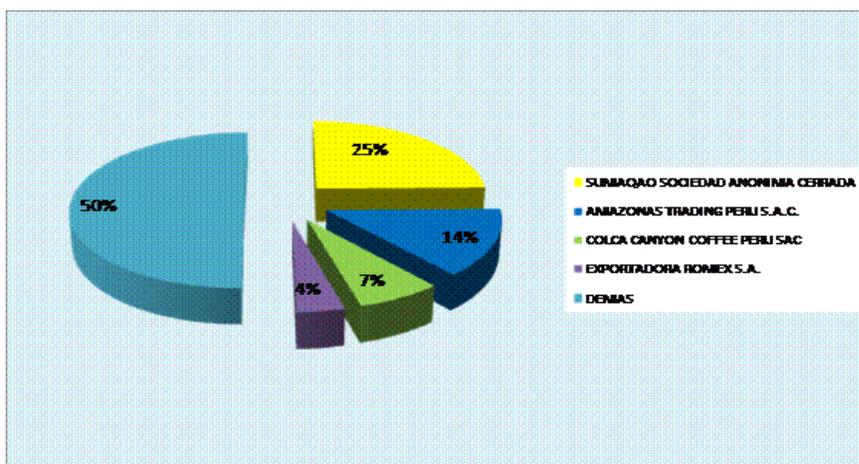


Figura 1.3 Principales empresas exportadores de cacao en el Perú

FUENTE: ADUANAS (2012)

PRINCIPALES ORGANIZACIONES DE PRODUCTORES EXPORTADORES DE CACAO EN EL PERÚ

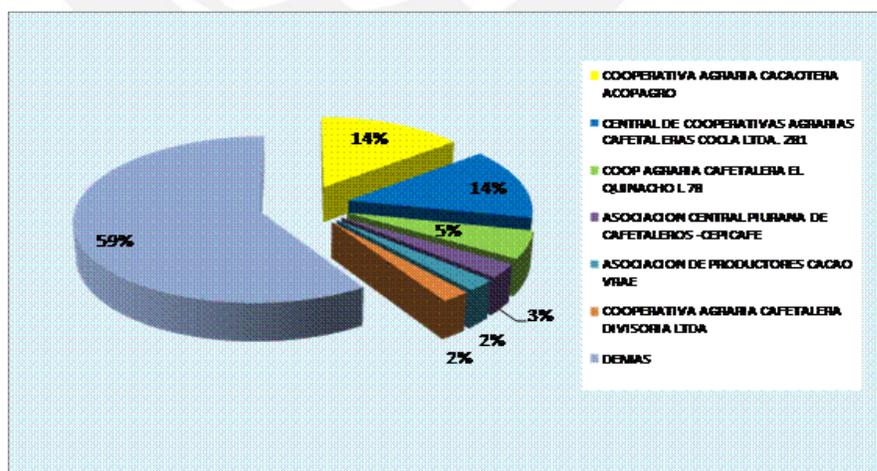


Figura 1.4 Principales organizaciones de productores exportadores de cacao en el Perú

FUENTE: ADUANAS (2012)

Principales países de destino de las exportaciones de cacao en grano

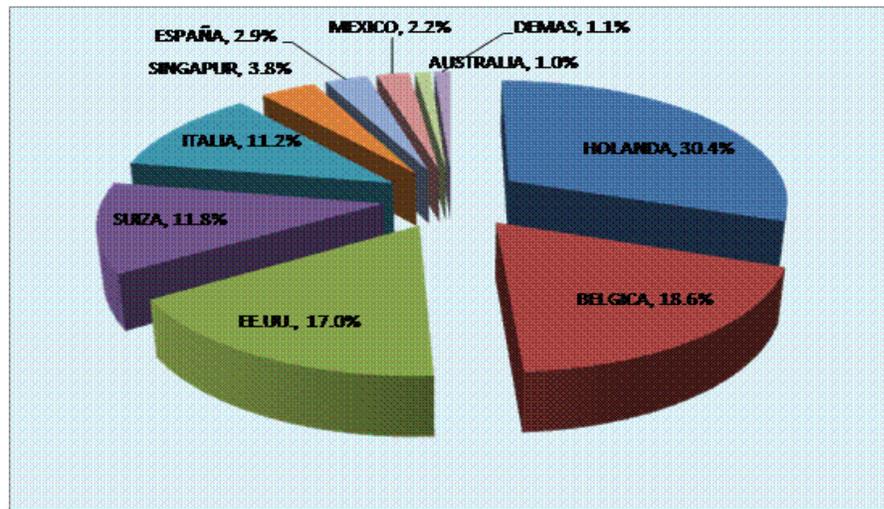


Figura 1.5. Principales países de destino de las exportaciones de cacao en grano

FUENTE: ADUANAS (2012)

Evolución del Valor USD FOB de las exportaciones de cacao

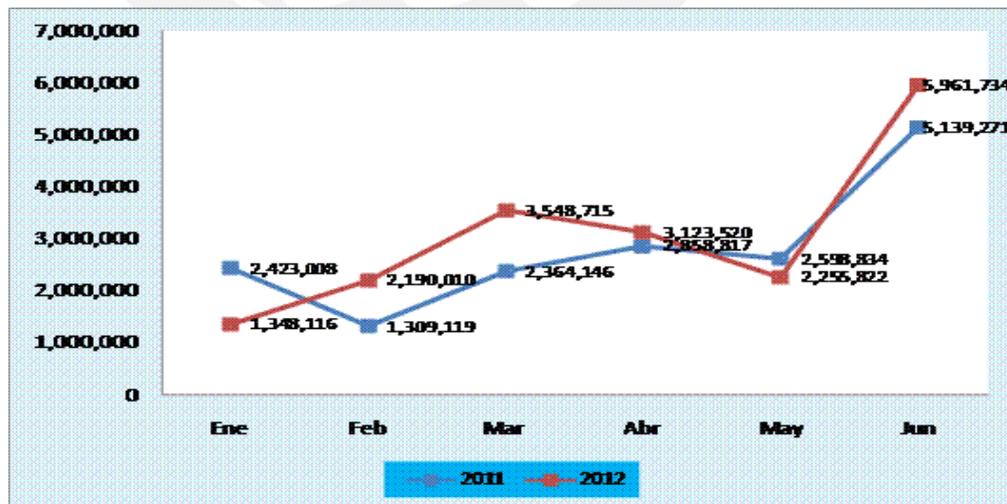


Figura 1.6 Evolución del Valor USD FOB de las exportaciones de cacao

FUENTE: ADUANAS

EXPORTACIÓN DE CACAO EN GRANO TOSTADO

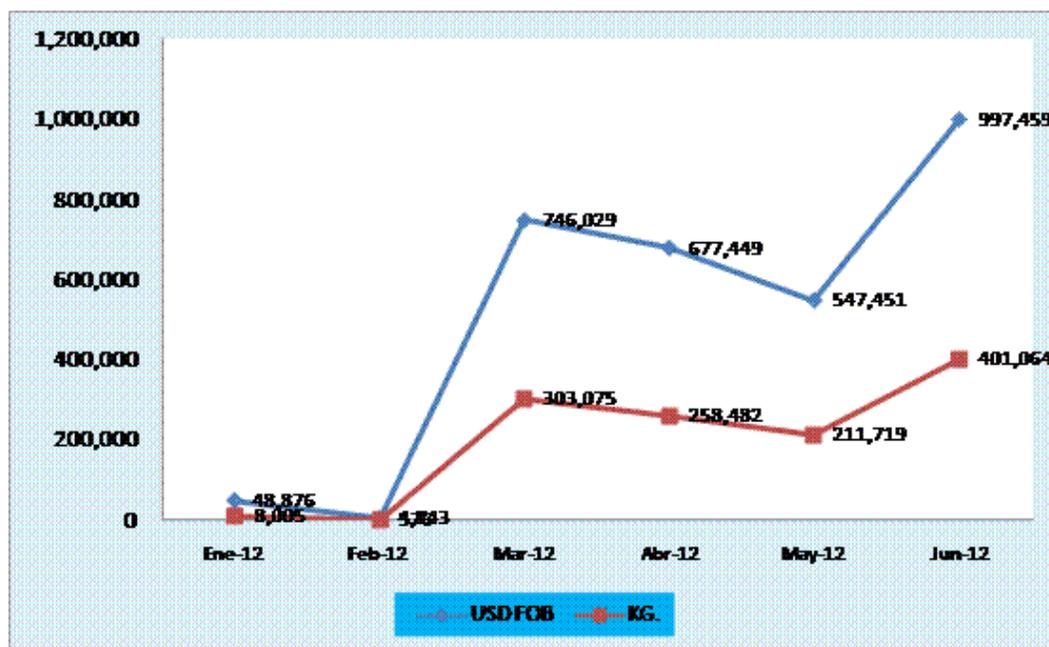


Figura 1.7 Valor USD FOB de las exportaciones de cacao en grano tostado[4]

FUENTE: ADUANAS

Las ventas de cacao en grano tostado fueron realizadas a los siguientes países de destino:

Tabla 1.2 Países de destino de Cacao en Grano Tostado – Junio 2012 - FUENTE: ADUANAS

PAISDEST	TOTAL FOB US\$	PESO NETO Kg
ALEMANIA	993,444.79	400,384.00
EE.UU.	4,014.40	680
TOTAL	997,459.19	401,064.00

PRECIOS FUTUROS DEL CACAO EN LA BOLSA

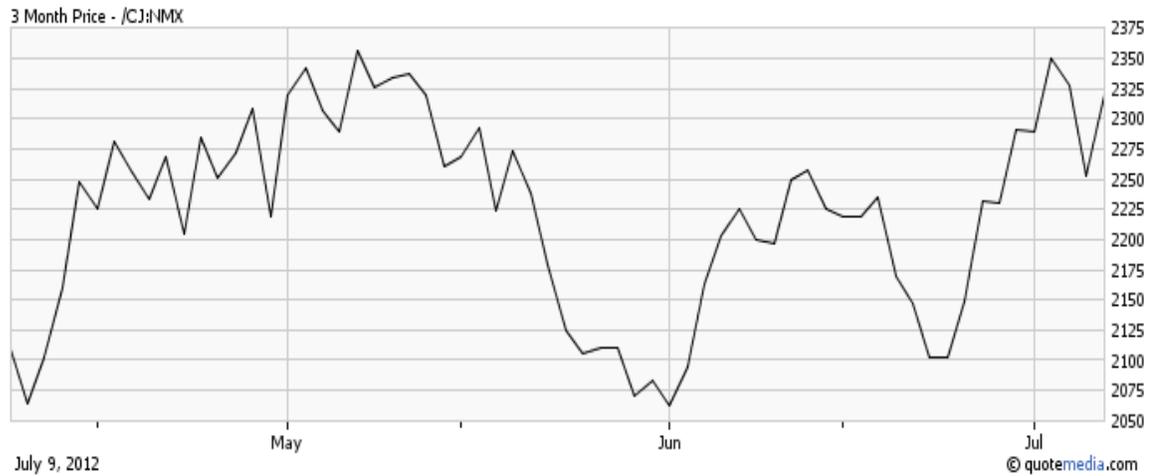


Figura 1.8 Evolución de cotizaciones futuras de cacao según la Bolsa de New York

FUENTE: FUTURESOURCE

CAPITULO 2

CONCEPCIÓN DEL DISEÑO

2.1 Estado del arte

2.1.1 Tratamiento de sólidos en los secadores

En los equipos de contacto gas-sólido, los sólidos pueden encontrarse en cualquiera de las condiciones siguientes⁴:

2.1.1.1 Flujo paralelo de gas con lecho estático

El gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina del sólido, o bien sobre una o ambas caras de una lámina o película continua. Este proceso se llama secado con circulación superficial. El sólido puede estar estático o en movimiento.



Figura 2.1 Flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos

2.1.1.2 Flujo perpendicular de gas con lecho estático

El gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que pueden o no estar en movimiento y que están soportados sobre una rejilla. Recibe el nombre de secado con circulación a través y es de flujo perpendicular. Como en el caso del secado con circulación superficial, la velocidad del gas se mantiene baja para evitar el arrastre de partículas sólidas.

⁴ W. McCABE y J. SMITH, "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Cuarta Edición y VIAN ORTUÑO, A; OCÓA GRACÍA, J. "Elementos de Ingeniería Química", Quinta edición

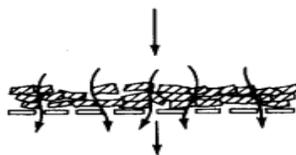


Figura 2.2 Flujo de gas a través de un lecho de sólidos

2.1.1.3 Flujo perpendicular de gas con movimiento rotatorio

Los sólidos descienden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, con frecuencia dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas. El flujo del gas es transversal.

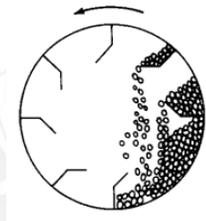


Figura 2.3 Acción en un secadero rotatorio

2.1.1.4 Lecho fluidizado

El gas pasa a través de los sólidos en flujo a contracorriente con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho. Inevitablemente se produce arrastre de las partículas más finas.

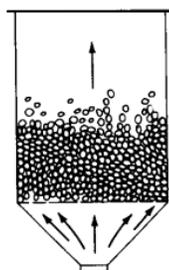


Figura 2.4 Lecho fluidizado de sólidos

2.1.1.5 Secado en flash con flujo paralelo

Los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente de gas de gran velocidad y son neumáticamente transportados desde un dispositivo de mezcla hacia un separador mecánico.

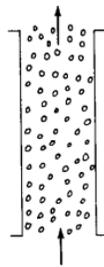


Figura 2.5 flujo en paralelo gas-sólido en un secadero flash de transporte neumático

2.1.2 Clasificación de secadores

Existen secadores continuos y otros por carga; unos mantienen agitado el sólido y otros no. Los equipos de secado pueden clasificarse en secadores en los que los sólidos se encuentran directamente expuestos a un gas caliente (generalmente aire), y secadores en los que el calor es transmitido al sólido desde un medio externo (intercambiador de calor).

A continuación se muestran algunos tipos de secadores utilizados en la industria:

2.1.2.1 Secador de bandejas o armario

Normalmente para régimen intermitente. Formado por una cámara metálica rectangular que contiene unos soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores, cada uno con un número de bandejas poco profundas (10 a 100 mm de profundidad) donde se cargara el material a secar. El aire caliente circula entra las bandejas por medio de ventiladores, siendo previamente calentado por medio de intercambio de calor, normalmente con tuberías por las que pasa vapor de agua. Cuando las características de diseño lo permiten, las bandejas pueden ser perforadas para

aumentar el área de contacto entre el sólido y el aire disminuyendo así la duración del secado.

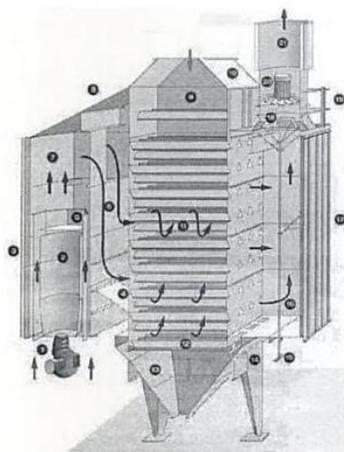


Figura 2.6 Secador de bandejas o de armario.

2.1.2.2 Secador rotatorio

Secador de flujo continuo, posee una cáscara cilíndrica que gira sobre sus soportes y trabaja con una ligera inclinación respecto a la horizontal. Su tamaño está en relación con su diámetro variando entre 4 y 10 veces. El material que ingresa avanza por gravedad en virtud de la rotación e inclinación, saliendo secos por el extremo opuesto. Cuando los gases avanzan en el sentido de la descarga, éstos ayudan al material a avanzar; pero también pueden ir en contra sentido.

Las partes de un secador rotatorio con aire caliente en contracorriente son: Carcasa del secador (A), rodillos para el soporte de la carcasa (B), engranaje (C), campana de descarga de aire (D), conducto de alimentación (F), pestañas elevadoras (G), descarga de producto (H) y calentador de aire (J).

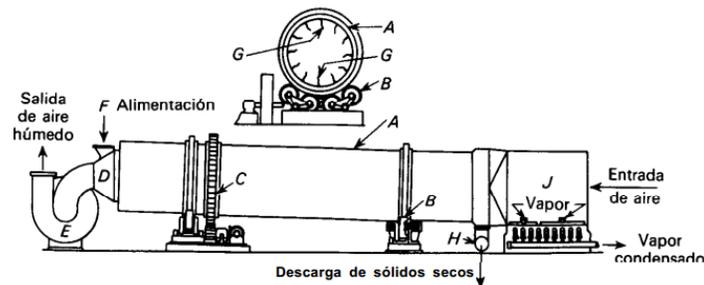


Figura 2.7 Secador Rotatorio Horizontal.

2.1.2.3 Secador de túnel

Se asemejan a los secadores de bandeja pero tienen un funcionamiento semi-continuo. Aquí las bandejas se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado, con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja con un flujo que puede ser a contracorriente, en paralelo o una combinación de ambos.

Al introducir una nueva carretilla, la primera está siendo evacuada con el producto seco mientras las restantes se adelantan una posición en su recorrido. Así, estos conservan la flexibilidad de los de bandeja en cuanto a gama de productos que permite deshidratar aumentando la capacidad de producción con un funcionamiento prácticamente continuo.

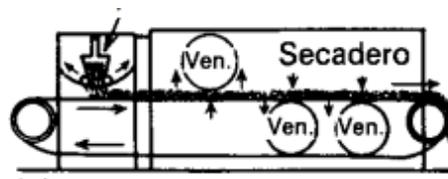


Figura 2.8 Secador de túnel

2.1.2.4 Secador de tambor

Un secador de tambor consiste en uno o más rodillos metálicos calentados, en cuya superficie exterior se evapora hasta sequedad una delgada capa de líquido. El sólido

seco es retirado de los rodillos a medida que éstos giran lentamente.

El líquido de alimentación queda confinado en la parte superior de los dos rodillos y limitado por placas estacionarias. El calor es transmitido por conducción hacia el líquido que es parcialmente concentrado en el espacio comprendido entre los rodillos. El líquido concentrado desciende formando una capa viscosa que recubre el resto de la superficie de los tambores. Prácticamente todo el líquido se vaporiza al girar los tambores, dejando una delgada capa de material seco que es retirado mediante cuchillas rascadoras y cae en los transportadores situados debajo. La humedad evaporada se recoge y retira a través de la campana situada encima de los tambores.

Los secadores de doble tambor son eficaces con disoluciones diluidas, disoluciones concentradas de materiales muy solubles, así como con suspensiones de partículas relativamente finas. No son adecuados para disoluciones de sales de solubilidad baja o para suspensiones de sólidos abrasivos que sedimentan y crean una presión excesiva entre los tambores.

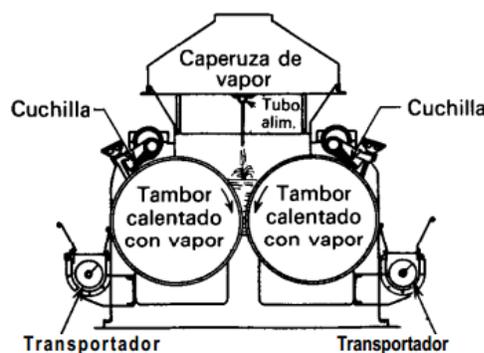


Figura 2.9 Secador de tambor.

2.1.2.5 Secadores de lecho fluidizado

Los secadores en los que los sólidos están fluidizados por el gas de secado se utilizan en diversos problemas de secado. Las partículas son fluidizadas con aire o gas en una unidad de lecho hirviente.

La mezcla y transmisión de calor son muy rápidas. La alimentación húmeda se introduce

por la parte superior del lecho, el producto seco se retira lateralmente cerca del fondo. Algunos secadores de lecho poseen compartimientos fluidizados separados, a través de los cuales pasan secuencialmente los sólidos desde la entrada hasta la salida. Reciben el nombre de “secadores de flujo pistón” y en ellos el tiempo de residencia es casi el mismo para todas las partículas. Las condiciones de secado se pueden variar de un comportamiento a otro, y con frecuencia el último comportamiento está fluidizado con gas frío, con el fin de enfriar los sólidos antes de la descarga.

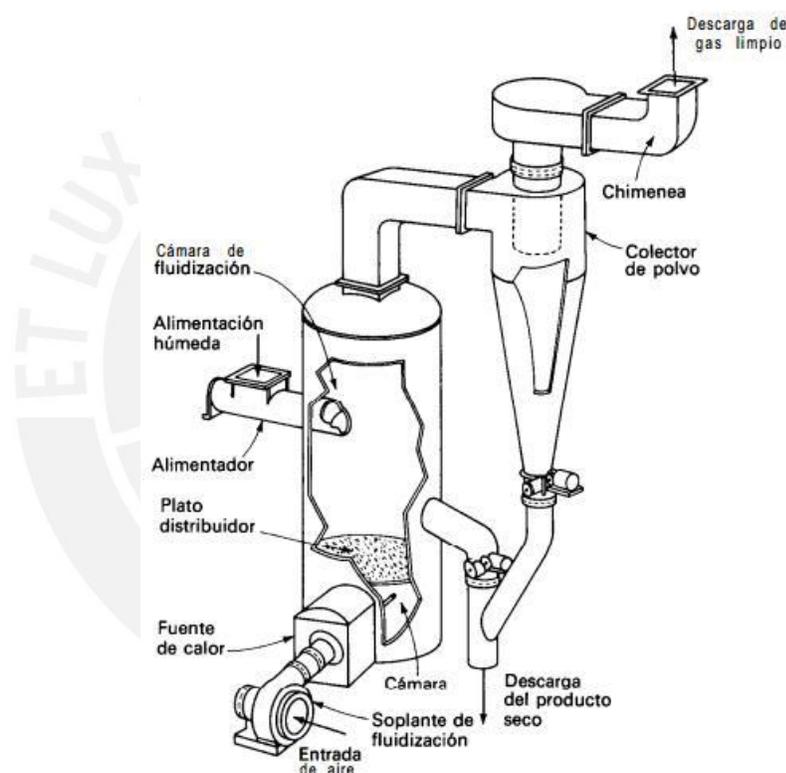


Figura 2.10 Secador de lecho fluidizado.

2.1.3 Análisis del proceso de deshidratación del cacao

En esta sección se expondrán los resultados en forma de gráficas o tablas de algunos estudios realizados para la deshidratación artificial del cacao.

2.1.3.1 Resultados de una modelación matemática sobre la base del modelo Thompson para el secado de cualquier grano ⁵

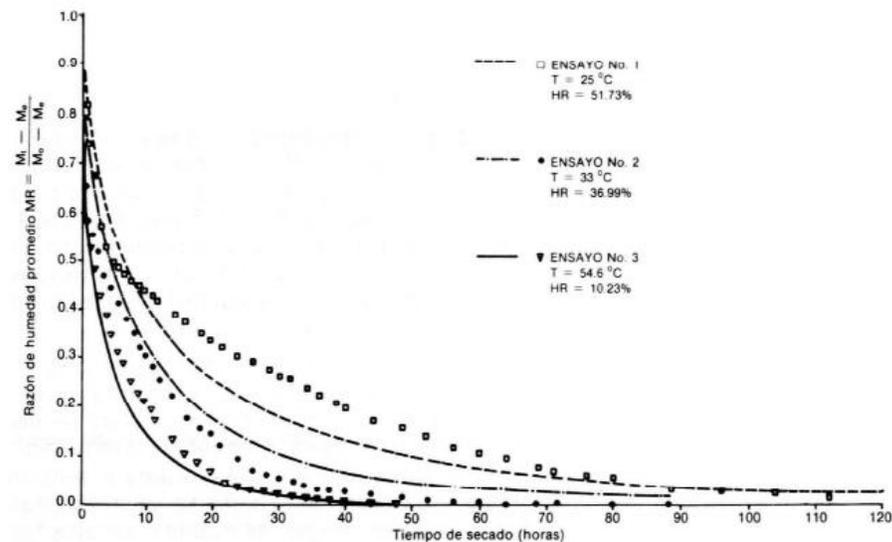


Figura 2.11 Razón de humedad promedio vs tiempo de secado

Dónde:

MR: Contenido de humedad del producto

M_1 : Contenido de humedad final del producto

M_e : Contenido de humedad de equilibrio

M_0 : Contenido de humedad inicial del producto

2.1.3.2 Pruebas de secado experimental y análisis computacional utilizando el método de elementos finitos para estudiar el proceso de secado

Experiencia realizada para una temperatura de 55°C

⁵ <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/viewFile/24483/25074>

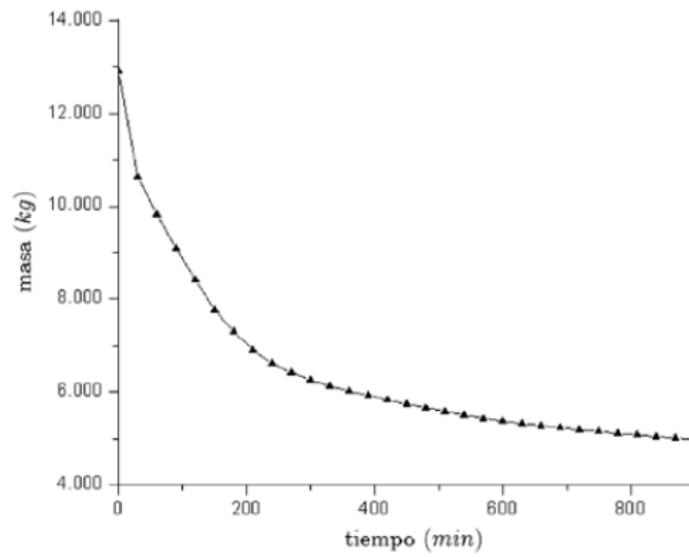


Figura 2.12 Variación de la masa de los granos con el tiempo

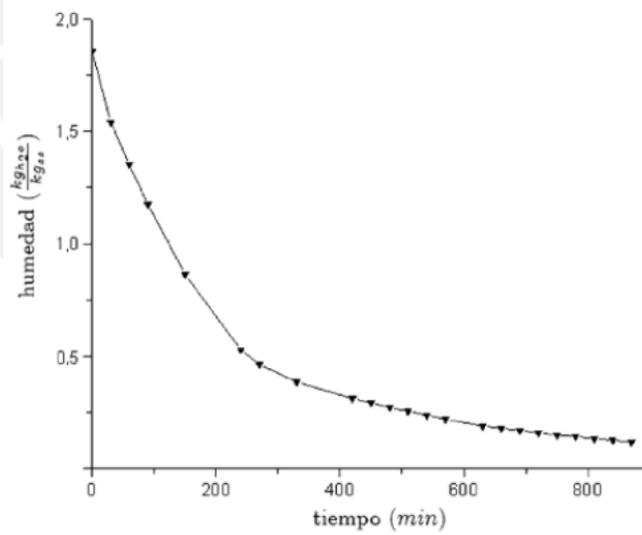


Figura 2.14 Variación de la humedad de los granos con el tiempo

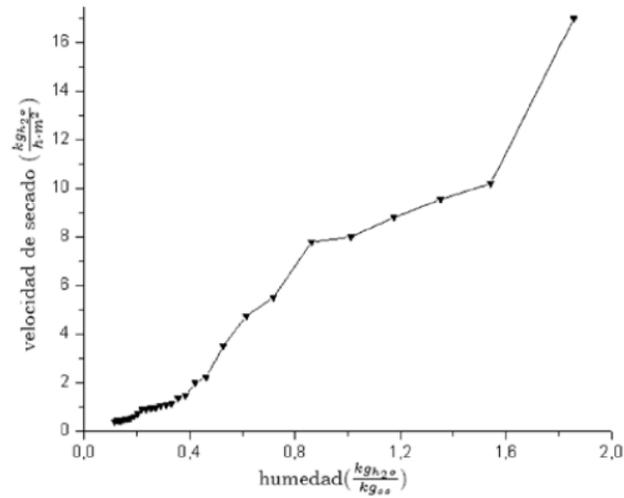


Figura 2.15 Velocidad de Secado

2.1.3.3 Efecto de la temperatura de secado y la velocidad del aire en la relación de secado y constante de secado del grano de cacao⁶

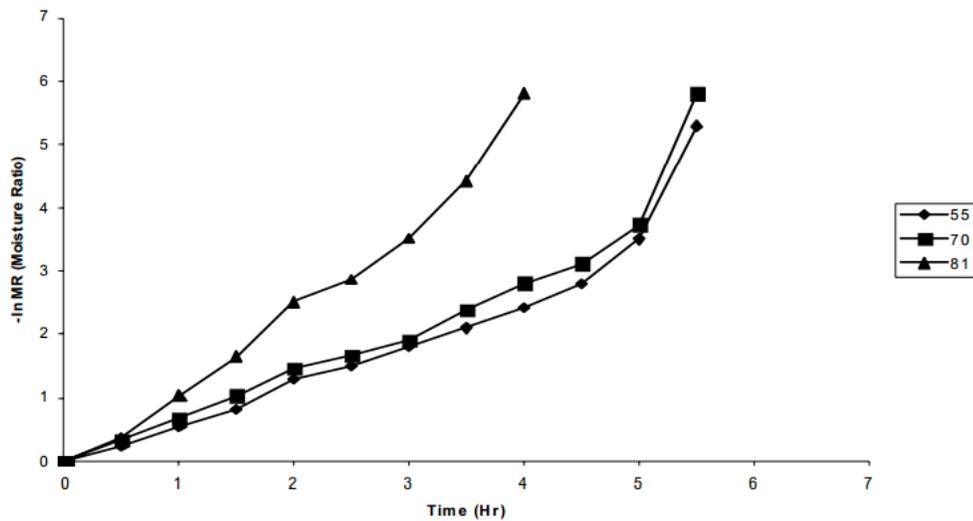


Figura 2.17 Tiempo de secado vs relación de humedad, velocidad del aire 2.51m/s

⁶ <http://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1091/1172>

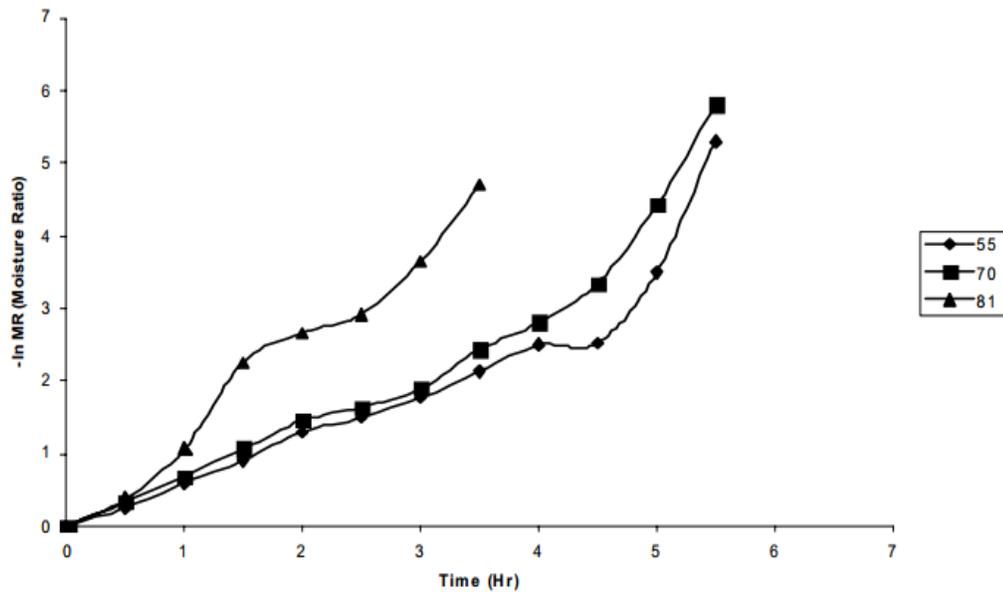


Figura 2.18 Tiempo de secado vs relación de humedad, velocidad del aire 3.7m/s

Tabla 2.1 Relación de Secado Calculado a diferentes velocidades del aire y temperatura de secado de aire (kg / h)

Time, h	V=1.3 m/s			V=2.51 m/s			V=3.7 m/s		
	55°C	70°C	81°C	55°C	70°C	81°C	55°C	70°C	81°C
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	0.60	0.75	0.81	0.65	0.78	0.81	0.66	0.79	0.83
1.00	0.38	0.40	0.60	0.40	0.50	0.63	0.44	0.61	0.65
1.50	0.21	0.23	0.035	0.24	0.32	0.40	0.27	0.32	0.44
2.00	0.15	0.17	0.19	0.16	0.20	0.20	0.18	0.25	0.31
2.50	0.10	0.11	0.14	0.10	0.15	0.16	0.12	0.19	0.19
3.00	0.08	0.09	0.10	0.09	0.12	0.14	0.10	0.13	0.14
3.50	0.04	0.05	0.08	0.04	0.07	0.09	0.09	0.09	0.10
4.00	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	0.08	0.05	0.07	0.10
4.50	0.02	0.02	0.06	0.023	0.02		0.025	0.03	
5.00	0.02	0.02		0.02	0.02		0.02	0.03	
5.50	0.01	0.01		0.01	0.015		0.01	0.02	
6.00	0.01	0.01		0.01					

2.1.3.4 Programa estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología para la cadena agroindustrial del cacao en México.⁷

Tabla 2.2 Eficiencia de los diversos sistemas de secado del cacao en Tabasco

SISTEMA	HORAS	VOLUMEN
Al sol	72-120	3 toneladas
Cilindros rotatorios	22-30	3 toneladas
Samoa-diesel	16-20	3 toneladas
Samoa-gas	18	5 toneladas

2.1.4 Generación del aire para el secado

El secado se realizará a través del uso de aire precalentado. Para la generación del aire se evaluará el uso de ventiladores y sopladores.

Se define como ventilador al dispositivo que, mediante la creación de una presión diferencial a través del intercambio de momento angular entre los álabes del rotor y las partículas de aire o gas, desarrolla flujo en un fluido gaseoso.

El fluido gaseoso movido por un ventilador, es con frecuencia aire y/o humos tóxicos, mientras que un soplador puede transportar una mezcla de aire y partículas.

Los sopladores son similares a los ventiladores excepto que pueden producir una mayor presión estática. Algunas veces la alta presión se alcanza usando una disposición con rotores de múltiples etapas.

Los Ventiladores se usan ampliamente en aplicaciones industriales y comerciales tales como transporte neumático de materiales, ventilación, calderas, refrigeración, colección de polvo, enfriamiento y otros.

(Referencia: Material del curso Turbo máquinas y máquinas de desplazamiento positivos elaborado por el profesor Arturo Mendoza)

⁷ <http://www.cofupro.org.mx/cofupro/Publicacion/Archivos/penit94.pdf> pág. 20

2.1.5 Generación de calor para calentar el aire

Para conseguir el secado de cacao se utilizará la convección forzada para calentar el aire y deberá hacerse de manera que al contacto con la almendra, esta no se vea contaminada, afectando su calidad.

2.1.5.1 Gases de combustión

El calor se produce a través de la combustión del combustible, y por medio de un intercambiador de calor se evita que los subproductos de la combustión ingresen a la corriente de aire. Es necesario el uso de un quemador y la ignición es proporcionada por una chispa eléctrica.

La desventaja de este método es la baja eficiencia en la transmisión de calor debido al bajo calor específico de los gases.

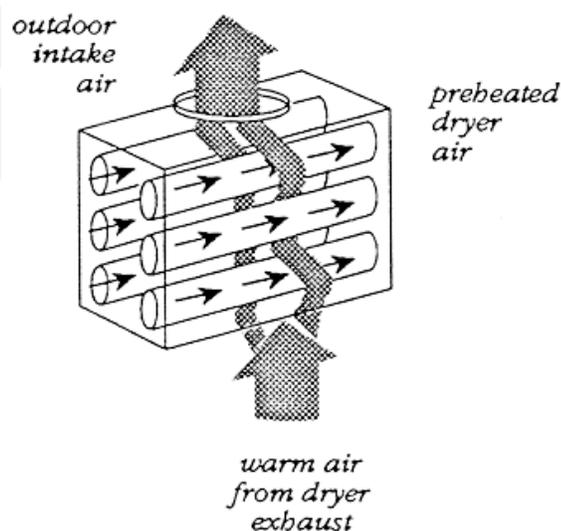


Figura 2.19 Intercambiador de calor

2.1.5.2 Energía eléctrica

Un elemento de calentamiento eléctrico (resistencia eléctrica) calienta el aire. Por medio de un termostato se controla el requerimiento de calor así, el ventilador y la resistencia se encienden paralelamente de acuerdo a la necesidad.

Tiene las ventajas de no producir emisiones en sitio, no presentar fuga (gases), previniendo explosiones, y evita la preocupación de un posible envenenamiento por monóxido de carbono. Además son de funcionamiento silencioso y requieren poco mantenimiento.

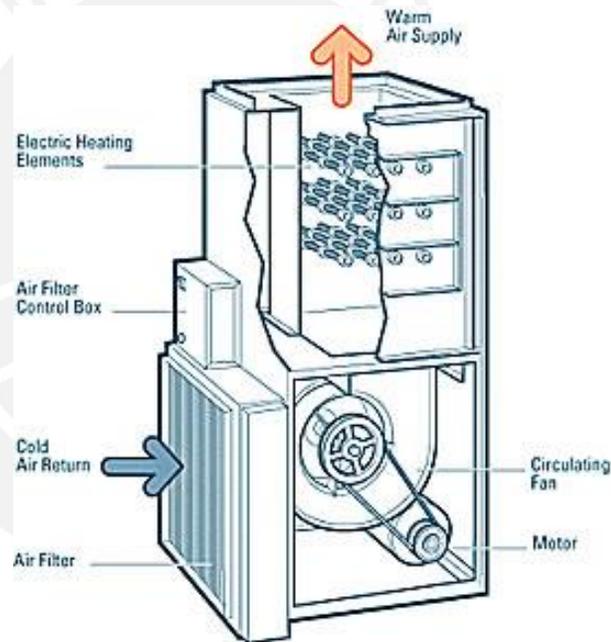


Figura 2.20 Calentador de Aire Eléctrico

2.1.5.3 Vapor sobresaturado

El calor es generado por medio de un caldero, y el vapor viaja a través de tuberías hacia el intercambiador de calor que calentará el aire. La fuente de calor es cualquiera de los diversos combustibles, tales como madera, carbón, petróleo o gas natural. También existen calderas de vapor eléctricas que utilizan elementos de calentamiento de resistencia de tipo de inmersión.

Entre las desventajas de esta opción esta la necesidad de tener un tanque de almacenamiento de combustible (para las calderas que utilizan combustible), el requerimiento de un ablandador de agua y de una bomba de alimentación. También es necesario un sistema de tuberías de alimentación de vapor y del agua de alimentación.

2.2 Método diseño

En la presente sección se seguirá la metodología de diseño aplicada en los cursos de Proyecto en Ingeniería Mecánica 1 y 2.

El objetivo principal es el de conseguir un secado del cacao hasta un rango de 12% -15% de contenido de humedad en el grano de cacao, siendo el punto de vigencia el aumento en la demanda de éste producto tanto en el mercado interno como en su exportación. Teniendo claros los objetivos y problemática del proyecto se presentarán a continuación los siguientes puntos:

- Lista de Exigencias.
- Estructura de Funciones.
- Matriz Morfológica.
- Conceptos de Solución.
- Valoración técnico-económica.

2.2.1 Lista de exigencias

Se resumen los requerimientos más importantes y funciona como un contrato entre el diseñador y el cliente. Aquí se registra la aprobación de ambas partes sobre las exigencias y especificaciones del diseño.

Se detallan en este documento el título del proyecto, La fecha de modificación, El deseo o exigencia ya sea de montaje o de operación, descripción en caso de ser necesaria, y el responsable quien verá que se cumpla lo establecido.

Tabla 2.3 Lista de Exigencias (elaboración propia)

LISTA DE EXIGENCIAS			Página 1 de 2
			Versión 4.0
Proyecto:	SECADORA DE CACAO PARA ALMACENAJE CON CAPACIDAD DE 20 T/DIA		10/12/2014
			Revisado por: L.C.Z
Cliente:	Pontificia Universidad Católica del Perú		Elaborado por: J.A.C
EXIGENCIA	DENOMINACIÓN	VALORES y/o ACOTACIONES	RESPONSABLE
Exigencias de la máquina			
EF	Capacidad de 2 T/día	La secadora deberá procesar 2T/día con una alimentación por discontinua.	J.A.C
EF	Confiabilidad en las fuentes de energía para el secado	El calor será generado de manera que no contamine el producto, afectando su calidad.	J.A.C
EF	El secado será realizado con aire precalentado	La temperatura estará en un rango de entre 55°C y 80°C	J.A.C
EF	Humedad final dentro de los parámetros óptimos para almacenamiento	La humedad final de producto estará entre 12% - 15%	J.A.C
EA	Secado uniforme	La humedad final será la misma para todo el batch, evitando así que le producto salga quemado o se vea afectado por hongos y moho.	J.A.C
EA	Confiabilidad en los procesos.	La integridad física del producto no deberá verse afectada en ninguna etapa del proceso, incluyendo la alimentación y descarga.	J.A.C

Tabla 2.3 (continuación)

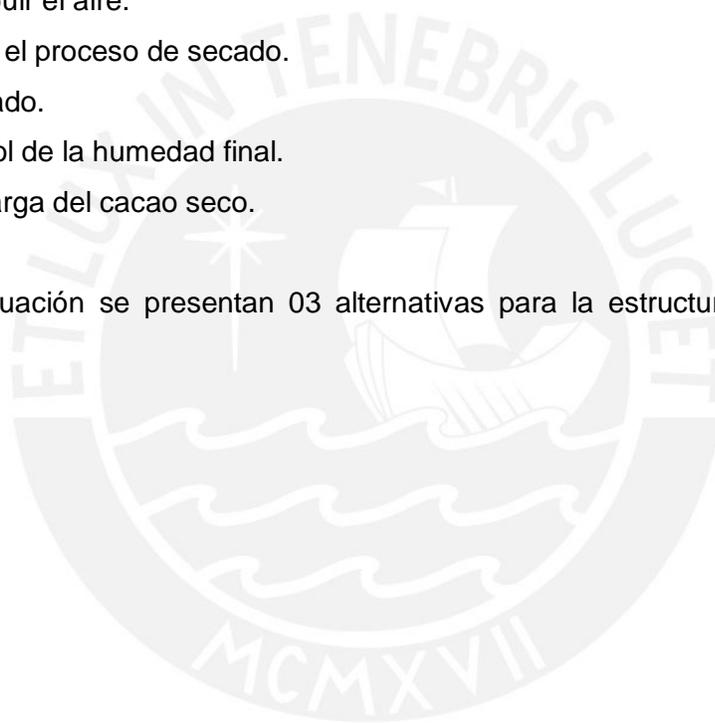
LISTA DE EXIGENCIAS			Página 2 de 2
			Versión 4.0
Proyecto:	SECADORA DE CACAO PARA ALMACENAJE CON CAPACIDAD DE 20 T/DIA		10/12/2014
Cliente:	Pontificia Universidad Católica del Perú		Revisado por: L.C.Z
			Elaborado por: J.A.C
EXIGENCIA	DENOMINACIÓN	VALORES y/o ACOTACIONES	RESPONSABLE
Exigencias de la máquina			
EM	Sencillez en el uso de la máquina.	Requerimiento mínimo en capacitación de operarios.	J.A.C
EB	Que no dañe el medio ambiente.	Adecuado control de Residuos.	J.A.C
EM	La secadora estará preparada para trabajar en diversas condiciones.	Climas en la costa peruana.	J.A.C
EM	Evita ruidos molestos.	Se desea que el equipo no genere alto nivel de ruido debido al funcionamiento.	J.A.C
EF	Seguridad del operario		J.A.C
EA	Diseño ergonómico	Tanto en la alimentación como en la descarga.	J.A.C
EF	Lubricación	Los elementos que necesiten lubricación usarán productos que no contaminen los granos de cacao.	J.A.C

2.2.2 Estructura de funciones

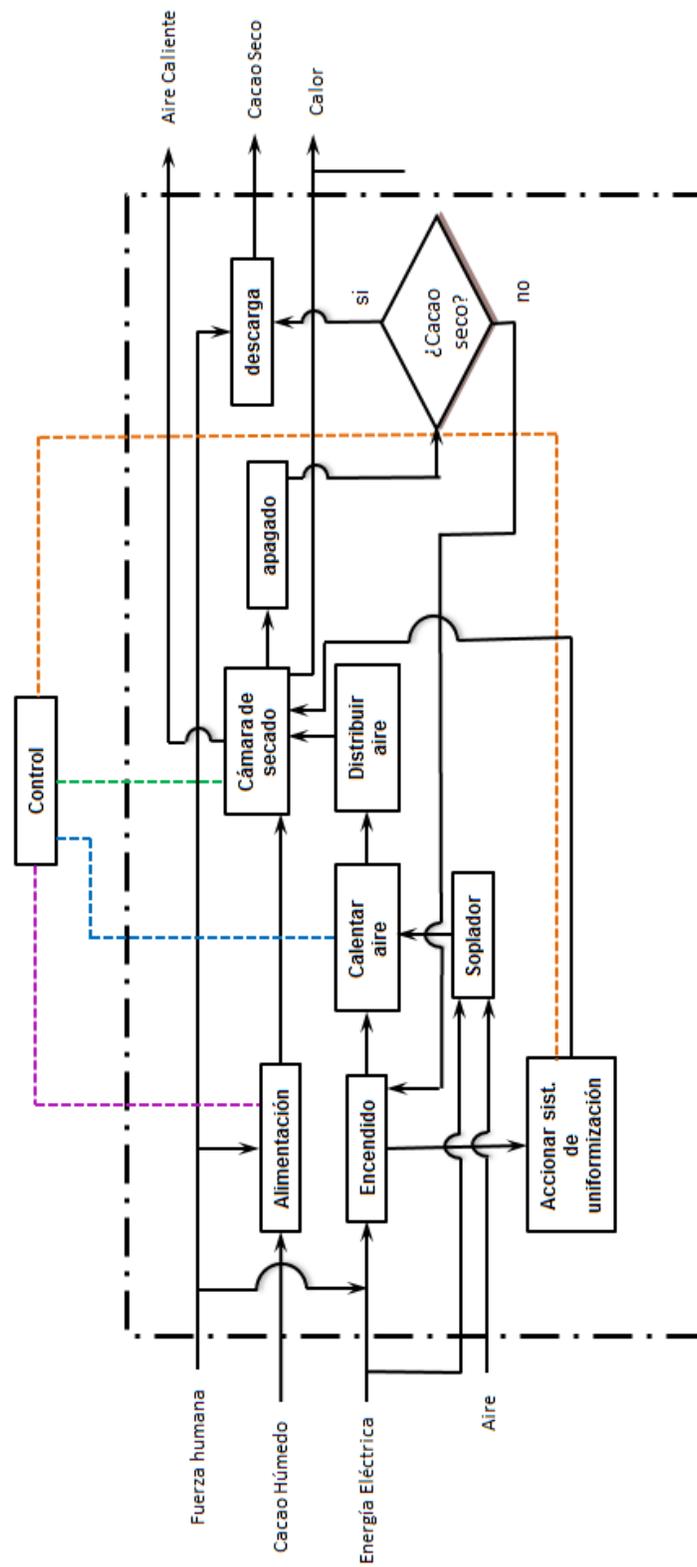
Se determinan las siguientes funciones principales:

1. Alimentar a la máquina de cacao húmedo.
2. Se acciona el sistema de uniformizado.
3. Encender el soplador o ventilador.
4. Calentar el aire.
5. Distribuir el aire.
6. Se da el proceso de secado.
7. Apagado.
8. Control de la humedad final.
9. Descarga del cacao seco.

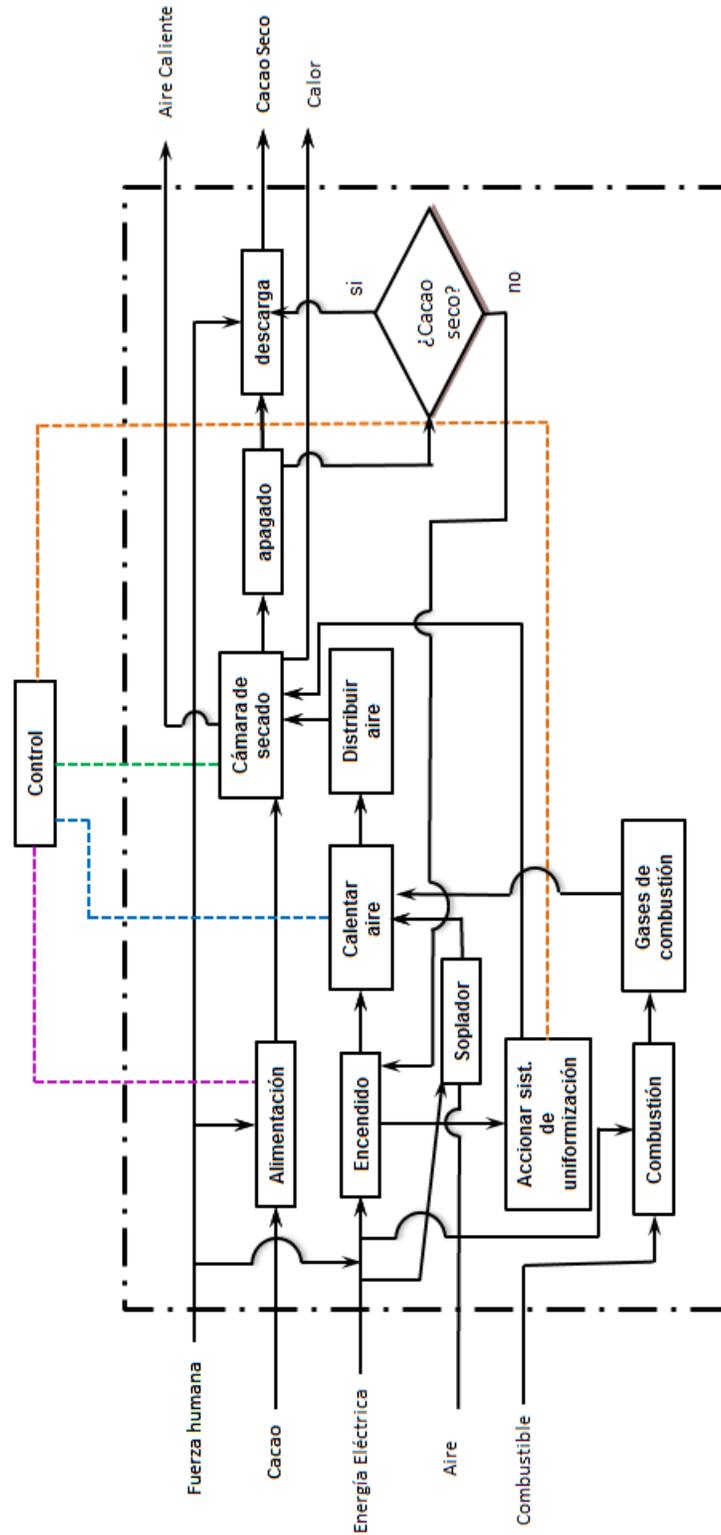
A continuación se presentan 03 alternativas para la estructura de funciones de forma gráfica.



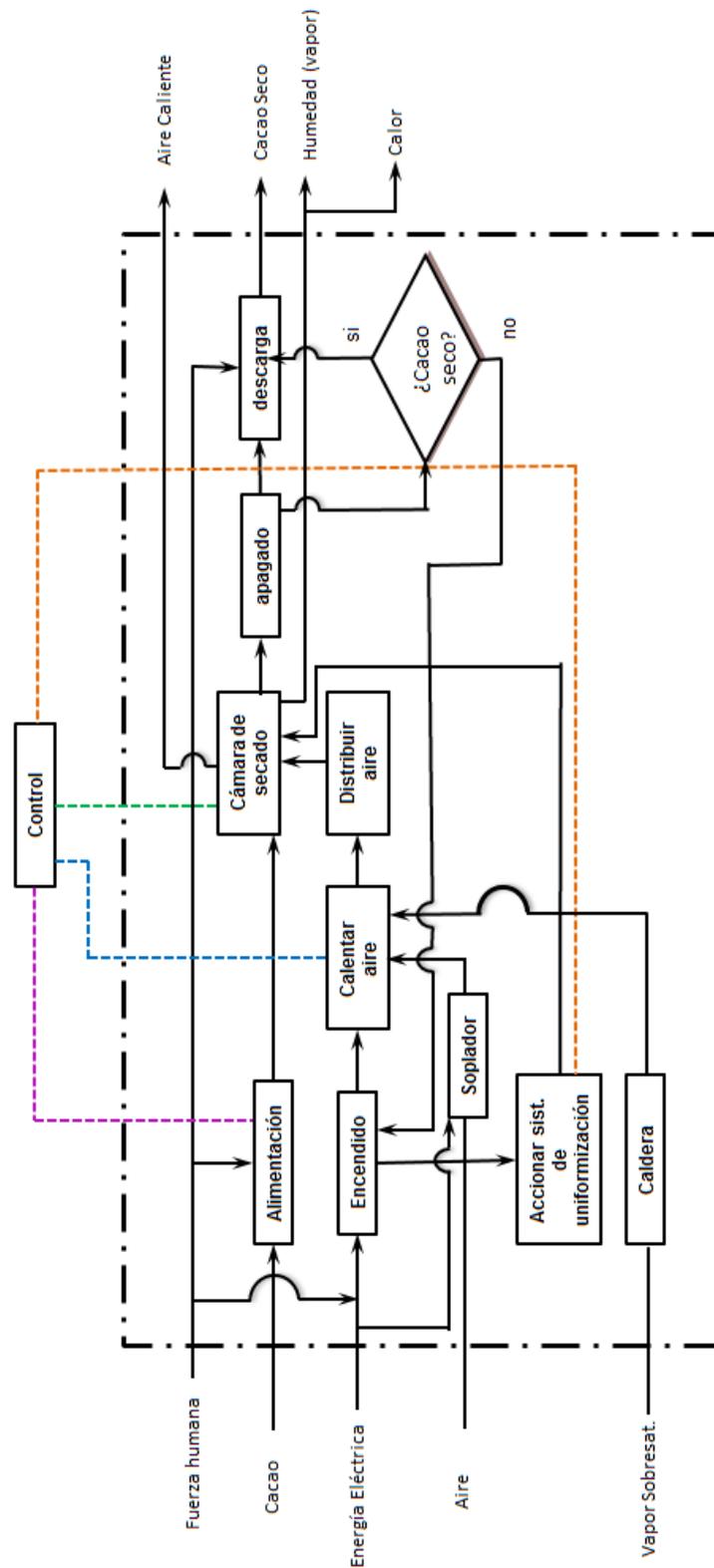
Estructura de Funciones 1 (Óptimo)



Estructura de Funciones 2

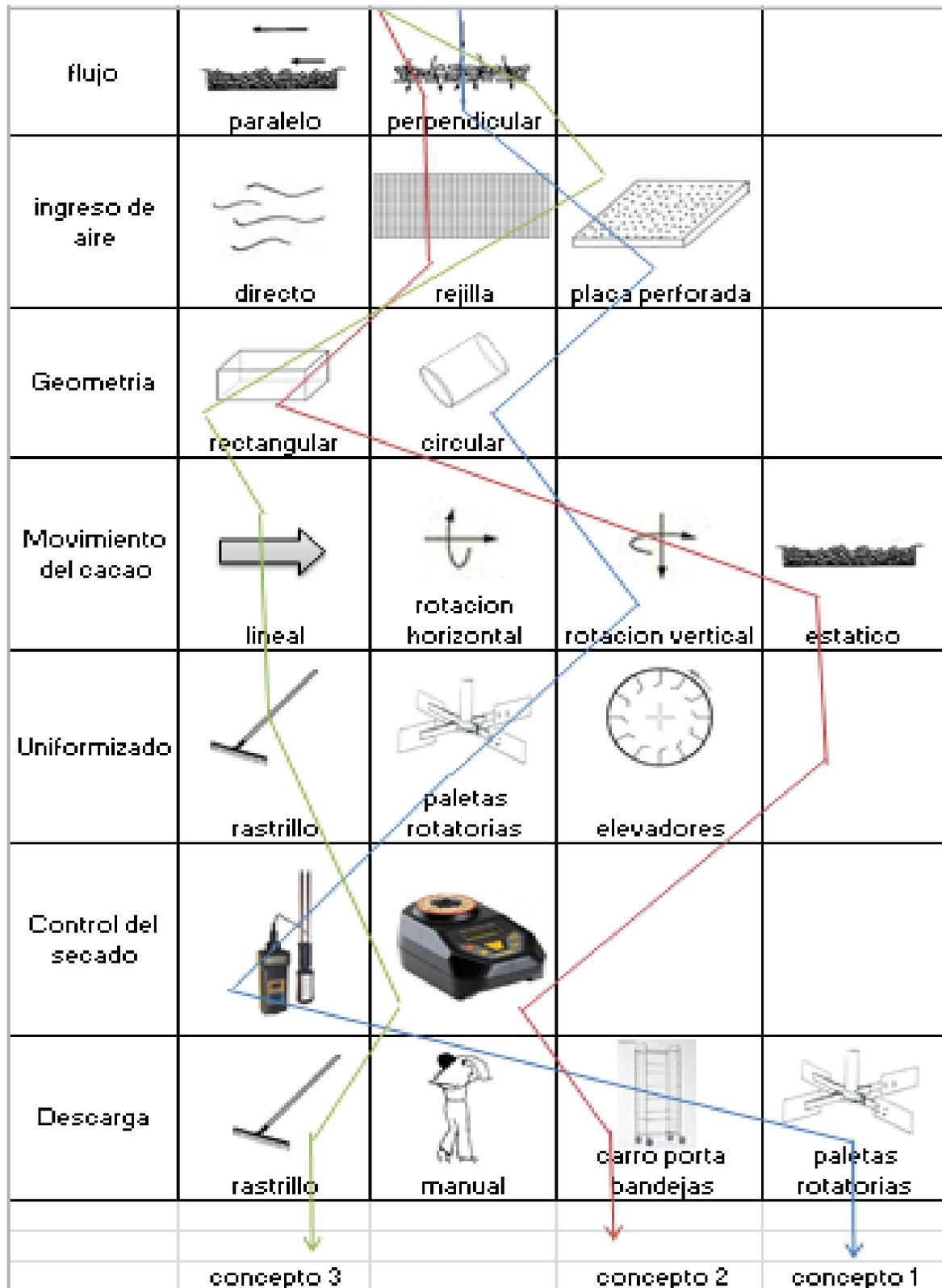


Estructura de Funciones 3



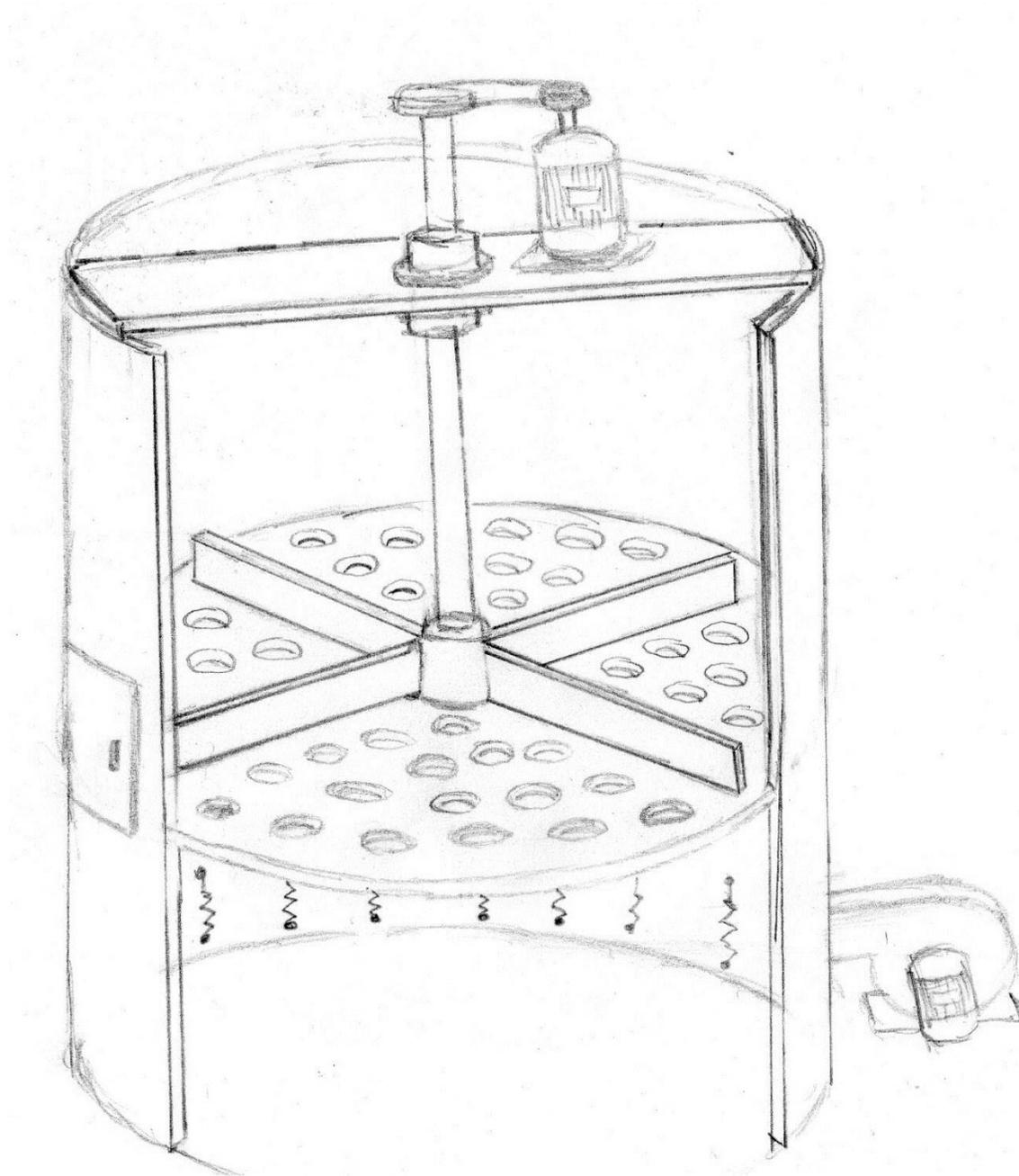
2.2.3 Matriz morfológica

Funciones Parciales	A	B	C	D
Alimentación de cacao	 manual	 carro porta bandejas	 faja	tornillo
numero de camas	una	múltiples		
espesor de cama	 delgada	 gruesa		
Producción de aire	soplador	ventilador axial		
Energía para calor	 resistencias electricas	 combustible	 vapor sobresaturado	
calentamiento	 intercambiador de calor	 contacto directo		

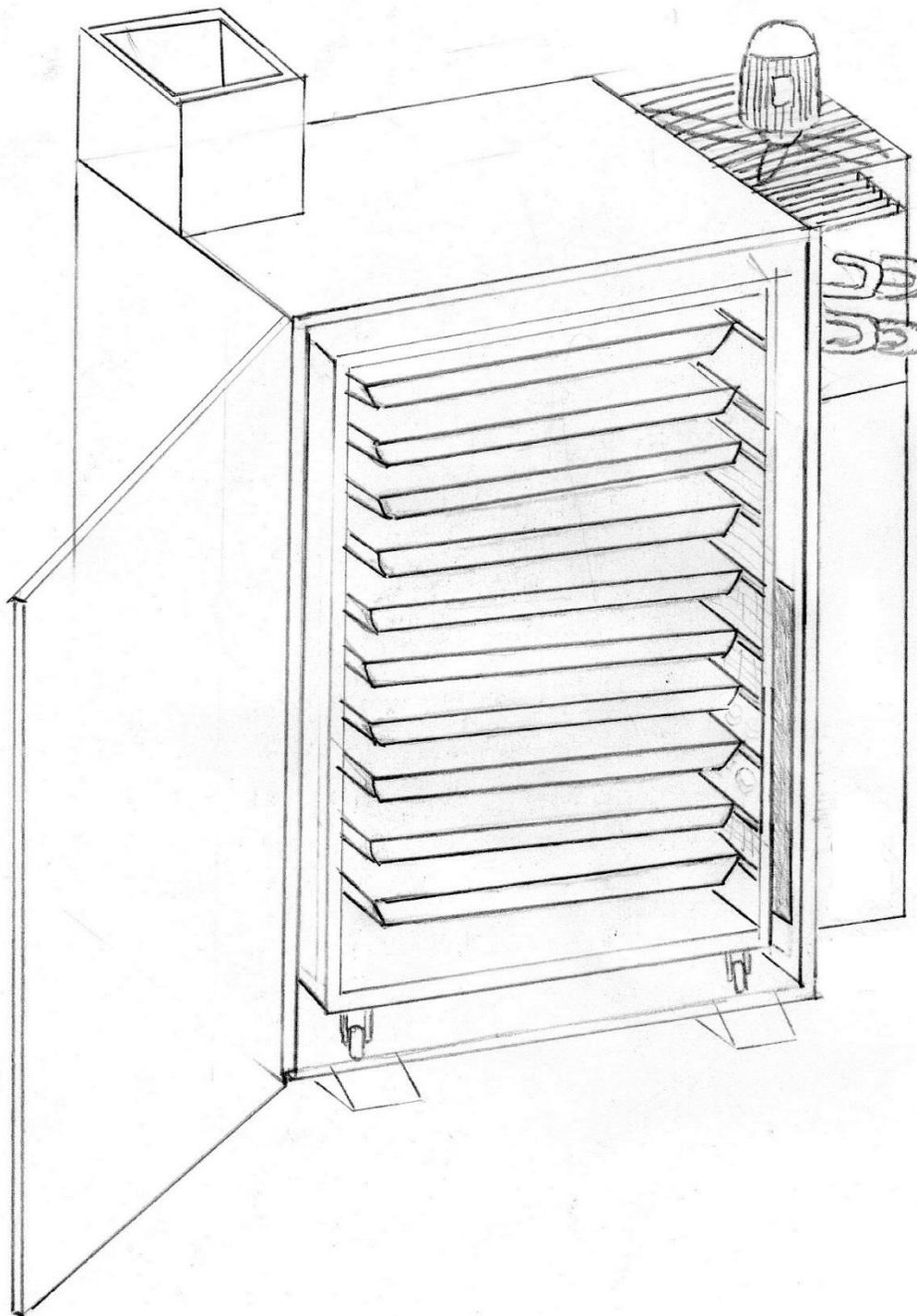


2.2.4 Conceptos de solución

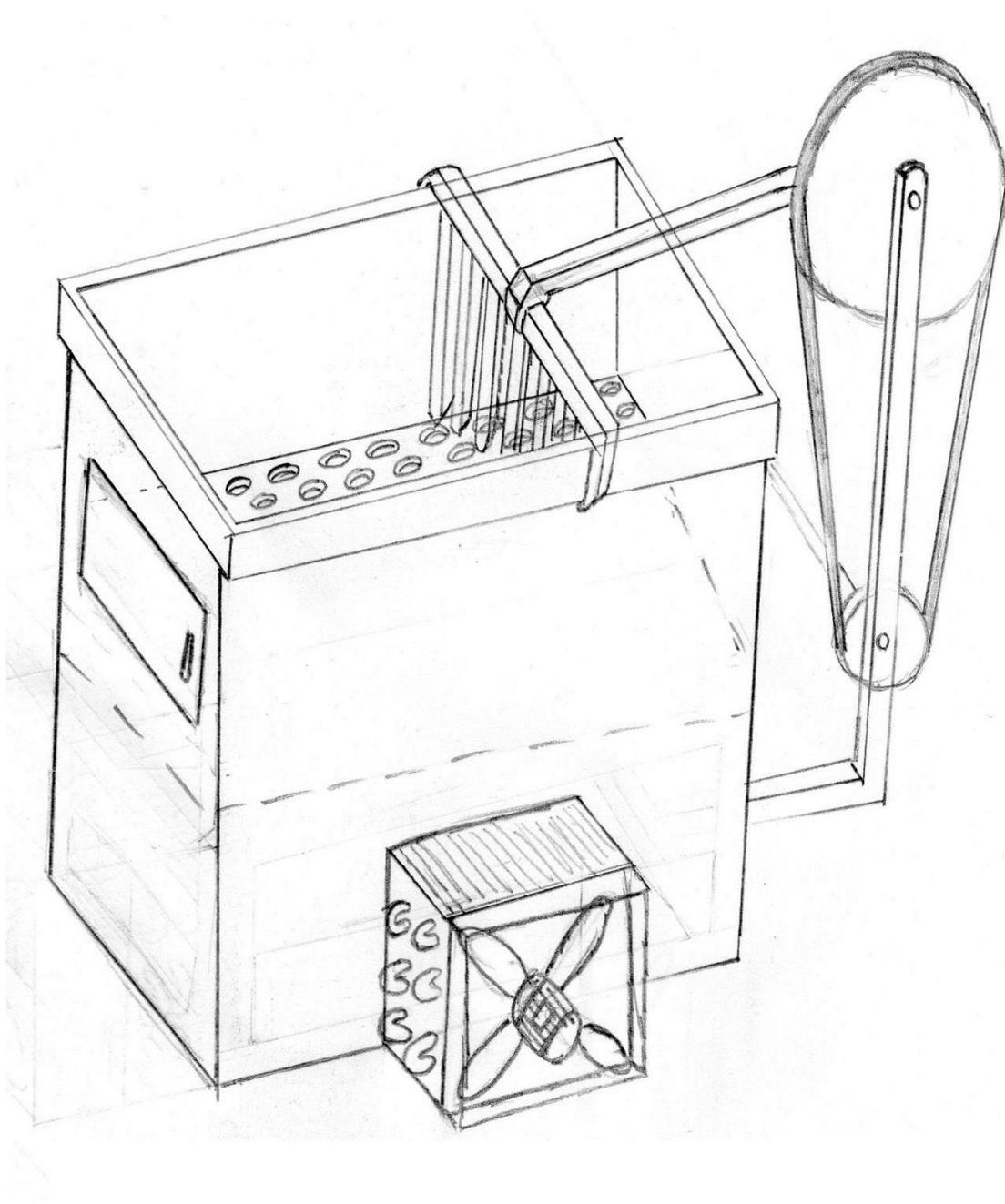
- Concepto 1 (Óptima)



- Concepto 2



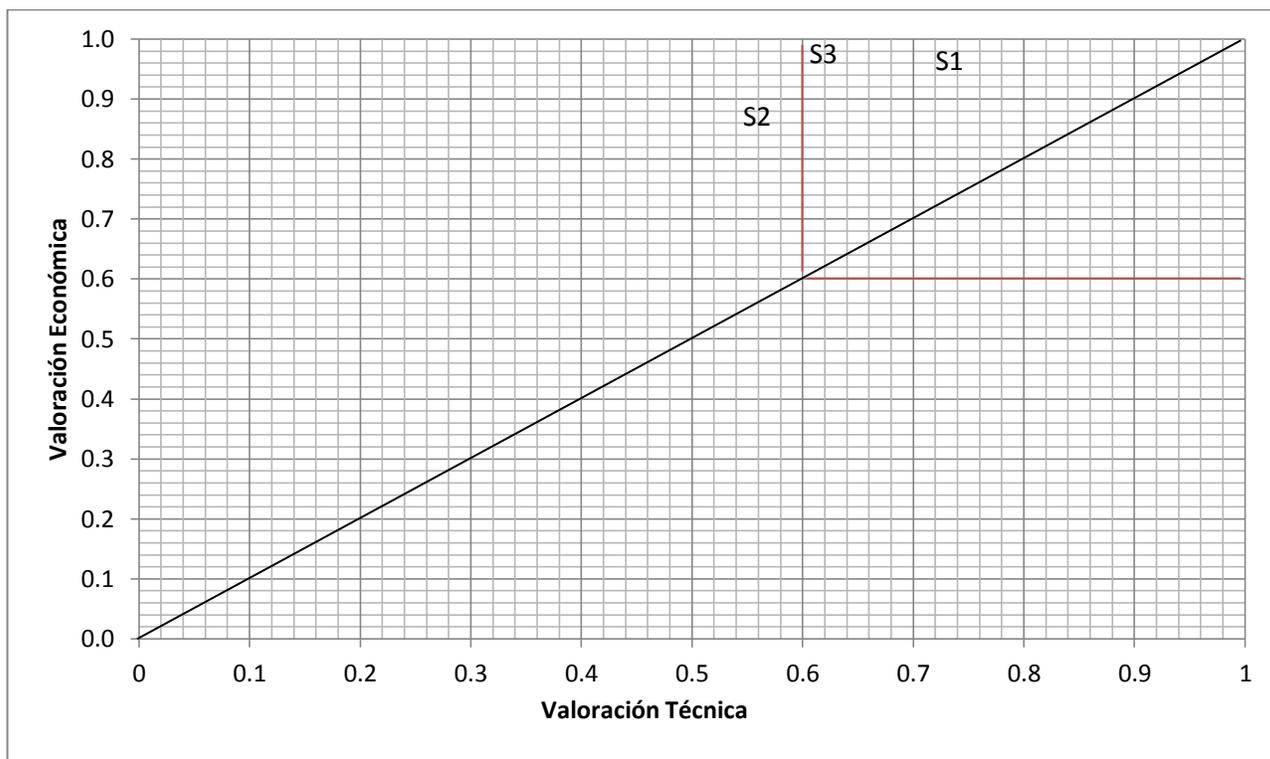
- Concepto 3



2.2.5 Valoración técnico-económica

PROPIEDAD TÉCNICA	PROYECTO			
	1	2	3	IDEAL
FUNCIÓN	2	2	2	4
FORMA	3	3	3	4
DISEÑO	3	3	2	4
SEGURIDAD	3	2	3	4
ERGONOMÍA	3	2	3	4
FABRICACIÓN	3	3	2	4
CONTROL DE CALIDAD	2	2	3	4
MONTAJE	3	2	2	4
USO	3	3	3	4
MANTENIMIENTO	3	2	2	4
TOTALES	28	24	25	40
PORCENTAJE	70	60	62.5	

PROPIEDAD ECONÓMICA	PROYECTO			
	1	2	3	IDEAL
COSTO DE MATERIAL	8	9	8	7
COSTO DE FABRICACIÓN	8	8	8	7
COSTO DE MANO DE OBRA	7	8	7	7
TOTALES	23	25	23	21
PORCENTAJE	91.3	84.0	91.3	



Se observa que el proyecto óptimo es el de la solución 1 (S1).

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO

En este capítulo se definirán los criterios para realizar el diseño del secador propuesto en el presente trabajo de investigación.

La revisión bibliográfica demuestra que para el dimensionamiento de secadores para cacao, los investigadores enfocan los esfuerzos para sus diseños en tres grandes aspectos:

1. La mecánica de la transferencia de calor para evaporar el contenido líquido presente en el cacao y la mecánica de la transferencia de masa que se lleva en el interior del grano de cacao también para evaporar su contenido de líquido; ambos procesos suceden en forma simultánea y son independientes al tipo de secador que se pretenda dimensionar y diseñar.
2. Los requerimientos termodinámicos que son aplicados una vez definidas las variables importantes de la cinética del proceso de secado. Estos requerimientos termodinámicos están vinculados a la aplicación de las leyes de conservación de masa y energía (principios termodinámicos) y a los fenómenos de transferencia de calor que permitirán definir que equipos son necesarios para que el secador cumpla con los requerimientos para los cuales debe operar obteniendo el producto en las condiciones para las cuales se ha concebido su diseño.
3. El aspecto relacionado netamente al dimensionamiento de los equipos basados en los dos aspectos anteriores.

En el aspecto que involucra el fenómeno propiamente dicho del secado, asociado a la cinética del secado, se abordan conceptos de operaciones unitarias referentes al secado por aire caliente donde se definen las variables para el tiempo de secado, las isotermas de sorción, la temperatura del producto durante el secado y el contenido de humedad crítica; lo anterior en conjunto con los datos de entrada permitirá cuantificar las especificaciones iniciales del diseño del secador.

3.1 Secado por aire caliente

El secado es una operación en la que se busca reducir el contenido de agua en un producto, hasta que alcance una humedad que permita su almacenamiento por largos periodos de tiempo en condiciones adecuadas para mantener sus propiedades características.

3.1.1 Parámetros de secado

3.1.1.1 Psicrometría

El caso más importante de las mezclas gas-vapor lo constituye el aire húmedo o aire atmosférico, que es una mezcla de aire seco y vapor de agua. Los procesos en los que interviene el aire húmedo tienen una gran importancia en meteorología, así como en los casos particulares del aire acondicionado y del secado. Para poder entender este fenómeno es necesario definir los siguientes términos⁸:

3.1.1.1.1 Humedad Relativa (ϕ)

Es el cociente de la presión parcial del vapor en la mezcla (p_v), entre la presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla (p_s).

$$\phi = \frac{p_v}{p_s} = \frac{m_v}{m_g} \quad (3.1)$$

3.1.1.1.2 Humedad absoluta o específica (X)

Se define como: "el cociente entre la masa de vapor (m_v) y la masa de gas seco (m_g)".

$$X = \frac{m_v}{m_a} \quad (3.2)$$

$$X = 0.622 \frac{p_v}{p_s} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622\phi \frac{p_s}{p - p_s} \quad (3.3)$$

⁸ Tamashiro Javier, Apuntes de Clases "Termodinámica 1" (2011). PUCP

3.1.1.1.3 Temperatura de Bulbo Seco (TBS)

Temperatura que indicaría un termómetro al ser colocado en una mezcla. Es la temperatura ordinaria del aire atmosférico.

3.1.1.1.4 Temperatura de Bulbo Húmedo (TBH)

Temperatura indicada por un termómetro que tiene su bulbo sensor humedecido e inmerso en una corriente de aire húmedo.

En el caso del aire atmosférico (o aire ambiente o aire húmedo) la temperatura de bulbo húmedo es, para todos los propósitos prácticos, igual a la temperatura de saturación adiabática.

3.1.1.2 Transferencia de Calor

Durante el secado se produce la transmisión de calor para evaporar el líquido y la transferencia de masas entre el cuerpo secado y el aire.

La transferencia de calor se realiza entre dos puntos o regiones a distintas temperaturas, de tres maneras diferentes⁹:

3.1.1.2.1 Conducción

Es la transmisión de calor a través de un medio sólido, líquido o gaseoso, debido al movimiento de las moléculas. El flujo de calor por conducción está dado por la siguiente expresión:

$$\dot{q}_k = -kA\left[\frac{dT}{dx}\right] \quad (3.4)$$

Dónde: \dot{q}_k : flujo de calor por conducción, en W

A: Área de la superficie de transferencia de calor, en m²

⁹ CRUZ R., JUAN, "Transferencia de calor: Guía para la exposición en aula", PUCP, Lima, 2012.

dT/dx : Gradiente de temperatura en la dirección x , en $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$

k : Conductividad térmica del material, en $\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$

3.1.1.2.2 Convección

Es la Transmisión de calor que tiene lugar entre una superficie y un fluido en movimiento en contacto con ella. El flujo de calor está dado por la siguiente expresión:

$$\dot{q}_c = h_c A (T_s - T_{\infty}) \quad (3.5)$$

Dónde: \dot{q}_c : flujo de calor por convección, en W

h_c : Coeficiente de transmisión de calor por convección, en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}}$

A : Área de la superficie de transferencia de calor, en m^2

T_s : Temperatura de la superficie, en $^{\circ}\text{C}$

T_{∞} : Temperatura de referencia en el fluido, en $^{\circ}\text{C}$

3.1.1.2.3 Radiación

Generalmente el calor por radiación puede ser despreciado cuando la temperatura de trabajo se encuentra debajo de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, pues su valor no es significativo.¹⁰

3.1.1.3 Características del grano

3.1.1.3.1 Contenido de humedad en base húmeda

Es la fracción de agua contenida en el sólido al sólido húmedo y se define por la siguiente expresión:

$$X_h = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (3.6)$$

¹⁰ KUNII, D., LEVENSPIEL, O., "Fluidization Engineering". 4th Edition, Florida, R. Krieger Publishing Company INC, 1987. P.245

Dónde: m_w : masa de agua contenida en el sólido, en kg

m_s : masa de materia seca, en kg

3.1.1.3.2 Contenido de humedad en base seca

Es el porcentaje entre la cantidad de agua al sólido seco y se define por la siguiente expresión:

$$X_s = \frac{m_w}{m_s} * 100 \quad (3.7)$$

3.1.1.3.3 Humedad de equilibrio

Es la humedad que se obtiene cuando se alcanza el equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire.

3.1.1.3.4 Humedad crítica

Es el punto en el que ocurre el cambio entre las etapas de velocidad de secado constante y velocidad de secado decreciente.

3.1.1.3.5 Calor latente de vaporización del agua contenida en los granos

Es la energía requerida para realizar un cambio de fase. Se han desarrollado muchos modelos matemáticos que permiten dimensionar el calor latente¹¹. Trejos (1986), a partir de las isotermas de equilibrio higroscópico determinó la siguiente ecuación para café pergamino:

$$H_{fg} = (2502,4 - 2,42958 T)[1 + 1,44408 \cdot \text{Exp}(-21,5011X)] \quad (3.8)$$

¹¹ Alfonso Parra-Coronado, Gonzalo Roa-Mejía & Carlos E. Oliveros-Tascón. SECAFÉ Parte I: "Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental" v.12, n.4, pág.415–427, 2008

Dónde: T : temperatura en la superficie del producto, en °C

X : contenido de humedad del producto

Se sabe que el café y el cacao son frutos de familias cercanas, por lo que se utilizará esta ecuación para los cálculos correspondientes.

3.1.2 Tiempo de secado

Durante el secado existen dos etapas fundamentales¹²:

3.1.2.1 Periodo de velocidad constante (R_c)

En este periodo se produce una humectación más o menos completa de la superficie del producto y el secado se lleva a cabo por la evaporación sobre dicha superficie. La velocidad de secado está definida por la siguiente expresión:

$$R_c \geq \frac{h_c \cdot (T_a - T_s)}{H_{fg}} \quad (3.9)$$

Dónde: h_c : Coeficiente de transmisión de calor por convección, en $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

T_a : Temperatura de secado, en °C

T_s : Temperatura de la superficie, en °C

H_{fg} : Calor latente de vaporización del agua, en $\frac{KJ}{Kg}$

Para flujo de aire perpendicular a la superficie:

$$h_c = 4.2G^{0.37} \quad (3.10)$$

¹² TREYBAL, R. "operaciones de transferencia de masa", 2da edición, editado por McGraw-Hill, México. 1980, pág. 736-741

$$G = v_a * 3600 * \rho_a \quad (3.11)$$

Dónde: G : velocidad media del aire de secado, en $\frac{Kg}{m^2s}$

v_a : velocidad del aire, en $\frac{m}{s}$

ρ_a : densidad del aire, $1,2 \frac{Kg}{m^3}$

En este periodo el tiempo de secado obedece a la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{m_s(X_i - X_c)}{A_s R_c} \quad (3.12)$$

Dónde: x_i : humedad inicial del producto

x_c : humedad crítica

A_s : Área de secado, en m^2

3.1.2.2 Periodo de velocidad decreciente

Es este periodo la superficie del producto se encuentra totalmente seca, por lo que la velocidad de secado solo puede evaluarse por medio del proceso de transporte de la humedad desde el interior del sólido hacia su superficie. El contenido de humedad final del primer periodo es el contenido de humedad crítica y aunque no se conoce la variación de la velocidad durante esta etapa, se puede suponer que tiene una variación lineal hasta el final del proceso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_d \geq R_c \cdot \frac{x_f - x_e}{x_c - x_e} \quad (3.13)$$

Dónde: x_f : Humedad final del producto

x_e : humedad de equilibrio

De esta manera se puede determinar el tiempo de secado en el segundo periodo:

$$t_d = \frac{M_s(X_c - X_e)}{A_s R_c} \quad (3.14)$$

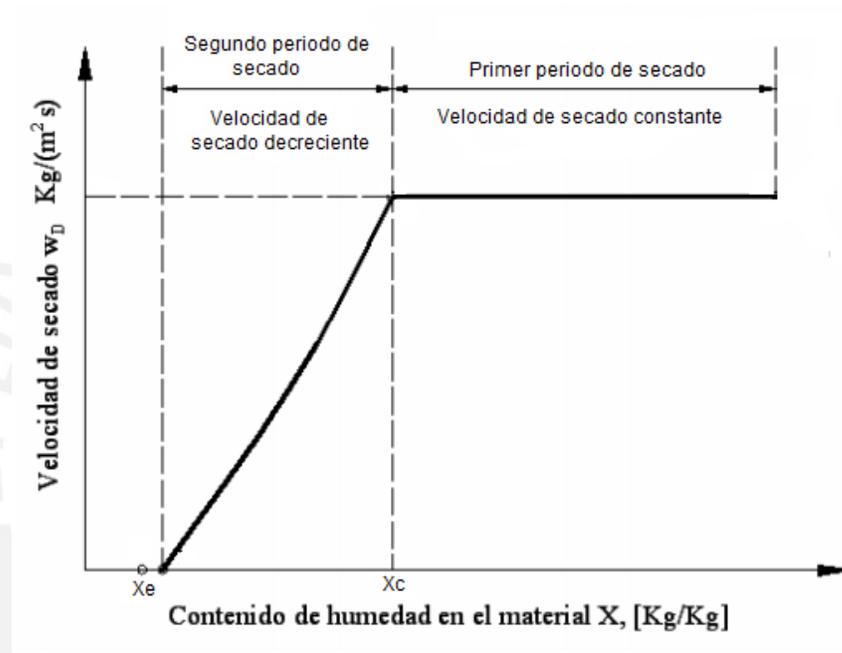


Figura 3.1. Curva de Velocidad de secado

(Adaptado de TREYBAL, R., 1980)

3.1.3 Isoterma de Sorción

La relación entre el porcentaje del líquido en el producto y el de su vapor a la presión de equilibrio, expresada por la humedad relativa del aire, se representa por las isotermas de sorción¹³, a una temperatura dada (Se supone que la tasa de pérdida de humedad de un producto rodeado por el aire a una humedad relativa particular, y la temperatura es proporcional a la diferencia entre la humedad del producto y su humedad de equilibrio).

¹³ BELL, C., "REPORT FOR LINK PROJECT AFM87 - Modified atmospheres at raised temperature, an alternative to methyl bromide as a means of ensuring clean, pest-free, hygienic standards in food commodities"

Para hallar esta relación, se han propuesto diferentes modelos teóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio en los granos. Aunque ninguno es capaz de expresar exactamente el valor de la humedad de equilibrio en todas las gamas de temperatura se considera a la ecuación de Halsey la que mejor expresan dicho valor:

$$r_h = \exp\left[\frac{-\exp(A+B.T)}{m^c}\right] \quad (3.15)$$

Dónde: T : temperatura de secado, en °C
 m : contenido de humedad, en %
 r_h : humedad relativa del aire, en %

Tabla 3.1. Parámetros para la ecuación de Halsey

Commodity	Best fit equation	A	B	C
Cocoa	Halsey	4.218	-0.00904	2.469

Para la humedad relativa hallada en la carta psicrométrica (a 30°C), partiendo de 20°C con humedad relativa del 85% (mayor humedad encontrada en la costa peruana) y con el uso de la ecuación de Halsey se obtiene una humedad de equilibrio de 2.34%.

3.1.4 Temperatura del producto durante el secado (T_p)

Para hallar la temperatura a la que se encuentra el producto (temperatura límite de enfriamiento) durante el proceso de secado, se hará uso de la carta psicrométrica, de dónde se obtiene $T_p = 30^\circ\text{C}$ para la temperatura de 65°C (Esta viene a ser la temperatura de bulbo húmedo)

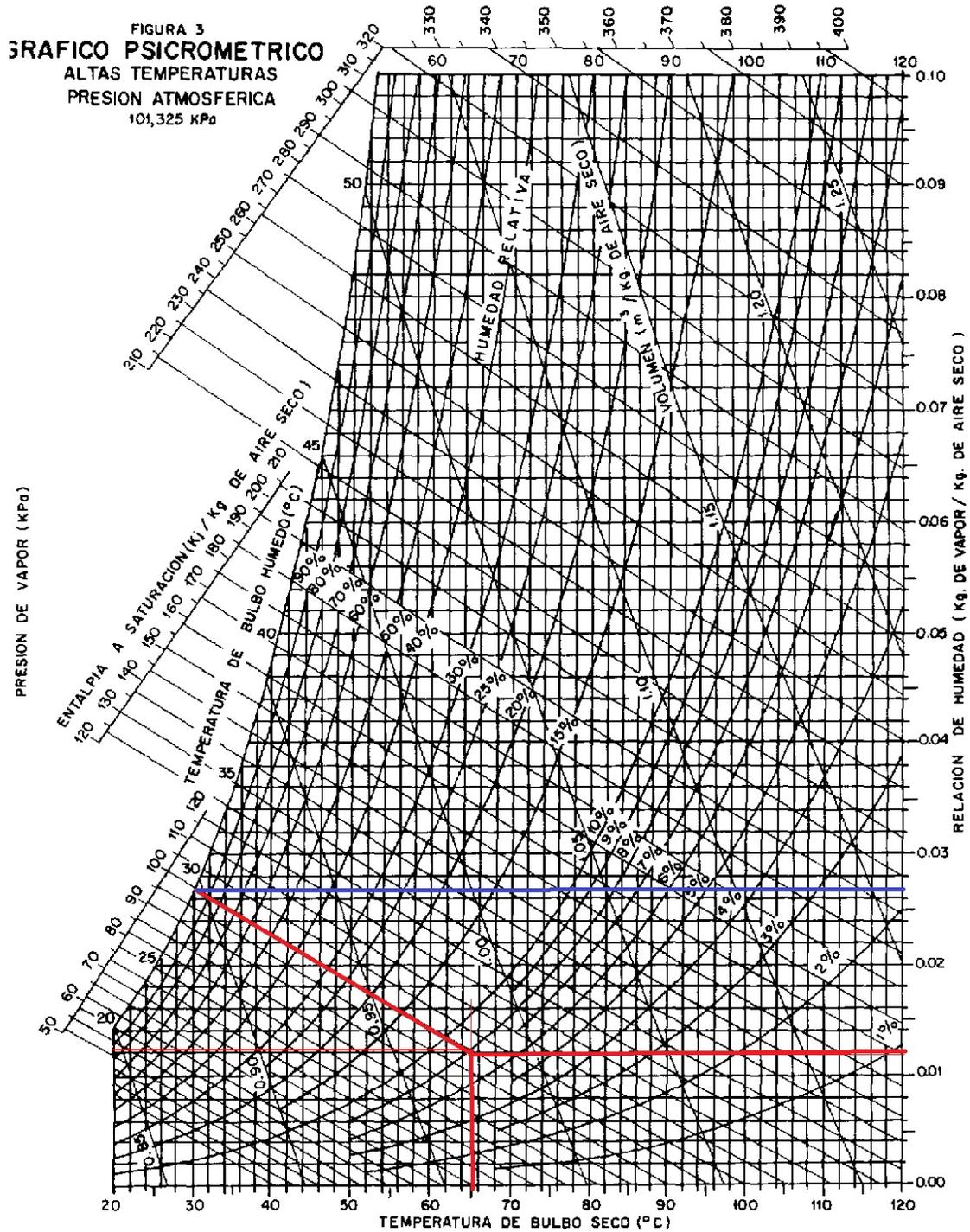


Figura 3.2. Carta Psicrométrica a altas temperaturas

3.1.5 Contenido de humedad crítica (Hc)

Como se explicó anteriormente, es el contenido de humedad en el que el proceso de secado inicia el periodo de velocidad decreciente de secado. Shelton B. realizó experiencias en las que obtuvo los valores de humedad crítica del cacao para diferentes temperaturas¹⁴ como se muestra en la tabla 3.2. [Artificial drying of cocoa beans. 1967]

Tabla 3.2 Contenido de humedad crítica (adaptado de Shelton B.)

T °C	Hc% (BS)	Hc% (BH)
65	44	0,31
70	42	0,31
80	42	0,30

Como se puede observar para la temperatura de 65°C el contenido de humedad crítica en base húmeda es aproximadamente 31%, valor que será utilizado en los cálculos pertinentes.

3.1.6 Cálculos y resultados

3.1.6.1 Datos de entrada:

El cacao es un producto higroscópico que deberá ser secado hasta una humedad (BH) de 12%-15%, para ello se determinaron las siguientes características:

$$\rho_c = 520 \frac{Kg}{m^3}, \text{ densidad del cacao}$$

$$X_i = 0,7, \text{ contenido de humedad inicial}$$

$$X_f = 0,13, \text{ contenido de humedad final}$$

$$X_c = 0,31, \text{ contenido de humedad crítica}$$

$$X_e = 0,0234, \text{ contenido de humedad de equilibrio}$$

¹⁴ SHELTON B. "Artificial drying of cocoa beans", *Tropical agriculture, Trinidad y Tobago*.

La temperatura del aire de secado debe estar entre 55°C y 80 °C, pero se recomienda trabajar a 65°C para evitar quemar el producto.

Por otro lado, el área de secado será la superficie de producto que tiene contacto con el aire:

$$A_s = \frac{C}{\rho_c \cdot e} \quad (3.16)$$

Dónde: C : capacidad del secador, en Kg
 e : espesor de la cama de cacao, en m
 ρ : densidad del cacao, en $\frac{kg}{m^3}$

3.1.6.2 Procedimiento de cálculo

Para obtener el modelo correcto para el secado, se hará uso de las ecuaciones explicadas anteriormente, de acuerdo al siguiente orden:

- $A_s = \frac{C}{\rho_c \cdot e}$
- $G = v_a \cdot 3600 \cdot \rho_a$
- $h_c = 4.2G^{0.37}$
- $H_{fg} = (2502,4 - 2,42958 T)[1 + 1,44408 \cdot \text{Exp}(-21,5011X)]$
- $R_c = \frac{h_c \cdot (T_s - T_g)}{H_{fg}}$
- $t_c = \frac{M_s \cdot (X_i - X_c)}{A_s R_c}$
- $t_d = \frac{M_s (X_c - X_e)}{A_s R_c} \ln\left(\frac{X_c - X_e}{X_f - X_e}\right)$
- $t_t = t_c + t_d$

Reemplazando los datos se obtienen los resultados en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Tiempo de secado (elaboración propia)

Ta=65°C Ts=30°C Hfg=2431,94 KJ/Kg Mt=1000kg Ms=300Kg r=1,5 m
 Hi=70% Hc=31% Hf=13% A= 7,068 m² e=0,136 m

V (m/s)	G (Kg/h m2)	hc (KJ/m2.h°C)	Rc (Kg/h m2)	tc (h)	td (h)	t (h)
0.50	2160,00	71,94	1,04	15,99	11,62	27,61
1.00	4320,00	92,98	1,34	12,37	8,99	21,36
1.50	6480,00	108,03	1,55	10,65	7,74	18,39
2.00	8640,00	120,16	1,73	9,57	6,96	16,53
2.50	10800,00	130,50	1,88	8,81	6,41	15,22
3.00	12960,00	139,61	2,01	8,24	5,99	14,23
3.50	15120,00	147,80	2,13	7,78	5,66	13,44
4.00	17280,00	155,29	2,23	7,41	5,38	12,79

e: espesor de cama r: radio del cilindro Mt: masa total Ms: contenido de masa seca

Ta=65°C Ts=30°C Hfg=2431,94 KJ/Kg Mt=1000kg Ms=300Kg r=1,8 m
 Hi=70% Hc=31% Hf=13% A= 10,18 m² e=0,189 m

V (m/s)	G (Kg/h m2)	hc (KJ/m2.h°C)	Rc (Kg/h m2)	tc (h)	td (h)	t (h)
0,50	2160,00	71,94	1,04	11,10	8,07	19,17
1,00	4320,00	92,98	1,34	8,59	6,24	14,83
1,50	6480,00	108,03	1,55	7,39	5,37	12,77
2,00	8640,00	120,16	1,73	6,65	4,83	11,48
2,50	10800,00	130,50	1,88	6,12	4,45	10,57
3,00	12960,00	139,61	2,01	5,72	4,16	9,88
3,50	15120,00	147,80	2,13	5,40	3,93	9,33
4,00	17280,00	155,29	2,23	5,14	3,74	8,88

e: espesor de cama r: radio del cilindro Mt: masa total Ms: contenido de masa seca

Se decide trabajar con una capacidad de 1000 kg y la velocidad en el rango de 2,5 m/s a 3,5 m/s para evitar el fenómeno de aplastamiento de grano que sucede cuando las velocidades del aire son muy elevadas, seleccionando así una velocidad de 3 m/s . De esta manera se busca cumplir el proceso dentro de un turno de 12 horas de trabajo.

3.2 Análisis energético del secador

En el aspecto relacionado a los requerimientos termodinámicos, estos están vinculados a la aplicación de las leyes de conservación de masa y energía (principios termodinámicos).

Utilizar el análisis termodinámico permite determinar las características termodinámicas de un sistema bajo estudio, que es la región o conjunto de materia en el espacio que es seleccionada para su análisis.

Este tipo del análisis de sistemas (figura 3.3), emplea los principios de conservación de masa y de la energía, para así valorizar la interacción del sistema con su entorno, consigo mismo o con otro sistema, cuando se analizan procesos compuestos por un número específico de equipos interconectados entre sí. En términos generales, el análisis termodinámico permite cuantificar las transferencias de energía, a través de interacciones de calor y trabajo, así como las transferencias de masa cruzando sus fronteras, cuando el sistema se encuentra en un estado específico para su análisis.

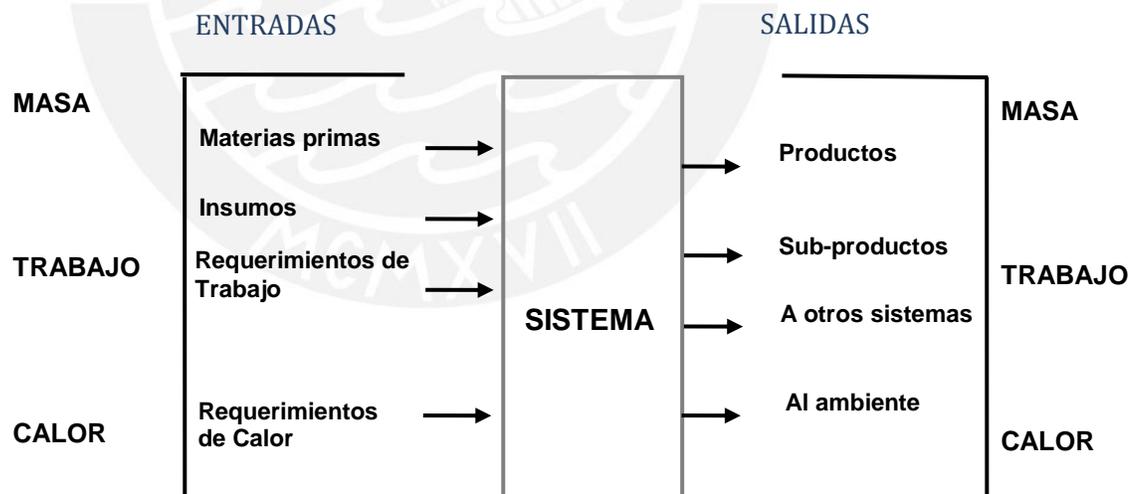


Figura 3.3. Modelo físico del análisis de sistemas en general

El análisis aplicado a un sistema abierto (figura 3.5), también denominado volumen de control, desde el punto de vista termodinámico, establece las siguientes formulaciones para los principios de conservación de masa y energía, respectivamente:

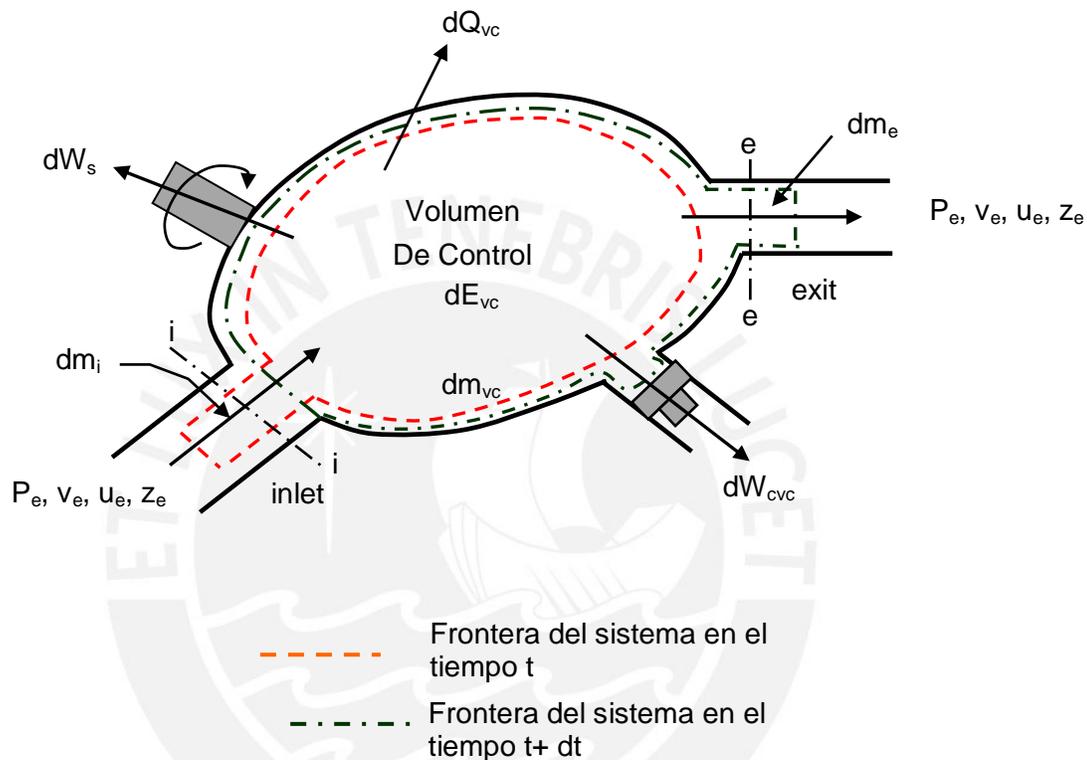


Figura 3.4. Interacciones de la transferencia de masa y energía en sistemas abiertos bajo el criterio de análisis de volumen de control

$$\sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_e = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (3.17)$$

$$\dot{Q} + W_{net} + \sum_{in} \dot{m}_i \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i - \sum_{out} \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e = \frac{dE_{vc}}{dt} \quad (3.18)$$

Continuando con la aplicación de los criterios expuestos en el primer aspecto del diseño del secador y con los datos obtenidos de los primeros análisis, se trabajaran las

ecuaciones para el acondicionamiento del aire de secado, que corresponde a la cuantificación de la cantidad de agua eliminada y flujo másico de aire necesario.

3.2.1 Análisis Termodinámico del Secador (Energía de calentamiento del aire)

Un adecuado análisis termodinámico para el secador implica asumir consideraciones, desde el punto de vista termodinámico, para aplicar los principios de conservación de masa y conservación de energía a cada uno de los flujos bajo análisis:

1. El proceso de secado del cacao y, cada uno de sus flujos existentes en particular, serán analizados bajo los criterios de sistemas abiertos.
2. En este sistema abierto bajo análisis, las propiedades del sistema como la densidad del producto, flujos de aire e interacciones de energía específica no cambian con el tiempo. Sin embargo, tales propiedades pueden variar espacialmente de un punto a otro dentro del volumen de control.
3. En la aplicación del principio de conservación de energía, ecuación (3.18), el término que corresponde a la transferencia de energía por trabajo de eje suministrado al volumen de control y que corresponde al trabajo proporcionado por el sistema motriz de las paletas que rotan para uniformizar el producto fue despreciado. Esta consideración fue asumida en base a los criterios expuestos por Peters, M y otros autores¹⁵, en la que establece que como los procesos de secado generalmente involucran la remoción de grandes cantidades de líquido ocasionada por la transferencia de calor, atravesando la interface entre el medio calefactor y el sólido, entonces estos flujos de calor y de entalpia asociadas a las corrientes de materia, son en magnitud, considerablemente mayores con respecto a los valores de energía suministrados en forma de trabajo mecánico.
4. Los términos de energía cinética y potencial para la ecuación (3.18) de conservación de energía se consideran despreciables por ser poco significantes.

¹⁵ Peters M. y otros autores. “*Plant Design and Economics for Chemical Engineers*”, Quinta Edición, McGraw Hill. New York. 2003

5. Las propiedades termodinámicas para caracterizar a la materia prima, como son el calor específico a presión constante y la entalpia, para formular las expresiones de energía, fueron consideradas con el modelo de sustancia incompresible.¹⁶

Considerando el análisis del secador como un sistema abierto operando bajo condición de estado estacionario (Figura 3.4) implica que las propiedades del sistema como densidad y energía específica no cambian con el tiempo. Sin embargo, tales propiedades pueden variar espacialmente de un punto a otro dentro del volumen de control. En consecuencia, si el sistema opera de esta forma, los términos de la forma $d/dt = 0$ en las ecuaciones (3.17) y (3.18) desaparecen y toman la forma:

$$\sum_{in} \dot{m}_i = \sum_{out} \dot{m}_e \quad (3.19)$$

$$\dot{Q} + W_{shaft} = \sum_{out} \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e - \sum_{in} \dot{m}_i \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i \quad (3.20)$$

$$\dot{Q} = \sum_{out} \dot{m}_e (h)_e - \sum_{in} \dot{m}_i (h)_i \quad (3.21)$$

En adelante, teniendo en cuenta los cálculos previos y los resultados obtenidos para cuantificar inicialmente las condiciones de operación del secador y aplicando las consideraciones de análisis termodinámico de sistemas se obtendrán las nuevas especificaciones del secador en operación.

El enfoque que se centra en los procesos de secado para el cacao y otros frutos subtropicales se ha estudiado ampliamente y en gran parte de este tipo de investigaciones (como la de SECAFÉ) se delimitan a los siguientes aspectos: las condiciones del aire y las condiciones del grano del cacao; para esto realiza la aplicación de balances para la entalpia y humedad del aire así como balances para la entalpia y

¹⁶ Wark K, "Advanced Thermodynamics for Engineers", McGraw-Hill. New York, 1995

humedad del grano. En forma general para un secador tipo estacionario estas ecuaciones toman la siguiente forma general:

El balance para la entalpía del aire:

$$\text{Energía que sale} = \text{Energía que entra} - \text{Energía transferida por Convección} \quad (3.22)$$

El balance para la entalpía del cacao:

$$\begin{aligned} \text{Energía transferida} = \\ \text{Cambio de energía interna del producto} - \text{Energía para evaporación} \end{aligned} \quad (3.23)$$

El balance para la razón de humedad del aire:

$$\text{Humedad transferida} = \text{Humedad que sale} - \text{Humedad que entra} \quad (3.24)$$

Tabla 3.3. Variables de entrada para secado (elaboración propia)

ITEM	VARIABLES PROCESO	UNIDAD
1	Temperatura del aire de secado, T_a	65°C
2	Temperatura del producto durante el secado, T_p	30°C
3	Área de secado, A_s	
4	Capacidad de carga del secador	1000 kg cacao
5	Humedad inicial del producto, H_i	70%
6	Humedad final del producto, H_f	13%
7	Humedad crítica, H_c	31%
8	Tiempo secado total, t	9,88 h
9	Espesor de la cama del secador, e	0,189 m

Todo este procedimiento de cálculo se basa en el esquema de la figura 3.6 que muestra el volumen del control del secador de donde se obtiene el balance térmico:

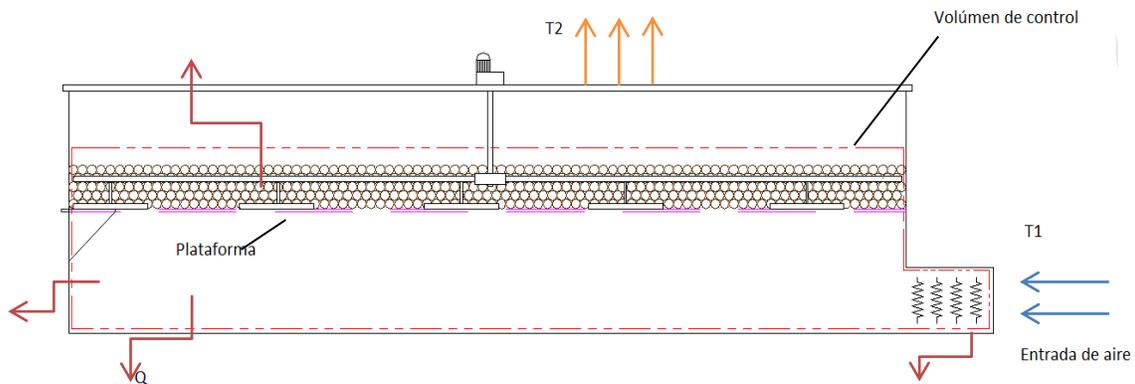


Figura 3.5 Volumen de control
(Elaboración propia)

3.2.1.1 Cantidad de agua eliminada

La cantidad de agua que se debe retirar al cacao durante el proceso de secado, está asociada al contenido de agua presente en el cacao en la cama de secado para la carga del secado.

Para el inicio del proceso de secado, tenemos:

$$masa_{agua\ inicial} = X_i(Capacidad\ Secador) \quad (3.25)$$

$$masa_{agua\ inicial} = (0.70)(1000\ kg) = 700\ kg\ agua$$

El contenido de materia seca en la cama de secado:

$$masa_{seca\ cacao} = masa_{total\ cacao} - masa_{agua\ inicial} \quad (3.26)$$

$$masa_{seca\ cacao} = 1000\ kg - 700\ kg = 300\ kg$$

El proceso de secado se llevará hasta una humedad final del 13%, el contenido final de agua del ciclo de secado será:

$$masa_{agua\ final} = \frac{X_{final}(masa_{seca\ cacao})}{1 - X_{final}} = \frac{(0.13)(300\ kg)}{1 - 0.13} = 44,8276\ kg \quad (3.27)$$

El agua que se debe de retirar del cacao en el proceso de secado, es decir el agua a evaporar y ser transportada por el aire en este proceso es:

$$masa_{agua\ retirada} = masa_{agua\ inicial} - masa_{agua\ final} = 655,1724\ kg \quad (3.28)$$

La cantidad de cacao al final del ciclo de secado es:

$$masa_{cacao\ final\ secado} = masa_{seca\ cacao} + masa_{agua\ final} = 344,8276\ kg \quad (3.29)$$

3.2.1.2 Energía de calentamiento del aire

Para los procesos de la transferencia de calor en este proceso de secado se debe determinar el calor específico del cacao en función del contenido de humedad de equilibrio en base seca:

$$C_p = 1,3556 + 5,7859CH_l \quad (3.30)$$

Dónde:

$$C_p: \text{Calor específico, } \frac{Kj}{Kg-K}$$

$$CH_l: \text{Contenido de humedad decimal en base seca}$$

Haciendo uso de la ecuación de Hasley (3.16) para la temperatura ambiente (20°C):

$$CH_l = 0.107 BH = 0.12 BS$$

El calor específico resultante es:

$$C_p = 1,3556 + 5,7859(0,12) = 2,049\ kj/kg^{\circ}K$$

Los cálculos para determinar el calor consumido en el proceso de secado están compuestos por el calor sensible para elevar la temperatura del grano de cacao, el calor sensible para elevar la temperatura del agua contenida en los granos de cacao y por el calor latente para evaporar el agua de la superficie de los granos de cacao.

Entonces, el calor sensible para elevar la temperatura de los granos de cacao de la cama del secador de 20°C a 65°C es:

$$\dot{Q}_{sensible\ H2O} = masa_{cacao\ final\ secado}(T_2 - T_1)C_s\ cacao \quad (3.31)$$

$$Q_{sensible\ H2O} = 344,8276\ kg(338K - 293K)(2.049\ kJ/kg^{\circ}K) = 33346,55\ kJ = 7966,21\ kCal$$

La ecuación para determinar el calor sensible necesario para elevar la temperatura del agua contenida en los granos de cacao en la cama del secador desde 20°C a 65°C es:

$$\dot{Q}_s = masa_{agua\ retirada}(T_2 - T_1)C_{eH2O} \quad (3.32)$$

$$\dot{Q}_s = 655,1724\ kg(65^{\circ}C - 20^{\circ}C)(1\ kCal/kg^{\circ}C) = 29482,758\ kCal$$

Finalmente, el calor latente para la evaporación del agua, producto de los fenómenos de transferencia de calor de la cinética de secado que se encuentra en la superficie de los granos de cacao en la cama de secado es:

$$\dot{Q}_{latente} = masa_{agua\ retirada}(Calor\ latente_{H2O}) \quad (3.33)$$

$$\dot{Q}_{latente} = (655,1724\ kg)(560\ kCal/kg) = 366896,54\ kCal$$

Los resultados parciales anteriores permitirán determinar el calor total necesario utilizado en este proceso de secado:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{sensible\ H2O} + \dot{Q}_s + \dot{Q}_{latente} \quad (3.34)$$

$$\dot{Q}_{Total} = 7966,21\ kCal + 29482,758\ kCal + 366896,54\ kCal = 404345,5\ kCal$$

En la tabla 3.4 se muestra la distribución porcentual del calor necesario para este proceso de secado, mostrando que el proceso de evaporación del agua de la superficie de los granos de cacao es el predominante, es decir el mayor consumo de calor (calor latente de evaporación) se da en este proceso con un 84,243% respecto al calor total.

Tabla 3.4. Distribución porcentual de los flujos de calor necesario en el proceso de secado de granos de cacao (elaboración propia)

Q_i	Calor Necesario (kCal)	Reparto porcentual (%)
$\dot{Q}_{\text{sensible H}_2\text{O}}$	7966,51	1,97
$\dot{Q}_{\text{Sensible H}_2\text{O en Cacao}}$	29482,758	7,29
$\dot{Q}_{\text{Latente evaporación}}$	366896,540	90,74
\dot{Q}_{TOTAL}	404345,51	100,00

Por último, se debe considerar que este proceso de secado emplea un tiempo total de secado de 9.88 horas. Para este tiempo la razón del flujo de calor total necesario es:

$$\dot{Q}_{\text{Total}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Total}}}{t_{\text{total}}} \quad (3.35)$$

$$\dot{Q}_{\text{Total}} = 404345,51 \text{ kCal} (4,186 \text{ kJ}/1 \text{ kCal}) \left(\frac{1}{9,86 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 47.158 \text{ kW}$$

Este valor puede ser hallado del mismo modo con un análisis psicrométrico entre el aire y el intercambiador de resistencias eléctricas, haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_a = m_a * (h_2 - h_1) \quad (3.36)$$

La entalpía del aire puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$h = 1,0054T + w(2501,3 + 1,8704T) \quad (3.37)$$

$$h_1 = 50,064 \frac{Kj}{Kg}$$

$$h_2 = 96,3 \frac{Kj}{Kg}$$

Estos valores pueden ser obtenidos igualmente de la carta psicrométrica de la figura 3.2.

Finalmente se tiene:

$$\dot{Q}_a = 1,215 * (96,3 - 50,064) = 56,177 kW$$

Se puede observar que hay una variación en el resultado encontrado. Esto se debe a las pérdidas de calor por convección entre el aire y el producto, cuyo valor puede ser hallado con la división de ambos valores:

$$\frac{56.177 kW}{47.158 kW} = 1,20 \quad (3.38)$$

Este resultado está también sujeto a pérdidas por convección con el intercambiador, por lo que el calor necesario para elevar la temperatura de 20°C a 65°C será:

$$\dot{Q}_a = 1,2 * 56,177 = 67,41 kW$$

3.3 Determinación del flujo de aire necesario para el proceso

El cálculo del flujo de aire necesario para cumplir los requerimientos del proceso de secado se realiza utilizando las condiciones del aire de entrada con el empleo de la carta psicrométrica de la figura 3.2, aquí se obtienen las humedades específicas del proceso de

secado cuando el aire pasa del punto inicial de 20°C y 85% de humedad relativa y es calentado hasta 65°C, dónde:

$$w_1 = w_2 = 0,0118 \frac{kg_{vapor\ agua}}{kg_{aire\ seco}}$$

Éste es introducido al proceso de secado donde el aire abandona saturado a una temperatura de 30°C con:

$$w_3 = 0,027 \frac{kg_{vapor\ agua}}{kg_{aire\ seco}}$$

Considerando:

$$m_{agua\ retirada} = 655,1724\ kg$$

$$t_{secado} = 9,88\ h$$

Se determina el flujo másico de aire necesario para el proceso mediante la ecuación:

$$\dot{m}_a = \frac{masa_{agua\ retirada}}{[t_s(w_3 - w_2)]} \quad (3.39)$$

$$\dot{m}_a = \frac{655,1724\ kg}{[9,88h(0,027 - 0,0118)\ kg_{vapor\ agua}/kg\ AS]} = 4362,697\ kg/h$$

El caudal de aire necesario para el proceso de secado se determina calculando el volumen de aire específico teniendo en cuenta las siguientes expresiones y valores:

$$T_a = 20^\circ C = 293K$$

$$P_a = 1\ atm = 101325\ Pa$$

$$R_a = 286,9 \frac{J}{kgK}$$

El volumen específico del aire:

$$\vartheta_a = \frac{R_a T_a (1 + 1.608 w_1)}{P_a} \quad (3.40)$$

$$\vartheta_a = \frac{(286,9 \text{ J/kgK})(293\text{k})(1 + 1,608(0.0118 \text{ kg}_{vapor \text{ agua}}/\text{kg}_{aire \text{ seco}}))}{101325 \text{ Pa}} = 0,845366 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Se utilizarán dos sopladores para distribuir mejor el aire de secado, por lo que el caudal de aire necesario por equipo será:

$$\dot{Q}_a = \vartheta_a \cdot \dot{m}_a \quad (3.41)$$

$$\dot{Q}_a = 0,845366 \text{ m}^3/\text{kg} (4362,697 \text{ kg/h})/2 = 1844,037 \text{ m}^3/\text{h} = 1086 \text{ CFM}$$

3.4 Análisis de las caídas de presión en el sistema

Una vez definido el caudal de aire necesario, el siguiente paso es determinar las caídas de presión durante el proceso de secado y para eso se va a determinar la presión estática que debe vencer el ventilador para impulsar el aire caliente dentro del secador y que se centran en el paso del aire por la cama de cacao y el intercambiador de calor como se muestra en la figura 3.6:

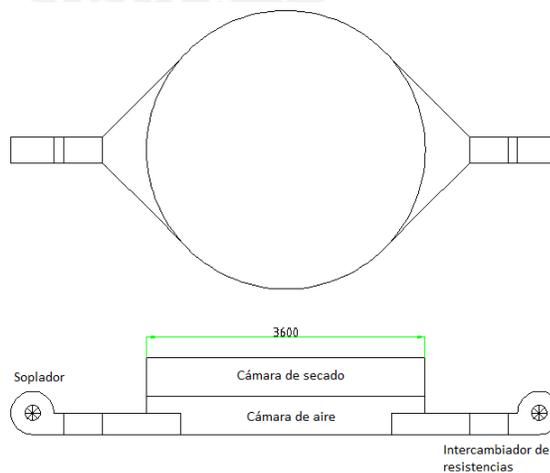


Figura 3.6 Configuración del Secador (Elaboración propia)

La caída de presión en el sistema obedece a la siguiente expresión¹⁷:

$$p = 1.15(\Delta p_e + \Delta p_c + \Delta p_p + \Delta p_i) \quad (3.42)$$

Dónde:

p : Presión total que debe entregar el ventilador (Pa)

Δp_e : Caída de presión por el paso del aire a través del ducto de entrada (Pa)

Δp_c : Caída de presión a través de la cama de granos (Pa)

Δp_p : Caída de presión a través de la plancha perforada (Pa)

Δp_i : Caída de presión a través del intercambiador de resistencias (Pa)

El cálculo de la pérdida de presión por el paso del aire a través de la expansión gradual, obedece a la siguiente relación:¹⁸

$$\Delta p_e = \rho_a * k' \left[1 - \left(\frac{D_e}{D_s} \right)^2 \right]^2 * \frac{Vm^2}{2} \quad (3.43)$$

Dónde:

$D_e = \frac{4A_e}{P} = 0,308 \text{ m}$: Diámetro hidráulico a la entrada de la sección¹⁹

$D_s = \frac{4A_s}{P} = 0,514 \text{ m}$: Diámetro hidráulico a la salida de la sección

$Vm = 2,541 \frac{\text{m}}{\text{s}}$: velocidad media en la sección

$A_e = 0,096 \text{ m}^2$: área de la sección en el ingreso

$A_s = 0,674 \text{ m}^2$: área de la sección en la salida

¹⁷ Gutierrez, F., Sanz, J., Orozco, C., "Ventiladores Para Secadores de Café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos". 1ra ed. Chinchiná: Publicación de CENICAFÉ, 2012. Pág. 56. ISBN 978-958-8490-11-3

¹⁸ Mataix, C., "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", 2da Edición, México, 1982, pág. 239

¹⁹ Fox, R., McDonald, A., "Introducción a la Mecánica de Fluidos", 2da Edición, México, 1990, pág. 36

El valor de k' puede ser obtenido en la figura 3.6:

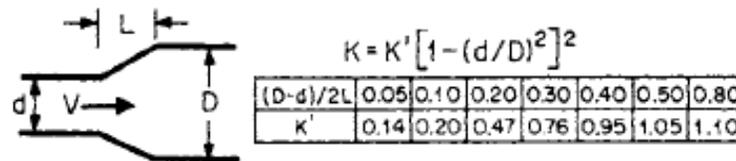


Figura 3.7 Valores de k'

Fuente: Marks, L., "Standard Handbook for Mechanical Engineers", 11va Edición, McGraw Hill, Nueva York, 2007, pág. 3-51

$$\Delta p_e = 1,2 * 0,2 [1 - \left(\frac{0,308}{0,514}\right)^2]^2 * \frac{2,541^2}{2} = 0,32 Pa = 0,0326 mmca$$

El cálculo de la caída de presión a través del lecho o cama de cacao se obtiene mediante la ecuación de Ergun²⁰:

$$\Delta p_c = L * \left(150 * \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \frac{\mu * u}{(\Phi * d_p)^2} + 1,75 * \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} * \frac{\rho_a * u^2}{\Phi * d_p}\right) \quad (3.44)$$

Dónde:

$L = 0,189 m$: altura del lecho o cama

$\varepsilon = 0,42$: fracción de vacíos o porosidad del lecho

$\nu = 20,3 * E^{-6} \frac{kg}{m.s}$: viscosidad del aire a 65°C

$u = \frac{Q}{A_p} = 0,24 \frac{m}{s}$: velocidad del aire a través del lecho

$\Phi = 0,391$: factor de esfericidad

$d_p = 0,00663 m$: diámetro de la partícula (grano)

²⁰ McCabe, W., Smith, J., Harriot, P., "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", 7ma Edición, México, 2007, pág. 177

Para realizar la aplicación de la expresión anterior es necesario caracterizar el grano del cacao en función de sus dimensiones, las mismas se emplearan para aproximar el diámetro efectivo del grano, así como la esfericidad del grano de cacao.²¹

Investigaciones realizadas en granos de cacao han permitido obtener valores que identifican las siguientes dimensiones para un grano en particular:

Espesor promedio del grano (c): 0,8 cm

Lado menor del grano (d): 1,5 cm

Lado mayor del grano (D): 2,8 cm

En consecuencia podemos determinar el diámetro del grano denominado también diámetro equivalente efectivo como función del producto de la esfericidad del grano y su respectivo diámetro equivalente promedio:

$$d_{ep} = \frac{c+d+D}{3} = \frac{0,8 \text{ cm} + 1,5 \text{ cm} + 2,8 \text{ cm}}{3} = 1,7 \text{ cm} \quad (3.45)$$

La esfericidad del grano de cacao se expresa como²¹:

$$\phi_s = \left[\left(\frac{c}{b} \right)^2 \left(\frac{d}{c} \right) \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{1,5}{2,8} \right)^2 \left(\frac{0,8}{1,5} \right) \right]^{1/2} = 0,391 \quad (3.46)$$

El diámetro equivalente efectivo que se utilizara como el diámetro de los granos será:

$$d_{ee} = D_g = \phi_s * d_{pd} = 0,391(1,7 \text{ cm}) = 0,667 \text{ cm} \quad (3.47)$$

²¹ Fierro, M., "Diseño Térmico de un Secador tipo Plataforma" Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica Superior del Litoral, Ecuador, 1990, pág. 78

El área del lecho o cama de granos de cacao, corresponderá al área de la sección perforada por donde el flujo de aire atraviesa los granos y se produce la caída de presión, para lo cual determinamos el área circular de la plancha y teniendo en cuenta que corresponde a plancha perforada y es el área perforada un porcentaje del área total del lecho o cama de los granos de cacao:

$$A_p = \%perforado\ plancha(area_{plancha}) = 0.40 \left(\frac{\pi(3,6m)^2}{4} \right) = 4,28\ m^2 \quad (3.48)$$

Donde las especificaciones para la plancha perforada son:

Diámetro agujeros plancha: 5 mm

Espesor de la plancha: 5 mm

Separación entre centros: 7,5 mm

% perforado de plancha: 40%

Diámetro de la cama o lecho de secador: 3,6 m

$$\Delta p_c = 0,189 * \left(150 * \frac{(1 - 0,42)^2}{0,42^3} * \frac{20,3 * 10^{-6} * 0,3}{(0,391 * 0,00667)^2} + 1,75 * \frac{1 - 0,42}{0,42^3} * \frac{1,2 * 0,3^2}{0,391 * 0,00667} \right)$$

$$\Delta p_c = 160,2\ Pa = 16,347\ mmca$$

La caída de presión a través de la plancha perforada se puede tomar como el 10% de la caída en la cama de cacao²²:

$$\Delta p_p = 0.1\Delta p_c = 16,02\ Pa = 1,6347\ mmca \quad (3.49)$$

El cálculo de la caída de presión en el calentador de resistencias eléctricas se determinara como un valor promedio de la siguiente información:

²² Costales, R., "Estudio del secado de granos mediante fluidización" Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 1995, pág. 40

Tabla 3.5. Caídas de presión para intercambiadores con caudal de $100 \text{ m}^3/\text{min}^{23}$

INTERCAMBIADOR DE CALOR	Δp_i (cm C. A)
Artesanal 2500	0.40
Sotec 2500	0.59
Artesanal 1250	1.13
Citará 1500	1.17
AMG 1500	1.81
INGESEC 2000	1.95
PREMAC 5000	2.13
IC-P 1500	3.15
AMG 3000	3.99

El promedio de la caída de presión asociada a los intercambiadores de calor (Tabla 3.5.) es:

$$\Delta p_i = 1,8133 \text{ cm C. A} = 18,133 \text{ mmca}$$

La pérdida total del sistema para el secador en este trabajo de investigación es:

$$p = 1,15(36.15) = 41.57 \text{ mmca}$$

Existe una caída de presión debido al choque entre ambos flujos de aire, sin embargo la bibliografía al respecto de este tipo de configuración (con ventiladores diametralmente opuestos) es muy escasa. Por otro lado, al tener 2 flujos que chocan con sentidos opuestos pero de la misma magnitud tanto en caudal como en velocidad, estos se anularían el uno al otro por lo que la caída de presión en esta dinámica sería despreciable a comparación de los valores encontrados en los ductos y en el lecho de granos. Cabe considerar que la educación para la caída de presión total toma en cuenta un factor de seguridad del 15%.

²³ PARRA C. Alfonso., ROA M. Gonzalo., OLIVEROS T. Carlos E. SECAFE Parte II: "Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. Artículo Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental". CENICAFÉ, 2008. 428-434p.

3.5 Cálculo y selección de equipos

3.5.1 Intercambiador de calor de resistencias eléctrica

Se diseña el secador con el uso de resistencias eléctricas, pues la solicitud fue tal para evitar cualquier probabilidad de contaminar el cacao, pues éste es muy sensible a los olores, dañando su calidad como producto de exportación.

El cálculo de la potencia de la cámara de generación considera variables como la temperatura a la que se necesita trabajar, dimensiones de la cámara, especificaciones del tipo de aislamiento; todos los requerimientos anteriores se van a reducir como necesidad si se seleccionan los elementos constructivos como conjunto, de tal manera que se direcciona directamente en el cálculo de las especificaciones de la cámara. Este tipo de elementos pueden ser calentadores con sección cuadrada o sección circular, según las necesidades (Ver Figura 3.6).



Figura 3.8 Calentadores de resistencia eléctrica de sección rectangular y circular.

Elementos de esta naturaleza han sido diseñados por empresas que trabajan en proyectos de sistemas de calentamiento de aire que brindan soporte informativo técnico para una selección rápida de sus equipos en función de parámetros básicos pero importantes para su selección, en este sentido el valor para determinar esta capacidad será comparado con el valor obtenido en el requerimiento térmico del secador realizado anteriormente así como del flujo de aire necesario también calculado; de esta manera se tiene:

$$p = 0.349M_q \cdot \Delta T. \quad (3.50)$$

Dónde:

p : potencia a instalar (permitiendo un factor de seguridad de 1.2), en kW

$M_q = 2181,35 \frac{kg}{h}$: flujo másico del aire

$\Delta T = 65^\circ C - 20^\circ C = 45^\circ C$

Esta ecuación considera un 20% por pérdidas de transferencia de calor, tal como se halló en los cálculos realizados.

Reemplazando en (3.42):

$$p = 0,349(2181,35 \text{ kg/h})(45^\circ C) = 34,26 \text{ kW}$$

Se hará uso de dos intercambiadores de calor por resistencias eléctricas, por lo que la potencia total requerida será:

$$p = 2 * 34,26 = 68,52 \text{ kW}$$

Este valor es 1% adicional respecto al valor obtenido de flujo de calor del análisis termodinámico realizado al proceso de secado, valor que se encuentra dentro del rango esperado y que va a cumplir con el requerimiento solicitado de generación de calor. De acuerdo con catálogo en el Anexo 7, se selecciona:

Modelo de carcasa: 6531

Potencia: 0.25kW a 171 kW

Resistencias aleteadas: 25x50 mm

Modelo de cajón: 6535

3.5.2 Ventilador Centrífugo

Con los valores obtenidos para la necesidad de flujo de aire en el sistema analizado y considerando las pérdidas de presión estáticas, la selección de los ventiladores se hace utilizando los catálogos de proveedores en los que se detallan las curvas características de sus equipos. De acuerdo al catálogo en el Anexo 9, se selecciona:

Modelo: CBP 10/10
 N° Revoluciones: 1300 RPM
 Potencia absorbida: 0.32 kW
 Rendimiento: 68%

3.6 Aislantes térmicos

Los aislantes térmicos son materiales con bajo coeficiente de conductividad térmica con los cuales se trata de aislar térmicamente una superficie reduciendo la transferencia de calor hacia o desde el ambiente. De esta manera se logra mantener las condiciones de secado determinadas en este capítulo.

3.3.1 Radio crítico de aislantes

Al colocar aislante a una superficie curva puede presentarse el caso en que el aislamiento favorezca a la transmisión de calor. El límite para este efecto es el radio crítico del aislamiento.

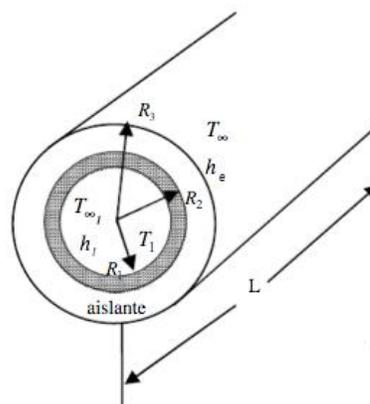


Figura 3.9 Radio crítico de aislante

$$r_c = \frac{k_a}{h_e} \tag{3.51}$$

Dónde: k_t : conductividad del tubo, en $\frac{W}{m-K}$
 h_e : coeficiente de convección externo, en $\frac{W}{m^2-K}$
 r_c : radio crítico del aislante

3.3.2 Coeficiente convectivo del aire exterior

El coeficiente convectivo exterior se puede calcular con los valores de la tabla 3.3 y la ecuación empírica 3.21 [MELGAREJO, 2005, p.88] propuesta por Pinzano (1993), Torella y Palau (1988), para estimar los coeficientes superficiales de transmisión de calor.

Tabla 3.6 Parámetros para el cálculo del coeficiente convectivo del aire (Melgarejo, 2005)

Estado de la superficie	v<5m/s			v>5m/s		
	a	b	n	a	b	n
Pulida	4,83	3,30	1	0	6,17	0,78
Rugosa	5,32	3,70	1	0	6,4	0,78

$$h = a + b \cdot (v^n) \left(\frac{Kcal}{hm^2^{\circ}C} \right) \tag{3.52}$$

Asumiendo que el secador puede operar expuesto a condiciones ambientales en espacios abiertos, se considera la velocidad crítica para la ecuación de 5m/s y la superficie externa del secador como pulida se obtiene: $h_e = 24,885 \frac{W}{m^2K}$.

Haciendo uso de éste dato y considerando un aislante de lana de vidrio, cuyo coeficiente de conductividad es $0,04 \frac{W}{m^2K}$, se obtiene un radio crítico de 0,0016 m.

Esto quiere decir que cualquier espesor de aislante estaría ayudando a evitar la pérdida de calor en el volumen de control.

El flujo de calor hacia el exterior de un cilindro puede ser calculado mediante la ecuación 3.27:

$$q = \frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{\frac{1}{2\pi \cdot r_i \cdot l \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \cdot k_c \cdot l} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2\pi \cdot k_a \cdot l} + \frac{1}{2\pi \cdot r \cdot l \cdot h_e}} \quad (3.53)$$

Dónde:

- k_c : conductividad del cilindro, en $\frac{W}{m \cdot K}$
- k_a : conductividad del aislante, en $\frac{W}{m \cdot K}$
- l : longitud del cilindro, en m
- r : radio del aislante, en m
- r_c : radio crítico del aislante, en m
- r_o : radio externo del cilindro, en m
- $T_{\infty i}$: Temperatura en el interior del cilindro, en °C
- $T_{\infty e}$: Temperatura en el exterior del cilindro, en °C

El secador será diseñado con acero, cuyo espesor es de 3 mm y su coeficiente de conducción es $45 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$. La altura de la cámara de calentamiento es 0,5 m y el espesor del cilindro 3 mm. Para efectos del cálculo, se asumirá una temperatura superficial del aislante es de 25°C y se debe cumplir la siguiente relación obtenida de la ecuación [3.53]:

$$\frac{T_{\infty i} - T_{se}}{\frac{1}{2\pi \cdot r_i \cdot l \cdot h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi \cdot k_c \cdot l} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2\pi \cdot k_a \cdot l}} = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{\frac{1}{2\pi \cdot r \cdot l \cdot h_e}}$$

Reemplazando los valores en la expresión anterior se obtiene un radio de aislante $r = 1,807m$, lo cual da un espesor de aislante de 5 mm.

En la expansión gradual, la mayor área de transferencia se da entre la pared superior e inferior de 1 m de longitud, paralelas entre sí. Para hallar el pesor de aislante entre paredes planas se tiene²⁴:

$$\frac{T_{\infty i} - T_{\infty e}}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_{ducto}}{k_c} + \frac{e_a}{k_a} + \frac{1}{h_e}} = \frac{T_{se} - T_{\infty e}}{\frac{1}{h_e}} \quad (3.54)$$

Dónde:

e_{ducto} : espesor de la pared, en m

e_a : espesor del aislante, en m

Reemplazando los valores en la ecuación (3.54) se obtiene que el espesor requerido será de 12 mm. En el mercado, el valor de espesor menor para estos aislantes es de 25 mm y será el que se utilizará.

²⁴ Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, "Guía Técnica para el Diseño y Cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos", ISBN: 978-84-96680-08-1, Madrid, 2007, p51.

CAPITULO 4

CÁLCULO ESTRUCTURAL Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

4.1 Dimensionamiento del secador

En el capítulo anterior se determinó las condiciones de secado y estableció que el área de contacto entre el aire y el producto debe ser de $10,17 \text{ m}^2$, lo cual da un radio de 1,8 m. la altura de la cama es de 0,18 m la cual aumentará al activar el sistema de uniformizado y descarga. Por ello se la cámara de secado se dimensionara con 0,5 m de alto. La altura total del secador serpa de 1 m y la cámara de calentamiento tendrá también 0,5 m de altura. De esta manera se diseña un cilindro de 3,6 m de diámetro y 1 m de altura.

4.2 Elementos del secador

Para lograr un secado uniforme, el secador contará con un sistema de uniformizado el cual consta de un eje, acoplado a un moto-reductor, con extensiones radiales, las cuales agitaran el producto logrando un secado igual en toda la carga. Así mismo, éste sistema ayudará a descarga del producto.

El eje estará montado en un puente, montado diametralmente en la parte superior del equipo, el cual sostendrá también el motor-reductor.

Contará también con resistencias eléctricas, seleccionadas en el capítulo anterior, montadas en las paredes del cilindro para el calentamiento del aire, y con un ventilador centrífugo, el cual impulsara el aire con una entrada tangencial al bastidor.

Finalmente, el producto reposará sobre una plancha perforada, por la cual atravesará el aire caliente, secando el producto con un flujo perpendicular al producto.

Entonces, se tiene lo siguiente:

- Bastidor
- Puente
- Sistema de uniformizado y descarga
- Plancha perforada

- Motor-reductor
- Intercambiador de resistencias
- Ventilador centrífugo

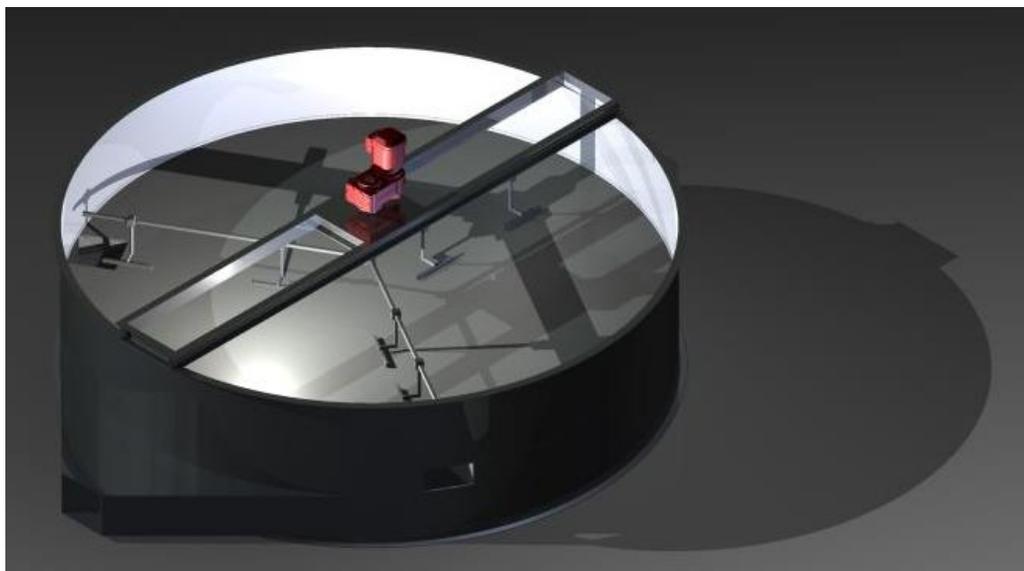


Figura 4.1 Secadora de cacao (Elaboración propia)

2.3 Diseño estructural

Los elementos principales a analizar serán el bastidor, la plancha perforada y el puente.

Para poder realizar el diseño del bastidor es necesario conocer las cargas a las que estará sometido, por lo que el análisis iniciara con la plancha perforada, que es donde reposara la carga del producto, y el puente del sistema de uniformizado, que estará apoyado en el borde superior del bastidor y estará sometido al peso del eje y del motor-reductor.

4.3.1 Plancha perforada

Haciendo uso de la ecuación (4.1) expuesta por Raymond Roark en su libro “Formulas for stress and strain” para plancha circular empotrada en sus bordes, se puede hallar la deflexión de la plancha²⁵:

²⁵ Roark, Raymond J. “*Formulas for stress and strain*”, Tokyo: McGraw-Hill, 1965

$$Max y = \frac{3W\left(\frac{1}{\nu^3}-1\right).a^2}{16\pi.E.\frac{1}{\nu^3}.t^3} \quad (4.1)$$

Dónde: *Max y*: Máxima deflexión [m]

W: Peso total [Kg]

ν: módulo de poisson [0,3]

a: radio de la plancha circular [m]

E: módulo de elasticidad del acero [2 100 00 kg/m²]

t: espesor de plancha [m]

Se obtiene que para un espesor de 3 mm la deflexión es igual a 0,3 metros mientras que para 5 mm es de 6,7 cm.

Para minimizar éste efecto se colocarán perfiles en T radialmente y soldados al anillo interior para disminuir la flexión ocasionada por el peso del producto sobre la plancha perforada. Serán también de 2x2x1/8 pulgadas.

A su vez, estará apoyada en un poste central a base de un tubo cuadrado de 2x2x1,8 pulgadas.

De esta manera, haciendo uso de la fórmula de Roark para sectores circulares planos con carga uniforme, lados rectos apoyados y lado curvo fijo, tenemos:

$$Max y = \alpha \cdot \frac{w.a^4}{E.t^3} \quad (4.2)$$

Siendo $\alpha = 0,0065$ para un ángulo de 60°, se obtiene que para un espesor de 3 mm la deflexión es de 10 mm, mientras que para una plancha de 5 mm es de 2,5 mm.

4.3.2 Diseño del puente

El puente es dónde se apoyará el eje y el motor-reductor cuyos pesos son 5,4 kg y 90 kg respectivamente. Así mismo, se encuentra acoplado al eje la extensión radial y los brazos que ayudaran a la descarga y uniformizarán el secado, siendo el peso total del conjunto

de 30,5 kg y todo esto aplicado en el centro del elemento. Además, sufrirá deformación por su propio peso, siendo este valor de 110,3 kg.

Para su construcción se utilizarán perfiles en U de 100x50x6 milímetros. Haciendo uso de la herramienta de simulación de Autodesk Inventor, se puede obtener la deflexión máxima asumiendo los extremos empotrados:

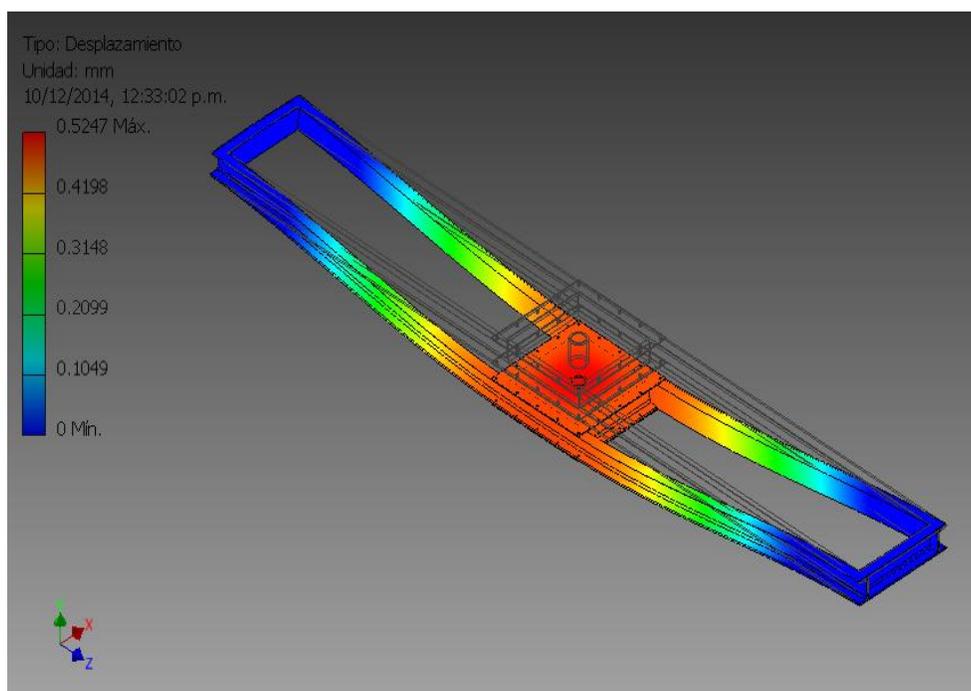


Figura 4.2 Deformación del puente

Se obtiene así, una máxima deflexión de 0,52 milímetros en el centro, siendo éste valor despreciable considerando su longitud de 3706 milímetros.

4.3.3 Diseño del bastidor

Una vez determinadas las cargas a las que estará sometido el bastidor, se procederá a diseñar el elemento, empezando por el espesor de la plancha de la cual estará estructurado.

4.3.3.1 Espesor de plancha

El bastidor es el cuerpo principal del secador y será construido en base a planchas de acero roladas y soldadas. Para la selección del espesor de plancha se hará uso de los parámetros establecidos por Ravenet en su libro “Silos. Teoría, Investigación, Construcción”, en el cual establece una relación entre el espesor de pared y la altura de los silos cilíndricos²⁶.

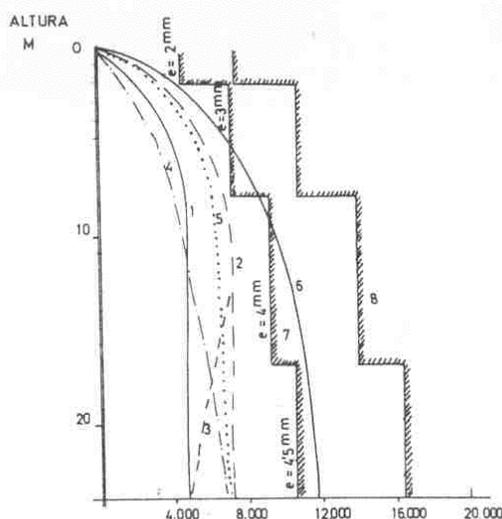


Figura 4.3 Relación de espesor de plancha con la altura del cilindro.
(Silos, Ravenet. p. 204)

Se puede observar que para una altura menor a 10 metros y con un diámetro inferior a 4 metros el espesor requerido es de solo 2 mm, sin embargo se seleccionará una plancha de espesor 3 mm ya que su uso será estructural.

4.3.3.2 Perfiles estructurales

Para darle rigidez y estabilidad al cuerpo principal, se hará uso de perfiles estructurales en L de lados iguales siendo sus dimensiones en pulgadas 2x2x1/8, seleccionados haciendo

²⁶ Ravenet Catalán, Juan. “Silos”, Barcelona: Técnicos Asociados, 1977

uso de las teorías de formas constructivas descritas en el libro de Hans Rögnitz²⁷. Estos se rolarán y soldarán, formando un anillo que será soldado en las partes superior e inferior externas del bastidor, así como internamente a medio metro del borde inferior a fin de sostener la plancha perforada.

4.3.3.3 Cálculo estructural del bastidor

Para determinar la deformación del cuerpo principal, se reducirán las reacciones del puente sobre el bastidor, siendo la reacción en dos puntos diametralmente opuestos igual a 120 kgf cada uno. Se aplicara también el peso del cacao para determinar la deformación radial a plena carga.

Con estos datos, se procede a simular el caso con Autodesk Inventor, dando los siguientes resultados:

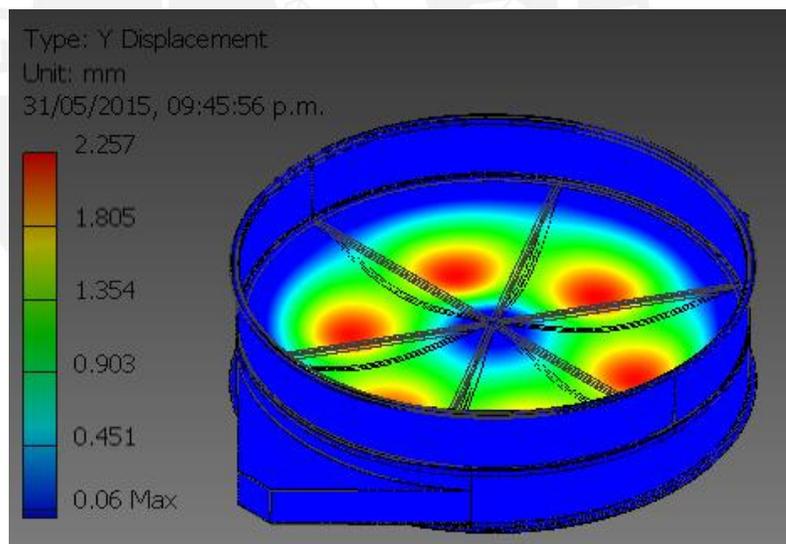


Figura 4.4 Deformación del bastidor en el eje Y

²⁷ Rögnitz, Hans. "Estudio de las formas constructivas para la fabricación de máquinas y aparatos / G. Köhler", Barcelona: Labor, 1966

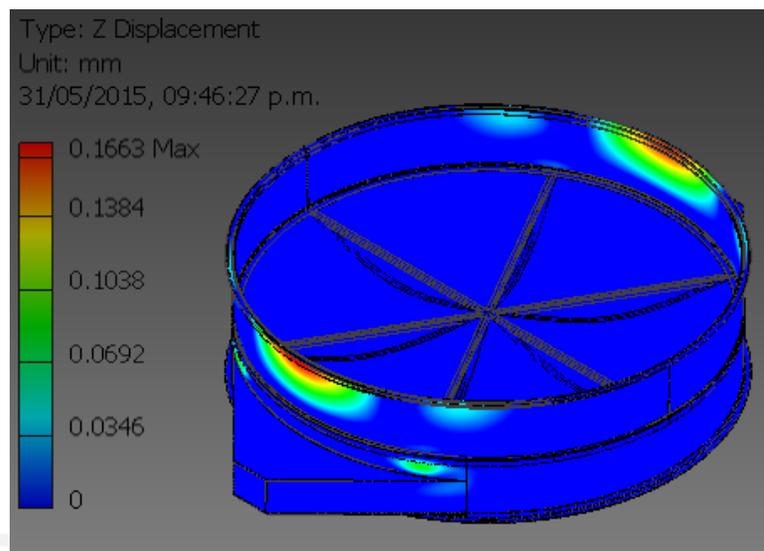


Figura 4.5 Deformación del bastidor en el eje Z (crítico)

En la figura 4.6 se puede ver una variación de la deformación de la plancha con lo hallado en la sección 4.3.1, dando una variación de 0,25 milímetro, por lo que se puede asumir que la aproximación matemática fue acertada. Se puede deducir que el diseño posee gran rigidez y es adecuado para su operación.

Del mismo modo es posible obtener el factor de seguridad del diseño:

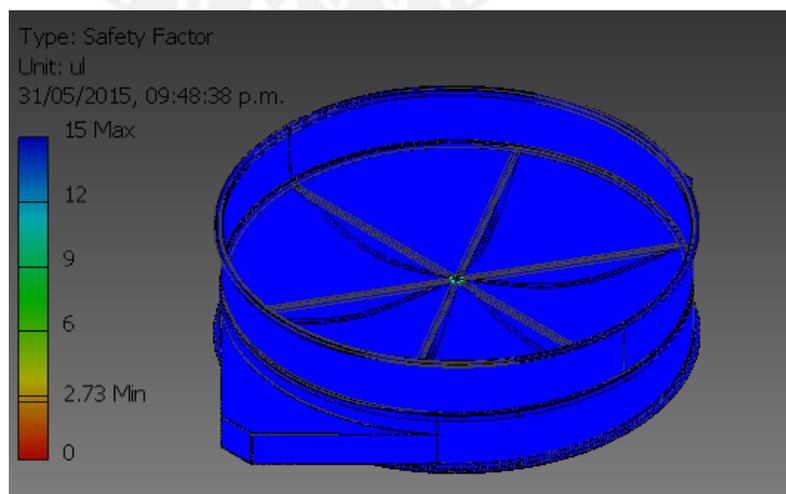


Figura 4.6 Factor de seguridad del bastidor

Se observa que la mayor parte del bastidor posee un factor de seguridad de 15, mientras que en el punto crítico es de 2,73, por lo que se concluye que el diseño es correcto. Así pues, es posible percatarse de la rigidez de la estructura, sufriendo una deformación en los tres ejes despreciable para la operación a la que será sometida.

4.4 Selección del motor-reductor

El eje transmite torque a los brazos para el uniformizado dispuestos de manera radial cada 120° . El uniformizado se realiza con la ayuda de las patas de arrastre del grano dispuestas a lo largo de los brazos por lo que es necesario analizar el torque requerido. Estas patas tienen una altura inferior a la de la cama de granos por lo que se forma un efecto de olas en la que el producto no solo se mueve radialmente sino que también lo hace verticalmente, dando lugar a que el fruto que inicialmente se encontraba en la parte superior del lecho viaje hasta el fondo en donde tendrá un mejor contacto con el aire caliente, mejorando la transferencia de calor y uniformizando el secado.

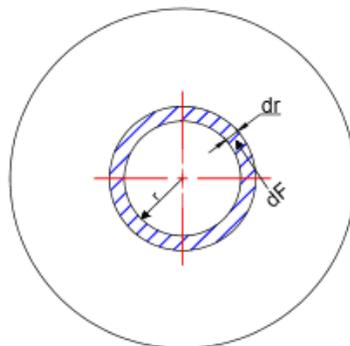


Figura 4.7 Elemento diferencial de la fuerza para el arrastre de grano

De la figura 4.9 se deduce:

$$dT = r \times dF \quad (4.6)$$

Dónde:

r : radio de la pata de arrastre [m]

F : diferencial de la fuerza para el arrastre [N]

La fuerza de rozamiento se obtiene de la siguiente expresión:

$$F = N \times \mu \quad (4.7)$$

Dónde: μ : *coeficiente de rozamiento*

$$N = m \cdot g: \text{Fuerza normal [N]}$$

Se obtiene la ecuación:

$$dF = \mu \times g \times dm \quad (4.8)$$

El diferencial de masa en función de un diferencial de volumen es:

$$dm = \rho \times dV \quad (4.9)$$

$$dV = 2\pi \times h \times r \times dr \quad (4.10)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.6:

$$F = \int_{r_1}^{r_2} 2\rho \times g \times \mu \times \pi \times h \times r \times dr \quad (4.11)$$

Las constantes para la ecuación 4.11 son:

$$\rho = 520 \frac{Kg}{m^3}: \text{densidad del cacao}$$

$$\mu = 0.45 : \text{coef. de rozamiento entre el cacao y el acero}^{28}$$

$$h = 0.033 \text{ m} : \text{altura del cacao arrastrado}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}: \text{gravedad}$$

²⁸ Bart-Plange, A. Dzisi, K., Addo, A., Teye, E., Kumi, F., "A comparative Study of Some Physical Properties of Large and Medium Size Cocoa Beans from Ghana", ARPN Journal of Science and Technology, 2012, pág. 138, ISSN 2225-7217

En la figura 4.10 se puede observar que las patas no están posicionadas radialmente si no que forman un ángulo de 30° con el radio del cilindro, por lo que habrá que descomponer las fuerzas para el análisis:

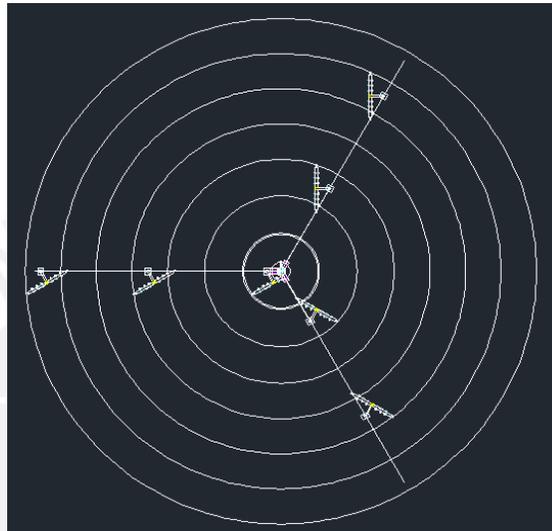


Figura 4.8 Disposición de las patas de arrastre

Tabla 4.1 Proyección de radios requeridos para el análisis de fuerzas

		r1 (mm)	r2 (mm)
Brazo 1	Pata 1	0	203,72
	Pata 2	740,28	1038,72
	Pata 3	1496,28	1795,72
Brazo 2	Pata 1	484,28	783,72
	Pata 2	1244,28	1543,72
Brazo 3	Pata 1	214,28	513,72
	Pata 2	994,28	1293,72

De esta manera para la fuerza aplicada sobre la Pata 1 en el Brazo 1 se tiene:

$$F_1(\cos 30^\circ) = \rho \times g \times \mu \times \pi \times h \times (r_2^2 - r_1^2) = 9,877 \text{ N} \quad (4.12)$$

$$F_1 = 11.40 \text{ N}$$

Tabla 4.2 Resultados de las fuerzas sobre las patas

F2 (N)	F3 (N)	F4 (N)	F5 (N)	F6 (N)	F7 (N)
145,89	270,88	104,34	229,41	59,55	188,27

El torque podrá ser hallado con el producto del coseno de la Fuerza y el radio medio de cada una de las patas obteniéndose un valor de 1040 N.m. El trabajo a realizar por el sistema de uniformizado no requiere de gran velocidad angular, siendo como mucho 30 RPM para realizar la tarea. La potencia de trabajo puede ser hallada con la siguiente ecuación:

$$P = T \times w = 1040 \text{ N.m} \times 30 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi}{\text{rev}} = 3267,25 \text{ W}$$

El factor de servicio proporcionado por el fabricante es $F_s = 1,2$ (Sew Eurodrive) por lo que la Potencia requerida sería de 3,92 kW, seleccionando así un motor de 4 kW con velocidad de salida 30 RPM. (Anexo 9)

4.5 Diseño del eje de uniformizado

Para el diseño del eje se hará uso de los procedimientos ensañados por la universidad en los cursos de resistencia de materiales y elementos de máquinas²⁹.

4.5.1 Fuerzas actuantes sobre el eje

En la sección anterior se hallaron las fuerzas que ejerce el cacao sobre las patas de arrastre por lo que habrá que realizar la reducción de las fuerzas sobre el eje de la siguiente manera:

²⁹ Rodríguez, Jorge. Apuntes de Clase “Resistencia de Materiales 2”, PUCP. Fondo Editorial PUCP 2011 y Álvarez, Miguel (2012), Apuntes de Clase “Elementos de Máquinas 1”, PUCP

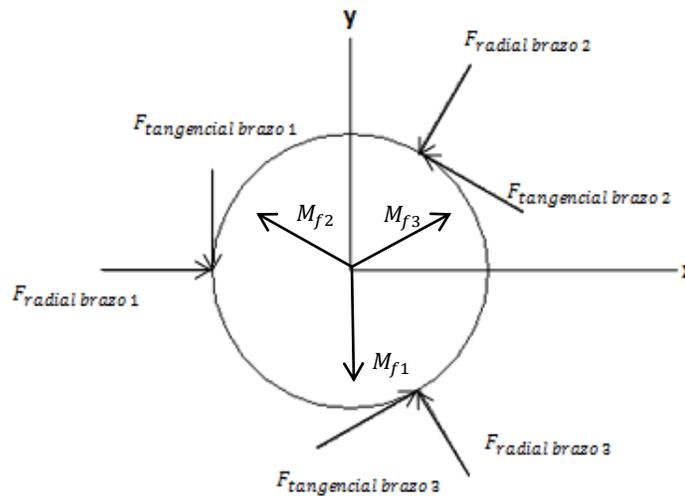


Figura 4.9 Reducción de las fuerzas de pata de arrastre sobre el eje

En la tabla 4.2 se muestran los valores de estas fuerzas:

Tabla 4.3 Fuerzas resultantes en los brazos de uniformizado

	Tangencial	Radial
Brazo 1	370,8	214,085
Brazo 2	289,036	166,875
Brazo 3	214,618	123,91

Las fuerzas de los brazos deben proyectarse sobre los ejes x e y sabiendo que forman ángulos de 60° y 30° para finalmente obtener las fuerzas resultantes sobre el eje:

$$F_x = F_{r1} - F_{r2} \cos 60 - F_{t2} \cos 30 + F_{r3} \cos 60 + F_{t3} \cos 30 = 128,15 \text{ N} \quad (4.13)$$

$$F_y = -F_{t1} - F_{r2} \cos 30 + F_{t2} \sin 30 + F_{r3} \cos 30 + F_{t3} \sin 30 = -156,18 \text{ N} \quad (4.14)$$

Al trasladar estas fuerzas se generan momentos flectores debido a la altura entre el punto de traslado de fuerzas en el eje (256.5 mm) y las fuerzas radiales:

$$M_{f1} = F_{r1} \times 0,2565 = 54,91 \text{ N.m} \quad (4.15)$$

$$M_{f2} = F_{r2} \times 0,2565 = 42,80 \text{ N.m} \quad (4.16)$$

$$M_{f3} = F_{r3} \times 0,2565 = 31,78 \text{ N.m} \quad (4.17)$$

Finalmente los momentos en el eje x e y serán:

$$M_x = -M_{f2} \cos 30 + M_{f3} \cos 30 = -9,54 \text{ N.m} \quad (4.18)$$

$$M_y = -M_{f1} + M_{f2} \sin 30 + M_{f3} \sin 30 = -17,62 \text{ N.m} \quad (4.19)$$

4.5.2 Dimensionamiento del diámetro del eje

Se analizará el eje en los planes XZ e YZ para graficar los diagramas de las fuerzas internas, de esta manera se tienen los siguientes DCLs:

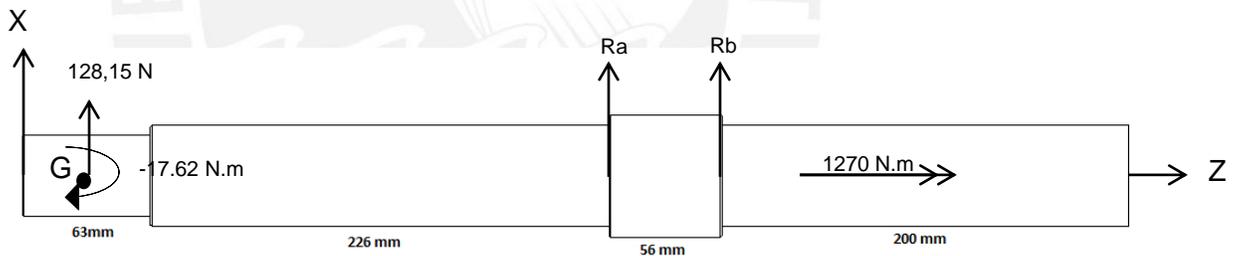


Figura 4.10 DCL del eje en YZ

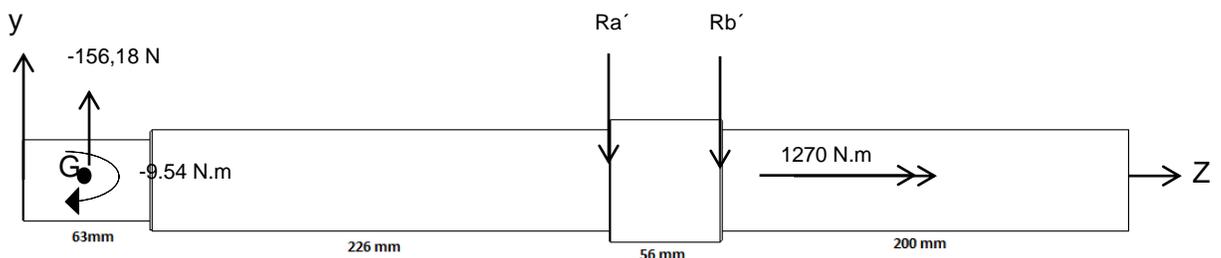


Figura 4.11 DCL del eje en YZ

Haciendo un análisis desde el punto G, ubicado a 31,5 mm del origen, se pueden obtener las siguientes ecuaciones y resultados:

$$R_a + R_b = 128,15 \quad (4.20)$$

$$0.2575R_a + 0.3135R_b = 17,62 \quad (4.21)$$

$$R_a = 402,77 \text{ N}$$

$$R_b = -274,62 \text{ N}$$

Análogamente:

$$R'_a = 703,97$$

$$R'_b = -547,79$$

En base a estos resultados se muestran los diagramas de fuerzas internas del plano YZ pues este es el más crítico:

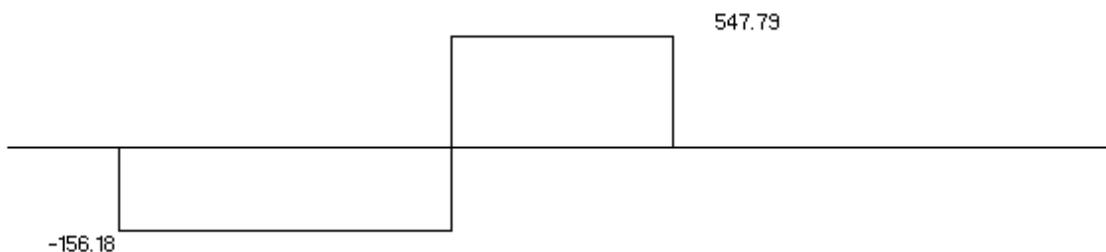


Figura 4.12 Diagrama de Fuerzas cortantes

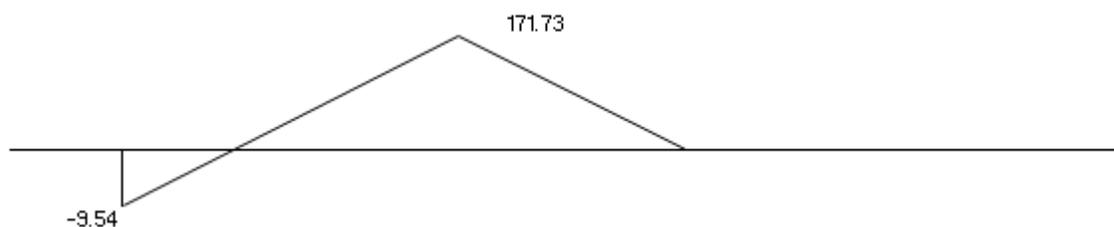


Figura 4.13 Diagrama de Momento Flector

1270



Figura 4.14 Diagrama de Momento Torsor

El material del eje será DIN 17 200 34CrNiMo6 y sus propiedades se muestran en la figura 4.9.

Material	RESISTENCIA (N/mm ²)								
	σ_B	σ_F	HB	tracc.-comp.		flexión		torsión	
	σ_B	σ_F		σ_{Pd}	σ_{Alt}	$\sigma_{t Pd}$	$\sigma_{t Alt}$	$\tau_{t Pd}$	$\tau_{t Alt}$
(Continuación de aceros bonificables según DIN 17 200)									
24CrMo4	650 a 800	600 450 260	hasta 2170	450	320	600	350	260	200
41Cr4 34Cr4	950 a 1100	800 550 320	hasta 2170	550	360	690	400	320	230
42CrMo4	1000 a 1200	1000 700 400	hasta 2170	700	400	770	450	400	260
34CrNiMo6	1000 a 1200	1100 800 400	hasta 2350	780	450	880	500	460	290
50CrMo4	1100 a 1300	1100 800 470	hasta 2350	790	450	850	500	470	290
30CrNiMo8	1250 a 1450	1260 900 500	hasta 2480	850	500	960	550	500	320

Figura 4.15 Propiedades de los aceros DIN 17 200

De acuerdo al criterio de Von Miseses se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_n + \sigma_f)^2 + 3(\tau_t + \tau_c)^2} \leq \frac{\sigma_f}{F.S} \quad (4.22)$$

Dónde:

$$\sigma_n = \frac{F}{A} : \text{Esfuerzo Normal, [MPa]}$$

$$\sigma_f = \frac{32.M_f}{\pi.d^3} : \text{Esfuerzo de Flexión [MPa]}$$

$$\tau_t = \frac{16.M_t}{\pi.d^3} : \text{Esfuerzo de Torsión [MPa]}$$

$$c = \frac{V}{A} : \text{Esfuerzo de Corte [MPa]}$$

El esfuerzo cortante es despreciable y se toma un F.S = 3.

Analizando la zona sometida solo a torsión se tiene:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3\left(\frac{16 \times 1270}{\pi \times d^3}\right)^2} \leq \frac{800 \times 10^6}{3}$$

$$d \geq 0,0347 \text{ m}$$

Analizando la zona sometida a torsión y flexión se tiene:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{32 \times 171.73}{\pi \times d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16 \times 1270}{\pi \times d^3}\right)^2} \leq \frac{800 \times 10^6}{3}$$

$$d \geq 0,035 \text{ m}$$

Ya que el motor-reductor seleccionado tiene agujero para un eje de 50 mm

En el anexo A4 (Cálculos de unión entre eje y cubo) se determinaron los elementos de transmisión entre el eje y el motor, así como entre el eje y los brazos de uniformizado. De esta manera se llega al siguiente resultado:

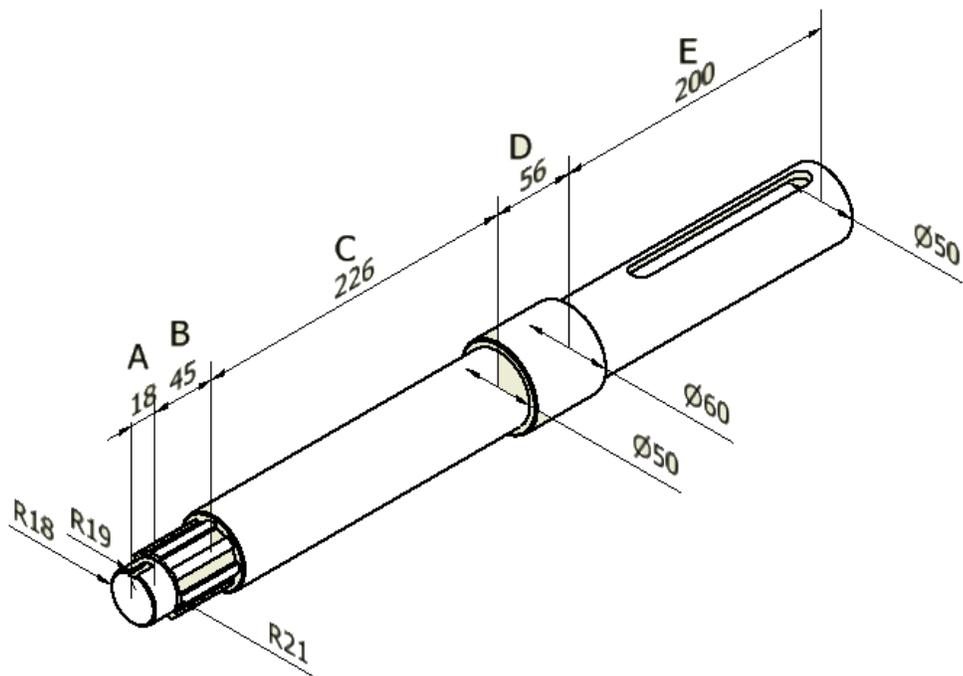


Figura 4.16 Dimensiones y geometría final del eje

En la siguiente tabla se muestran las dimensiones:

Tabla 4.4 Dimensiones del Eje

Sección	Longitud (mm)	Diámetro (mm)
A	18	35
B	45	42
C	226	60
D	56	60
E	200	50

4.5.3 Verificación por fatiga

La verificación se realizará en la zona crítica (B) y en el cambio de sección que ocurren entre la zona B y C. Haciendo uso de la expresión de Bach:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\alpha_o * \tau_{rt})^2} \leq \frac{c_s * c_t * c_{temp}}{FSr} * \sigma_{fal} \quad (4.23)$$

Dónde:

$FSr : 1.2 \dots 1.8$

$$\alpha_o = \frac{\sigma_{fal}}{1.73 * \tau_{tpul}}$$

$\sigma_{fal} : resistencia a la fatiga en flexión alternante [MPa]$

$\tau_{tpul} : resistencia a la fatiga en torsión pulsante [MPa]$

$\beta_f : factor de concentración de esfuerzos efectivo a la flexión$

$\beta_t : factor de concentración de esfuerzos efectivo a la torsión$

$C_s : coeficiente por acabado superficial$

$C_t : coeficiente por tamaño$

$C_{temp} : coeficiente por temperatura$

$$\sigma_{rf} = \beta_f * \sigma_f \quad (4.24)$$

$$\tau_{rt} = \beta_t * \tau_t \quad (4.25)$$

$$\tau_t = \frac{16 * M_t}{\pi * d^3} \quad (4.26)$$

$$\sigma_f = \frac{32 * M_f}{\pi * d^3} \quad (4.27)$$

Análisis de la zona B:

Considerando un FS=1,5 y obteniendo los datos de resistencias de la figura 4.9, se tiene:

$$\sigma_f = 699690,97 \frac{N}{m^2}$$

$$\tau_t = 50522145,13 \frac{N}{m^2}$$

$$\alpha_o = 0,635$$

$$\beta_f = 1 \text{ (Sin cambio de sección)}$$

$$\beta_t = 1 \text{ (Sin cambio de sección)}$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_s = 0,85 \text{ (Rz = 10)}$$

$$C_t = 0,68 \text{ (d = 50 mm)}$$

$$\sigma_{eq} = 8,75 * E^7 \leq 19,27 * E^7$$

Análisis en el cambio de sección:

Considerando un FS=1,5 y obteniendo los datos de resistencias de la figura 4.9, se tiene:

$$\alpha_o = 0,635$$

$$\beta_f = 1,67 \left(\frac{D}{d} = 1,2 \text{ y } \frac{r}{d} = 0,04 \right)$$

$$\beta_t = 1,6 \left(\frac{D}{d} = 1,2 \text{ y } \frac{r}{d} = 0,04 \right)$$

$$C_{temp} = 1$$

$$C_s = 0,85 \text{ (Rz = 10)}$$

$$C_t = 0,68 \text{ (d = 50 mm)}$$

$$\sigma_{eq} = 8,89 * E^7 \leq 19,27 * E^7$$

Por lo tanto el eje no fallara por fatiga.

4.6 Lista de planos

El objetivo de los planos es el de mostrar el ensamble de las diferentes partes del diseño elaborado y su funcionamiento por medio del plano de ensamble, así como brindar la información necesaria para la fabricación de las piezas dando las dimensiones, tolerancias y acabados por medio de los planos de despiece.

N°	DESCRIPCIÓN	LÁMINAS
1	PLANO DE ENSAMBLE	1 - A0 1 - A3
2	DESPIECE DEL BASTIDOR	1 - A1
3	DESPIECE DE LAS PLANCHA PERFORADAS	1 - A0
4	DESPIECE DE LA TAPA DE DESCARGA	1 - A2
5	DESPIECE DEL PUENTE	1 - A2
6	DESPIECE DEL EJE	1 - A3
7	DESPIECE DE LA EXTENSIÓN RADIAL	1 - A3
8	DESPIECE DEL BRAZO	1 - A3
9	DEPIECE DE LA PATA DE ARRASTRE	1 - A3
10	DESPIECE DE LA BASE PARA EL MOTORREDUCTOR	1 - A3
11	DESIECE DE LA BASE PARA EL EJE	1 - A3

CONCLUSIONES

1. Se consiguió cumplir con el objetivo principal del proyecto al diseñar una secadora de cacao capaz de secar 2 T/día mediante el uso de energía limpia para el producto y logrando mantener las condiciones de secado adecuadas para el grano (Temperatura menor o igual a 65°C y velocidad menor a 3.7 m/s) por medio de un sistema de uniformizado y la temperatura adecuada y de esta manera lograr reducir el contenido de humedad al 13%, siendo adecuada para su almacenaje.
2. La estructura principal garantiza un diseño seguro, manteniendo gran rigidez y resistencia. Se hizo uso de la metodología recomendada para este tipo estructuras y su modelación con los programas computacionales enseñados por la universidad.
3. El concepto de solución fue determinado combinando sistemas existentes de secado de grano estático y dinámico, mostrados en el estado del arte. De esta manera se logra ahorrar tiempo al operario al quitar la necesidad de agitar manualmente el producto cada 30 – 60 minutos, logrando cumplir con la sencillez en el uso de la máquina.
4. Si bien la utilización de gas e intercambiadores de calor pueden resultar más eficientes y baratos que las resistencias eléctricas, se descartó su uso pues el cacao tiende a absorber los olores, deteriorando su aroma y sabor, características fundamentales del producto en el mercado.
5. Si bien se podría disminuir el tiempo de secado trabajando a temperaturas más altas dentro de lo recomendado por los estudios referenciados en éste documento (81°C), se optó por una temperatura de 65°C para evitar quemar el cacao. Por otro lado, se trabajó con una velocidad de aire de 3 m/s, siendo lo máximo recomendado en los estudios mencionados de 3,7 m/s.

RECOMENDACIONES

1. Para el diseño se empleó una humedad relativa de 85%, siendo esta la más alta detectada en la costa peruana. Así mismo, se consideró una temperatura ambiente de 20°C. Es por ello que se recomienda hacer una prueba para determinar el tiempo de secado, pues este depende del medio en el que se realiza.
2. El equipo no es automático, por lo que se recomienda llevar a cabo un control de la humedad en los granos para así ayudar a determinar el tiempo adecuado de permanencia en el secador. También es importante mencionar que si el contenido humedad del producto llega a bajar del 7%, el cacao se vuelve quebradizo, perdiendo sus cualidades e incluso quemándose, aunque la velocidad de secado es decreciente al disminuir de su humedad crítica (31% para 65°C).
3. El tiempo de secado depende del contenido de humedad inicial del cacao, en este proyecto se tomó un valor 70% considerado un valor inicial muy alto. Se debe establecer las características del producto a secar, pues algunas sub-especies de cacao llegan a tener una humedad inicial de hasta 55%, y si se encuentra fermentado puede llegar a 45%.

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO UNO

1. Hoja botánica: Cacao [Web en línea].
<<http://perubiodiverso.pe/assets/HOJA-BOTANICA-CACAO1.pdf>>. [Consulta: 15-09-2013]
2. Benito S, J.A., “Tecnificación del cacao en la selva alta peruana”. Fundación para el Desarrollo del Agro, Lima (Perú); Proyecto Transformación de la Tecnología Agropecuaria (TTA), Lima (Perú).
3. MALESPÍN, M. “*El Cacao*”, editorial IICA, Nicaragua. 1982
4. MORENO, L, SANCHÉZ, J. “*Beneficio del cacao*”, editorial IICA, Honduras. 1989
5. Verano Atauje, W.C. “*producción de cacao en el distrito el Porvenir, provincial de San Martín de la región San Martín*”, Lima, 2012.
6. URQUHART, D.H., “*Cacao*”, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, editorial SIC, Costa Rica. 1963.
7. GALVEZ RAMIREZ, CANDIDO. “Almacenamiento y Conservación de Semillas”: Material Vegetal de Reproducción: Manejo, Conservación y Tratamiento. Pág. 8. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/80-402_material_vegetal_de_reproduccion__manejo_conservacion_y_tratamiento/80-402/5_almacenamiento_y_conservacion_de_semillas.pdf> [Consulta 20-02-2014]
8. Datos estadísticos de cacao peruano en junio de 2012 [Web en línea]. <http://www.appcacao.org/index.php?option=com_content&view=article&id=610:datos-estadisticos-de-cacao-peruano-junio-2012&catid=31:2012&Itemid=100029>. [Consulta: 06-09-2013]
9. Perfil del Mercado y Competitividad Exportadora de Cacao [Web en línea]. <http://www.mincetur.gob.pe/comercio/otros/penx/pdfs/Cacao.pdf>> [Consulta 07-09-2013]

CAPITULO DOS

10. W. McCABE y J. SMITH, “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill, España (1999).
11. VIAN ORTUÑO, A; OCÓA GRACÍA, J. “*Elementos de Ingeniería Química*”, Quinta

- edición, Editorial Gráficas, Madrid, España, 1976.
12. SING, P. y HELDMAN, D., "Introducción a la Ingeniería de los Alimentos". Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. (2000).
 13. MAUPOEY, P., BARAT, J. "Introducción al secado de alimentos por aire caliente". Editorial Universidad Politécnica de Valencia, España
 14. "Determinación De parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (*Theobroma cacao*)" [Web en línea]
<<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingein/article/viewFile/24483/25074>>
[Consulta: 21-09-2013]
 15. Héctor A. Tinoco, Diana Yomali Ospina, "ANÁLISIS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE CACAO PARA LA DISMINUCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO", Revista EIA, Julio 2010 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), ISSN 1794-1237 Número 13
 16. NDWUKU MACMANUS, C. "*Effect of drying air on the drying rate and drying constant of cocoa bean*", Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. MANuscripts 1091. Vol. XI., April 2019. [Web en línea]
<<http://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1091/1172>> [Consulta: 21-09-2013]

CAPITULO TRES

17. BELL, C., "*REPORT FOR LINK PROJECT AFM87 - Modified atmospheres at raised temperature, an alternative to methyl bromide as a means of ensuring clean, pest-free, hygienic standards in food commodities*"
<<http://www.cocoafederation.com/issues/fumigation/LINKkrepfor10cd.pdf>> [Consulta: 22-09-2013]
18. KNEULE, F. "*El Secado*", Tomo 1, Traducción por E. Chueca. Primera Edición. Bilbao: Urmo, S.A de Ediciones. 1982
19. SHELTON B. "*artificial drying of cocoa beans*", *Tropical agriculture, Trinidad y Tobago*.
20. Tamashiro Javier, Apuntes de Clases "*Termodinámica 1*" (2011). PUCP
21. TREYBAL, R. "*operaciones de transferencia de masa*", 2da edición, editado por

- McGraw-Hill, México. 1980
22. CRUZ R., JUAN, *“Transferencia de calor: Guía para la exposición en aula”*, PUCP, Lima, 2012.
 23. Peters M. y otros autores. *“Plant Design and Economics for Chemical Engineers”*, Quinta Edición, McGraw Hill. New York. 2003
 24. Wark K, *“Advanced Thermodynamics for Engineers”*, McGraw-Hill. New York, 1995
 25. MATAIX, C., *“Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas”*, McGraw Hill, 2da Edición, México, 1982
 26. Fox, R., McDonald, A ., *“Introducción a la Mecánica de Fluidos”*, McGraw Hill, 2da Edición, México, 1990
 27. McCabe, W., Smith, J., Harriot, P., *“Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”*, McGraw Hill, 7ma Edición, México, 2007
 28. Marks, L., *“Standard Handbook for Mechanical Engineers”*, 11va Edición, McGraw Hill, Nueva York, 2007
 29. Fierro, M., *“Diseño Térmico de un Secador tipo Plataforma”* Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica Superior del Litoral, Ecuador, 1990
 30. Costales, R., *“Estudio del secado de granos mediante fluidización”* Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 1995
 31. Alfonso Parra-Coronado, Gonzalo Roa-Mejía & Carlos E. Oliveros-Tascón. SECAFÉ Parte I: *“Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental”* v.12, n.4, 2008
 32. PARRA C. Alfonso., ROA M. Gonzalo., OLIVEROS T. Carlos E. SECAFÉ Parte II: *“Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. Artículo Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental”*. CENICAFÉ, 2008.
 33. GUTIERREZ F. Jhony M., SANZ U. Juan R., OROZCO H. Carlos A. *“Ventiladores Para Secadores de Café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos”*. 1ra ed. Chinchiná: Publicación de CENICAFÉ, 2012. ISBN 978-958-8490-11-3

CAPITULO CUATRO

34. Ravenet Catalán, Juan. “*Silos*”, Barcelona: Técnicos Asociados, 1977
35. Rögnitz, Hans. “*Estudio de las formas constructivas para la fabricación de máquinas y aparatos / G. Köhler*”, Barcelona: Labor, 1966
36. Roark, Raymond J. “*Formulas for stress and strain*”, Tokyo: McGraw-Hill, 1965
37. Bart-Plange, A. Dzisi, K., Addo, A., Teye, E., Kumi, F., “*A comparative Study of Some Physical Properties of Large and Medium Size Cocoa Beans from Ghana*”, ARPN Journal of Science and Technology, 2012, pág. 138, ISSN 2225-7217
38. Rodríguez, Jorge. Apuntes de Clase “*Resistencia de Materiales 2*”, PUCP. Fondo Editorial PUCP 2011
39. Álvarez, Miguel (2012), Apuntes de Clase “*Elementos de Máquinas 1*”, PUCP
40. *DIBUJO MECÁNICO 1*. PUCP. Fondo Editorial PUCP. 2009



ANEXOS

ANEXO 1 : Patente << Apparatus for cooling coffee, etc. >> Invento de Richard A. Green.

ANEXO 2 : Catálogo de elementos estructurales Aceros Arequipa

A2-I : Perfiles estructurales angulares (L).

A2-II : Perfiles estructurales de canal (U).

A2-III : Perfiles estructurales Tee (T).

A2-IV : Tubo de sección cuadrada estructural.

ANEXO 3 : Cálculo de Selección de Rodamientos

ANEXO 4 : Cálculos de Unión entre Eje y Cubo

A4.1 : Selección de Chaveta

A4.2 : Cálculo de Eje Estriado

ANEXO 5 : Hoja técnica del Polisilocano según ASTM 0 1418

ANEXO 6 : Catálogo de aislantes térmicos de lana de fibra de vidrio

ANEXO 7 : Catálogo de Calentadores de Conducto de Aire Rectangular

ANEXO 8 : Catálogo del Motor-reductor Sew Eurodrive

ANEXO 9 : Catálogo del Ventilador Centrifugo Soler & Palau

ANEXO 10 : Resultados a diferentes contenidos de humedad inicial

A10.1 : Secado de granos fermentados

A10.2 : Pre secado al sol