

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UNA SECADORA AUTOMÁTICA PARA GRANOS DE
CACAO CON CAPACIDAD PARA 60 KG**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Adrian Ysrael Acuña Sánchez

ASESOR:

Luis Enrique García Zevallos

Lima, Octubre, 2024

Informe de Similitud


Yo,**LUIS ENRIQUE GARCÍA ZEVALLOS**.....,
docente de la Facultad de**CIENCIAS E INGENIERÍA**..... de la Pontificia
Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado
...DISEÑO DE UNA SECADORA AUTOMÁTICA PARA GRANOS DE CACAO CON CAPACIDAD PARA 60 KG...

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) **ADRIAN YSRAEL ACUÑA SANCHEZ**,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de**16**.....%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **19/09/2024**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:**Lima, 02 de octubre de 2024**.....

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>García Zevallos, Luis Enrique</u>	
DNI: 09869730	Firma 
ORCID: 0000-0002-8057-6733	

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño de una máquina secadora de tambor rotatorio con capacidad para 60 kg de granos húmedos de cacao previamente fermentados, cuya función es reducir la humedad de los granos homogéneamente hasta un 8% en base húmeda. La eliminación de la humedad al interior del sólido seco es realizada por transferencia de calor mediante inyección de aire a 55°C.

Como desarrollo del proyecto, se presenta el diseño mecánico de la secadora según los requisitos establecidos en la etapa conceptual, definiendo las dimensiones necesarias del tambor rotatorio, de 740 mm de diámetro y 550 L de capacidad neta, su estructura de soporte, las especificaciones del sistema de descarga de granos y el motorreductor de 1.5HP, necesario para girar el tambor a 30 RPM. Posteriormente, se completa el diseño del sistema de generación de aire caliente, compuesto por un calentador de resistencias de 11 kW, un ventilador centrífugo de 0,15 kW, una termocupla y una lámina termoaislante de lana de roca necesarios para el calentamiento, transporte del aire y la conservación de la energía calorífica en el sistema de secado. Para el sistema de control de temperatura del aire se realiza el diseño y selección de los circuitos de electrónica de potencia, se selecciona el PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C para el control de los elementos eléctricos y electrónicos de la secadora y se realiza una simulación del sistema PID de control de temperatura que permite validar los parámetros del sistema de control. Por otro lado, a fin de aprovechar las características climáticas del entorno de operación del proyecto, se considera el diseño de un sistema de energía solar, compuesto por 4 paneles y un banco de baterías que suministran 1 kW de potencia a la secadora. Finalmente, se culmina con la evaluación de la inversión necesaria para el proyecto, que incluye el costo del desarrollo, fabricación e instalación de la secadora, la cual ofrece un presupuesto final estimado en S/39 780,60.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Adelia, y a mi padre, Ysrael,
por ser mi fuente inagotable de apoyo constante,
lecciones valiosas y amor incondicional.
A mis hermanas, Dalia, Aynara y Alessia.



ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
CAPÍTULO I	1
1. Definición y planificación de la tarea	1
1.1. Definición del problema	1
1.2. Propuesta de solución	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Metodología	3
2. Marco teórico	4
2.1. Clasificación y características del cacao	4
2.2. Tipos de secado de grano	5
2.3. Variables en el proceso de secado	7
3. Análisis del estado del arte	10
3.1. Secadoras de granos existentes en el mercado	10
3.2. Secadoras desarrolladas en la literatura científica	13
3.3. Patentes relacionadas con secadoras de granos	19
3.4. Normas y regulaciones con secadoras del grano de cacao	19
4. Requerimientos y requisitos del proyecto	22
4.1. Requisitos del usuario	22
4.2. Requisitos de diseño	23
CAPÍTULO II	27
5. Diseño conceptual	27
5.1. Descomposición funcional y síntesis de medios	27
5.1.1. Nivel 1: Función global de la secadora	27
5.1.2. Nivel 2: Funciones generales de los subsistemas de la secadora	30
5.1.3. Nivel 3: Funciones específicas de los subsistemas de la secadora	36
5.1.4. Árbol de funciones	44

5.2.	Síntesis de la estructura y del comportamiento general.....	45
5.2.1.	Arquitectura del sistema mecatrónico	45
5.2.2.	Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico	46
5.2.3.	Bosquejos del sistema.....	47
5.2.4.	Diagrama de comportamiento.....	48
CAPÍTULO III		50
Diseño del sistema mecatrónico		50
6	Diseño mecánico de la secadora.....	51
6.1	Dimensionamiento del tambor rotatorio	51
6.2	Diseño de la carcasa del tambor rotatorio.....	53
6.3	Cálculo de la potencia del motor	54
6.4	Dimensionamiento del eje del tambor	57
6.5	Diseño de levantadores	61
6.6	Diseño de estructura de soporte y selección de perfiles metálicos	64
6.7	Cálculo de las dimensiones de la tolva	70
6.8	Lista de planos	74
7.	Diseño del sistema de generación de aire caliente	75
7.1	Características climáticas del entorno de operación	75
7.2	Parámetros de secado.....	75
7.3	Cinética del proceso de secado	79
7.4	Dimensionamiento y selección del ventilador centrífugo.....	80
7.5	Diseño del ducto para conducción del aire caliente.....	86
7.6	Selección del calentador de resistencias	86
7.7	Selección del sensor de temperatura	91
8.	Diseño del sistema de control de temperatura de aire de secado.....	93
8.1	Selección del controlador.....	93
8.2	Diseño y simulación del sistema de control de temperatura.....	94
9.	Diseño del sistema de alimentación de energía	99
9.1	Cálculo de la energía eléctrica consumida por la secadora.....	100
9.2	Evaluación de alternativas de alimentación de carga	101
9.3	Alimentación por energía solar	102
10.	Diseño del sistema eléctrico-electrónico	105
10.1	Selección de componentes del tablero eléctrico	106

10.2 Cuadro de compatibilidad de puertos	109
Capítulo IV	111
Evaluación Económica	111
11. Costos de fabricación.....	111
11.1 Costos de componentes electrónicos	111
11.2 Costos de elementos mecánicos.....	112
11.3 Costos de sistema fotovoltaico.....	115
11.4 Costos de mano de obra	116
Conclusiones.....	117
Recomendaciones	118
BIBLIOGRAFÍA	119
ANEXO	



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Formas del secado natural	6
Figura 2 Velocidad de secado vs Humedad libre	8
Figura 3 Esquema de variables para el secado de grano de cacao	9
Figura 4 Proceso psicrométrico del aire de secado de semillas por convección	9
Figura 5 Secadora cilíndrica horizontal BENDIG SG	10
Figura 6 Silo circular CE-500	11
Figura 7 Secadora rotatorio IMSA	12
Figura 8 Secadora de bandejas G-5 I/C	12
Figura 9 Máquina híbrida para secado de granos de cacao	14
Figura 10 Curva de secado del cacao	15
Figura 11 Modelado de la máquina secadora automática para cacao	15
Figura 12 Planta piloto de secado de granos de cacao	16
Figura 13 Respuesta de controladores estudiados de flujo másico de combustible	17
Figura 14 Prototipo de secadora de granos tipo plataforma	18
Figura 15 Máquina secadora de granos verdes de café	19
Figura 16 Detalles de los requisitos de diseño	26
Figura 17 Tabla de evaluación de los medios para secar granos artificialmente	29
Figura 18 Tabla de evaluación de los medios del nivel 2	36
Figura 19 Tabla de evaluación de los medios del nivel 3	43
Figura 20 Árbol de funciones para la máquina secadora	44
Figura 21 Arquitectura del sistema mecatrónico	45
Figura 22 Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico	46
Figura 23 Vista isométrica de la secadora	47
Figura 24 Vista preliminar de perfil de la cámara interna de secado	48
Figura 25 Diagrama de comportamiento de la secadora durante la operación	49
Figura 26 Diagrama de comportamiento para motor y situación de emergencia	49
Figura 27 Secadora de granos de cacao	50
Figura 28 Segmento circular formado por granos de cacao	52
Figura 29 Modelo 3D del cilindro del tambor giratorio	53
Figura 30 Modelo 3D de carcasa de la cámara de secado	54
Figura 31 Representación de carga de granos mediante un anillo	54

Figura 32 Motorreductor de ejes ortogonales Transtecno CMB402	57
Figura 33 DCL del tambor giratorio	57
Figura 34 DCL del eje del tambor	58
Figura 35 Diagrama de momentos flectores en planos XY y XZ	59
Figura 36 Modelo CAD del eje del tambor	59
Figura 37 Simulación de esfuerzos en elementos de soporte	60
Figura 38 Modelo del ensamble de la cámara de secado	61
Figura 39 Dimensiones para un levantador angulado	61
Figura 40 Ensamble del tambor con el levantador	63
Figura 41 Geometría de la cámara de secado inclinada para descarga	64
Figura 42 Geometrías de la estructura según posición del actuador lineal	65
Figura 43 Perfiles rectangulares de acero galvanizado ASTM A500	67
Figura 44 DCL de la cámara de secado, vista lateral	68
Figura 45 Geometría de la tolva cónica	71
Figura 46 Geometría de la sección cónica	72
Figura 47 Sistema de generación de aire caliente	75
Figura 48 Carta psicrométrica de aire y agua a altas temperaturas	78
Figura 49 Contenido de humedad versus velocidad de secado	79
Figura 50 Coeficiente de codos de sección cuadrada y rectangular	83
Figura 51 Curvas de funcionamiento de ventiladores	84
Figura 52 Proceso de calentamiento con resistencias	86
Figura 53 Resistencias térmicas del ducto metálico	88
Figura 54 Diagrama de bloques de control	95
Figura 55 Esquema del bloque de potencia	95
Figura 56 Modelo del sistema de calentamiento del aire de secado	97
Figura 57 Comportamiento del sistema de calentamiento del aire	98
Figura 58 Respuesta del sistema de calentamiento en lazo cerrado	99
Figura 59 Sistema de alimentación eléctrica de energía solar	99
Figura 60 Radiación solar en Bagua del año 2018 al 2021	100
Figura 61 Diagrama de conexiones	105
Figura 62 Tablero de control de la secadora	107
Figura 63 Plano eléctrico de tablero de control de secadora	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de las principales variedades de grano de cacao	5
Tabla 2 Requerimientos y requisitos de usuario (1-2).....	22
Tabla 3 Requerimientos y requisitos de usuario (2-2).....	23
Tabla 4 Requisitos de usuario y diseño (1-3)	23
Tabla 5 Requisitos de usuario y diseño (2-3)	24
Tabla 6 Requisitos de usuario y diseño (3-3)	25
Tabla 7 Tecnologías utilizadas para el secado de granos	29
Tabla 8 Tecnologías utilizadas para calentar el aire	31
Tabla 9 Principios empleados para uniformización del grano	33
Tabla 10 Tecnologías utilizadas para interactuar con el operador	34
Tabla 11 Tecnologías utilizadas para energizar el sistema.....	35
Tabla 12 Tecnologías utilizadas para generar calor	37
Tabla 13 Tecnologías utilizadas para alimentar motores trifásicos.....	38
Tabla 14 Tecnologías utilizadas para transmitir potencia al eje del tambor	39
Tabla 15 Tecnologías utilizadas para Recepcionar señales de entrada	40
Tabla 16 Tecnologías utilizadas para medir la temperatura	41
Tabla 17 Tecnologías utilizadas para gestionar el sistema de control.....	42
Tabla 18 Tecnologías utilizadas para captar energía solar	42
Tabla 19 Tecnologías utilizadas para descargar la cámara de secado	43
Tabla 20 Dimensiones del tambor giratorio	53
Tabla 21 Especificaciones del motor seleccionado	57
Tabla 22 Propiedades físicas de los aceros considerados.....	58
Tabla 23 Resultados de la selección del rodamiento	61
Tabla 24 Especificaciones técnicas de actuador lineal eléctrico	67
Tabla 25 Resultados de análisis estático de los perfiles	69
Tabla 26 Resultados de análisis modal de la estructura	70
Tabla 27 Dimensionamiento de sección cónica de tolva.....	72
Tabla 28 Lista de planos.....	74
Tabla 29 Datos conocidos de aire y grano de cacao.....	80
Tabla 30 Velocidad del aire y tiempo de secado	80
Tabla 31 Características de ventilador centrífugo seleccionado	85
Tabla 32 Materiales aislantes evaluados	86
Tabla 33 Calentadores eléctricos evaluados	91
Tabla 34 Sensores de temperatura evaluados	92
Tabla 35 Señales de entrada y salida de la secadora	92
Tabla 36 Especificaciones técnicas de PLC Siemens S7-1200	94
Tabla 37 Consideraciones eléctricas para relé de estado sólido.....	96
Tabla 38 Especificaciones del panel solar seleccionado	103
Tabla 39 Especificaciones de la batería seleccionada	104
Tabla 40 Especificaciones del inversor cargador	105
Tabla 41 Especificaciones técnicas de variador de frecuencia Siemens G120	106
Tabla 42 Especificaciones para alarma sonora del tablero.....	107

Tabla 43 Tabla de nomenclatura	109
Tabla 44 Conexiones de componentes eléctricos/electrónicos.....	109
Tabla 45 Costos de componentes electrónicos	111
Tabla 46 Costo de elementos mecánicos	114
Tabla 47 Costo de elementos del sistema fotovoltaico.....	115
Tabla 48 Costo de mano de obra	115



CAPÍTULO I

1. Definición y planificación de la tarea

En el presente capítulo se ilustran los principales problemas existentes en el proceso de producción de granos de cacao, de tal modo que se pueda determinar la problemática del sector e idear una propuesta de solución. Por ende, se detallan el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de investigación, junto con la respectiva metodología de investigación a emplear. De igual modo, se incluye el marco teórico vinculado a la cosecha y secado de los granos, seguido del estado del arte de las secadoras de granos. El capítulo culmina con la determinación de los requisitos del proyecto partir de los requerimientos del potencial usuario.

1.1. Definición del problema

El Perú es calificado por la Organización Internacional del Cacao (ICCO) como un país en donde se produce y se exporta un cacao fino y de aroma. Según cifras del MINAGRI (2019), en el año 2018 se produjo 135,3 mil toneladas de cacao en grano. Posteriormente, en el primer semestre de 2019, la producción acumulada fue de 85,6 mil toneladas, un 20,0% por encima de la producción registrada en el mismo período de 2018. El cultivo del cacao (MINAGRI, 2016) se concentra en zonas tropicales de la selva a alturas entre 300 y 900 m.s.n.m., siendo San Martín, Junín, Cusco y Ucayali las regiones de donde proviene cerca al 80% de la producción nacional.

Tras la cosecha del fruto de los árboles de cacao, los granos pasan por etapas indispensables como la fermentación, secado y tostado. En particular, el secado tiene como objetivo principal la eliminación del exceso de humedad de los granos. Además, resulta primordial por establecerse durante ella las propiedades organolépticas finales del producto. Un correcto proceso de secado otorga cualidades agradables de aroma y sabor en los granos. Al culminarse, la humedad del grano debe ser reducida a un valor entre 8 a 15 % para evitar el desarrollo de mohos que deterioran la calidad y además para facilitar el almacenamiento, transporte, manejo y comercialización del cacao (Bertorelli et al., 2004).

El proceso predominante del secado del grano es artesanal. Tiene una duración de 4 a 10 días, dependiendo de las condiciones ambientales, y consiste en el secado al sol de los granos fermentados, distribuyéndolos en capas uniformes sobre superficies de cemento, madera o

lonas. Fuera del costo económico y variable conocimiento empírico de los pequeños y medianos productores sobre este método de secado, los principales problemas con los que cuenta son la exposición a condiciones ambientales agrestes como lluvia o rayos ultravioletas intensos, la falta de un secado uniforme y homogéneo entre los granos, y el igualmente grave contacto con contaminantes como insectos, bacterias y hongos.

El desarrollo de una propuesta de solución a este problema debe tomar en cuenta las condiciones ambientales de la zona de producción, la capacidad productiva del negocio, así como la variedad cultivada y las características organolépticas deseadas. De este modo, se perfilará como una opción viable para el productor, pues aumenta la calidad de su producto y permita incrementar su grado de competitividad en el mercado nacional e internacional del cacao.

1.2. Propuesta de solución

Se propone diseñar una secadora automática para los granos de cacao de origen Amazonas alimentada eléctricamente por energía solar y la red eléctrica local que permita reducir significativamente la posibilidad de contaminación del grano, garantice un secado uniforme y permita la obtención de las características organolépticas ideales del producto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de investigación es diseñar una máquina secadora automática de tambor rotatorio para el secado de granos de cacao de la variedad amazonas de capacidad de 60 kg.

1.3.2. Objetivos específicos

- ❖ Realizar el diseño conceptual de la máquina. Incluye la identificación de funciones y subsistemas, el diseño de una arquitectura del sistema mecatrónico y la evaluación de distintas propuestas de solución por medio de los requisitos de técnicos y económicos de diseño.
- ❖ Realizar el diseño mecánico de la secadora, que comprende la estructura de soporte, los mecanismos para el movimiento giratorio de la cámara de secado, se dimensionamiento y el análisis y simulación del comportamiento estructural y termodinámico de los componentes involucrados.

- ❖ Diseñar el sistema de generación de aire caliente, lo cual incluye el dimensionamiento de los componentes de acuerdo con la demanda de aire caliente del sistema y los medios para transportar el aire hasta la cámara de secado.
- ❖ Analizar y diseñar el algoritmo de control de temperatura del aire para el secado por convección
- ❖ Diseñar los subsistemas eléctrico y electrónico para el control del motor, los ventiladores y el tablero eléctrico, que incluye la interfaz para el usuario.
- ❖ Estimar el costo total de la máquina secadora automática de granos de cacao propuesta.

1.4. Metodología

La metodología que se emplea en este trabajo de investigación será la desarrollada en ‘Design methodology for mechatronic systems’, elaborada mediante el trabajo conjunto de la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Federal de Santa Catarina. Consiste en las etapas denominadas “Planeamiento y clarificación de la tarea”, “Diseño Conceptual”, “Diseño específico por dominios” y “Diseño integrador”. La primera parte integra:

- ❖ Definición de la problemática
- ❖ Idea preliminar del producto
- ❖ Marco teórico
- ❖ Estado del arte
- ❖ Requisitos de leyes, guías y reglamentos.
- ❖ Idea del producto

La segunda parte integra:

- ❖ Descomposición funcional y síntesis de medios
- ❖ Síntesis del comportamiento de la estructura general

Para la etapa del diseño del sistema mecatrónico, la tarea se divide en el diseño de los cinco subsistemas que en conjunto componen a la secadora. Estos subsistemas son el mecánico-estructural, el de generación de aire caliente, el de alimentación eléctrica, el eléctrico-electrónico y el de control de la temperatura de aire de secado. El diseño de cada uno de estos involucra la elaboración de una memoria de cálculo para el dimensionamiento y la selección adecuada de los componentes involucrados, planos y diagramas del sistema. Adicionalmente,

se desarrollan los modelos y programas necesarios para la realización de simulaciones de comportamiento de aquel subsistema que las requiera.

2. Marco teórico

A fin de abordar una solución para secado de granos de cacao según la problemática propuesta, resulta necesario definir preliminarmente algunos conceptos relacionados. En el siguiente apartado se presentan conceptos básicos vinculados al proceso estudiado, el elemento a procesar y los modos convencionalmente empleados para el secado de granos.

2.1. Clasificación y características del cacao

El cacao (*Theobroma Cacao L.*), perteneciente a la familia de las esterculiáceas, es un árbol de América de tronco liso de cinco a ocho metros de altura, de hojas lisas, duras y aovadas y flores amarillas y encarnadas. La clasificación convencional del cacao (García L., 2015) proviene de la propuesta de Philippe Lachenaud de 1997 que divide a las variedades de este fruto según su grupo genético:

- ❖ Criollo
- ❖ Forastero del Alto Amazonas (Amazonas)
- ❖ Forastero del Bajo Amazonas (Guyana)
- ❖ Nacional, originaria de Ecuador.

De igual modo, se suele considerar a la variedad Trinitario, un quinto grupo genético artificial. Por otro lado, debido a la gran cantidad de cultivares de árboles híbridos de cacao desarrollados durante muchos años y en distintas localidades y condiciones, las diversas organizaciones o centros de investigación asignan a una variedad específica un término típicamente alfanumérico denominado nombre varietal, p.ej. ICS-1, CCN-51, SHU-9, IMC 67, etc.

En la tabla 1 presentada a continuación se detallan las características más resaltantes de las variedades de cacao clasificadas según su grupo genético previamente mencionadas, así como de los cultivares más comunes en el país, como el cacao Chuncho y el CCN-51.

La clasificación cualitativa utilizada para el tamaño del fruto utiliza las denominaciones: Muy pequeño (<10 cm), Pequeño (10-14 cm), Intermedia (15-19 cm), Grande (20-24 cm) y Muy grande (>24 cm). Similarmente, para el tamaño de la semilla las denominaciones son

las mismas, pero con los rangos de valores en gramos "<0.8", "0.8-1", "1.1-1.4", "1.5-1.8" y ">1.8".

Tabla 1

Características de las principales variedades de grano de cacao

Variedad	Tamaño del fruto	Peso seco de semilla (g)	Tamaño de semilla	Contenido de grasa (%)	Dulzura de pulpa	Acidez de pulpa	Amargor de almendra	Astringencia de pulpa
Forastero del Alto Amazonas	Intermedio	0,7-1,3 (\bar{x} =1)	Intermedia - Pequeña	48-59 (54,4)	Media-Alta	Media-Baja	Media-Baja	Baja
Criollo	Intermedio - Grande	1,6	Grande	45-53	-	-	-	-
Trinitario	Grande	1,3-2,4 (\bar{x} =1,8)	Grande	46-59 (\bar{x} =52)	Media	Bajo-Medio	Media-Fuerte	Baja-Media
CCN-51	Muy grande	1,4	Intermedia	54	Media	Media	Media	Media
Chuncho	Intermedio - Pequeño	0,7-1,3 (\bar{x} =1)	Pequeña - Intermedia	52-56	Media	Baja	Media	Muy baja
Trinitario x Forastero	Intermedia - Grande	0,8-1,5 (\bar{x} =1,2)	Intermedia	48-58 (\bar{x} =55,7)	Media	Baja-Media	Media	Baja

Nota: Elaboración propia a partir del "Catálogo de cultivares de cacao del Perú" por García L., del Ministerio de Agricultura, 2015.

2.2. Tipos de secado de grano

Se describe el proceso de secado de granos según los dos grupos más generales en los que se puede clasificar: el secado natural y el artificial. Para ambos, se describe el proceso a fin de presentar las diferencias fundamentales entre los dos tipos, mediante el principio físico de acción, tiempos, variantes, ventajas y desventajas.

- **Secado natural**

El secado natural es una técnica que hace uso de los rayos del sol para poder reducir el porcentaje de humedad del grano que viene del proceso de fermentado con aproximadamente una humedad del 60% del peso total del grano. Los granos fermentados son esparcidos durante el día en patios de cemento, estirillas o tablas inicialmente en capas gruesas y a medida que se avanza en el proceso, que dura entre 4 a 10 días, se reduce el grosor. Concurrido el tiempo de secado, los granos deben quedar con un porcentaje de humedad entre 8 y 15%, pues si se reduce aun en mayor grado se llega a afectar la fragilidad del grano, volviéndolo más quebradizo (Nogales, 2006).

Este método tiene la ventaja de ser económico, simple, y consolidado entre los pequeños productores de cacao. Sin embargo, como indican Nogales et al. (2006) en referencia a los

trabajos de Jinap et al. (1994) y Gosh y Cunha (1975), este es un proceso muy lento comparado al secado artificial, requiere de una mayor área para el secado, es altamente dependiente de las condiciones climáticas del entorno. Además, se corre el riesgo de exponer el producto a hongos y bacterias, lo cual reduce considerablemente la eficiencia del proceso.

Algunas de las formas que el método suele adoptar se muestran a continuación. Se observa el secado haciendo uso de esterillas (Figura 1.a)), marquesinas (Figura 1.b)) y el secado tipo Elba (Figura 1.c)).



Figura 1: Formas del secado natural. a) Esterillas, b) Marquesinas, c) tipo Elba
 Tomado de “MÉTODOS DE SECADO DE CACAO” de Poscosecha Cacao (2017)

- **Secado artificial**

Esta clase de secado comprende a los métodos que hacen uso de máquinas que generan calor y lo transfieren a los granos de cacao comúnmente a través de conducción o convección térmica y, con menor frecuencia, por radiación. Según el principio específico para la transferencia de calor y los requisitos del cliente, empleando un sistema preciso de control de la temperatura, durante el proceso de secado se mantiene una temperatura estable dentro del rango de 50 a 80 °C, a fin de no afectar las propiedades químicas y organolépticas del producto. Debido a esto, el secado artificial permite reducir significativamente el tiempo necesario para reducir el nivel de humedad del grano a un porcentaje óptimo entre 8 y 15% del peso total del sólido.

Las máquinas secadoras emplean distintos principios mediante los cuales extraen el agua del grano. Una distinción significativa entre estos es el principio de transferencia de calor utilizado. Algunos aplican la conducción térmica para realizar su propósito, mientras que otras, que son la mayoría de las disponibles en el mercado, emplean aire caliente que extrae la humedad del aire por medio de la convección. Máquinas como las secadoras indirectas y las secadoras de rodillos logran reducir la humedad al conducir calor a los granos a través de

una superficie caliente que, en contacto con dichos sólidos, los calientan y elevan a su capa exterior la masa de agua interna para finalmente evaporarla.

Por otro lado, la convección es la transferencia de calor entre un fluido en movimiento y una superficie. Esta se puede realizar de manera simple, en la que debido a la acción de la gravedad o un diferencial de temperatura se origina el movimiento del fluido; así mismo, también ocurre que, por medios mecánicos, como bombas o ventiladores, se inicia el movimiento del líquido o gas con el que se inicia la transferencia de calor. Esta forma es conocida como convección forzada; esta diferenciación también se extiende al diseño de las secadoras. Para generar el flujo de aire caliente en sus cámaras, distintas máquinas utilizan la circulación natural, empleada en sistemas pequeños que no requieren de un gran caudal de aire para su funcionamiento, con rangos de velocidad del aire entre 0,4 y 1 m/s, y otras emplean la circulación forzada, necesaria para el procesamiento de grandes cantidades de granos o semillas y en la que el rango de velocidad de la corriente aérea oscila entre 0,5 - 1 m/s (Cueva et al., 2018).

Como ya se ha mencionado, un factor clave para un secado óptimo del grano de cacao por medio del secado artificial es el control preciso de las variables del proceso, como la temperatura, la presión en la cámara de secado y la humedad del aire húmedo que interactúa con los granos de cacao. Por lo tanto, resulta fundamental la revisión del proceso termodinámico del secado, lo cual es desarrollado a continuación.

2.3. Variables en el proceso de secado

Puesto que el secado de los granos constituye un proceso termodinámico, por el cual existe transferencias de masa y calor, se definen a continuación las variables principales del secado, que son asimismo tratadas a lo largo del presente trabajo.

Contenido de humedad en base húmeda: Es la proporción entre masa de agua en un sólido y su masa total. Está definida por expresión:

$$X_h = \frac{m_{agua}}{m_{seca} + m_{agua}}$$

Contenido de humedad en base seca: Es la proporción entre masa de agua en un sólido y la masa seca. Está definida por expresión:

$$X_s = \frac{m_{agua}}{m_{seca}}$$

Humedad relativa: Es la relación entre la presión de vapor de agua contenida en el aire húmedo a determinada temperatura y la presión de saturación, la presión de vapor de agua a la cual el aire no es capaz de contener más vapor a dicha temperatura sin condensar.

$$\phi = \frac{p_{vapor\ de\ agua,T}}{p_{saturación,T}}$$

Velocidad de secado: Se define como la pérdida de humedad del material húmedo con respecto a la unidad de tiempo. Es expresada convencionalmente mediante:

$$W = -\frac{S}{A} \frac{dX}{dt}$$

Donde S es la masa inicial del sólido (Kg), A el área de la superficie de secado (m^2) y dX/dt el cociente diferencial de la humedad libre respecto al tiempo.

Con las curvas de cinética de secado puede tenerse una idea del consumo de energía, el mecanismo de migración de humedad, del tiempo de secado y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso de secado por convección. Con los datos de laboratorio obtenidos del estudio de Nonhebel (1979), se realizó un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo y velocidad de secado en función de la humedad libre, diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire, y se logró identificar los regímenes de secado.

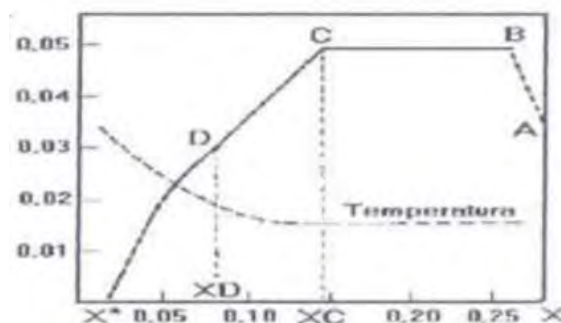


Figura 2: Velocidad de secado vs Humedad libre

Nota: Tomado de Nonhebel (1979) "El secado de sólidos en la industria química"

Se identifican tres etapas en la curva de la figura 3. La etapa AB es el calentamiento inicial, de corta duración, en la que el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de bulbo seco, en la que las condiciones de la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado. La etapa BC es el periodo de secado a velocidad constante, en la que el agua interna del grano se eleva por capilaridad a la superficie del sólido húmedo. Por último, en la etapa CD, la velocidad de secado decrece a una tasa constante junto a la humedad tras romper el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura. Del punto D en adelante, si no se llega a la humedad de equilibrio, la velocidad de secado se hará más lenta hasta llegar al equilibrio.

En el modelamiento del sistema de secado de granos de cacao bajo convección forzada, P. Parra (2015) la comparación entre la dinámica de funcionamiento planteada en su modelo de una secadora de cámara cilíndrica rotatoria y los de una planta de secado real. Para el modelo se consideran el flujo másico de aire de secado (W_g), la humedad interna del cacao en base seca (X_{int}), la humedad superficial del cacao en base seca (X_{sup}) y el flujo de difusión (W_{dif}), variables observables en la figura 3. En el modelo se analiza la dinámica del flujo de difusión, el cual transporta humedad desde la parte interna del grano hacia la capa superficial del mismo, y el flujo de evaporación, que transporta la humedad desde la superficie hacia el gas de secado. Parra comprueba que las variables de humedad y temperatura, tanto para el cacao como para el aire caliente de secado, varían a través del tiempo y en función de la posición dentro del cilindro de secado.

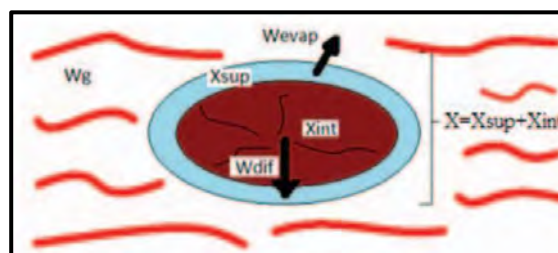


Figura 3: Esquema de variables para el secado de grano de cacao

Nota: Tomado de “Modelado y Simulación en Parámetros Distribuidos para un Secador de Cacao” por Parra (2015)

De igual modo, el secado de los granos por convección se puede analizar en relación con los procesos psicrométricos que experimenta el aire caliente de secado. Como se observa en la figura 4 a continuación, el trayecto AB, denominado calefacción sensible, corresponde al calentamiento del aire sin aumento de la masa de agua en este; la humedad específica permanece constante. Luego, el trayecto BC ilustra la etapa de humidificación del aire por

enfriamiento, durante la cual la masa de agua interna se transfiere a la superficie y es posteriormente evaporada; en consecuencia, se reduce la humedad del grano. Mientras mayor sea la diferencia en humedad específica en este tramo, se puede afirmar que la eficiencia del proceso es mayor (Buenaver et al., 1992).

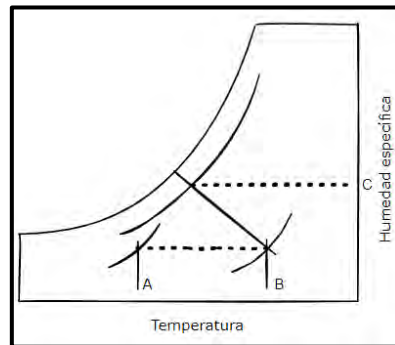


Figura 4: Proceso psicrométrico del aire de secado de semillas por convección

Nota: Elaboración propia

3. Análisis del estado del arte

En este apartado se analiza el estado del arte de las secadoras ofrecidas en el mercado, los desarrollados en la literatura científica y las patentes asociadas a la tecnología utilizada por dichas máquinas. Además, se presentan los requerimientos que debe cumplir el producto según las normas y regulaciones respectivas.

3.1. Secadoras de granos existentes en el mercado

A continuación, se presentan 4 tipos de tecnologías empleadas por las secadoras de granos comercialmente disponibles. Estas suplen principalmente la demanda de los productores industriales de insumos derivados del cacao.

- **Secadora cilíndrica horizontal BENDIG SG**

Secadora de tipo rotativa del fabricante costarricense BENDIG Maquinaria S.A. diseñada para el secado de granos de cacao. Fabricada en acero laminado y perfiles de acero. Tanto para la carga como la descarga, se hace uso de un elevador de huacales o cangilones, con la adición de un transportador helicoidal para la descarga del grano seco. Para el calentamiento del aire de secado, su horno de fuego indirecto puede configurarse para usar GLP o cascarilla de café como combustible según los requerimientos del usuario. Integra un sistema de control de temperatura en el rango menor a 65°C, útil tanto para el secado como presecado. Su capacidad según el modelo va desde los 0.7 a 21.5 ton de grano húmedo. La humedad final

es del 12%, alcanzada tras un tiempo promedio de 24 horas con oreado y de 26 horas sin oreado.



Figura 5: Secadora cilíndrica horizontal BENDIG SG
Tomado de sitio oficial de BENDIG MAQUINARIA S.A. (s.f.)

- **Silo circular CE-500**

Secadora de tipo vertical circular desarrollada por la empresa colombiana INGESEC® para el secado de granos de café y cacao. Consta de un silo cilíndrico de dos niveles, elaborado a partir de planchas de acero inoxidable. Para el calentamiento del aire de secado se hace uso de un intercambiador de calor de gases indirectos. Dos compuertas al interior de la secadora permiten la inversión del flujo de aire en la cámara inferior para el secado; en la cámara superior de presecado el flujo siempre ira de abajo hacia arriba, mientras que el flujo es invertible en la cámara inferior (sentido 1, de arriba abajo; 2, de abajo arriba). El rango de temperaturas del aire de secado es de 50°C máximo para el sentido de flujo 1 y 60°C para el sentido de flujo 2. La carga se realiza con ayuda de una bomba centrífuga que eleva los granos hasta la cámara superior. La descarga rápida del grano seco es posible por una compuerta elevable en la cámara inferior. En ambos pisos se cuenta con los brazos agitadores niveladores; la agitación en el piso inferior es realizada cada dos horas. El secado en total tarda entre 24 a 30 horas y se obtiene una humedad final del 11%.

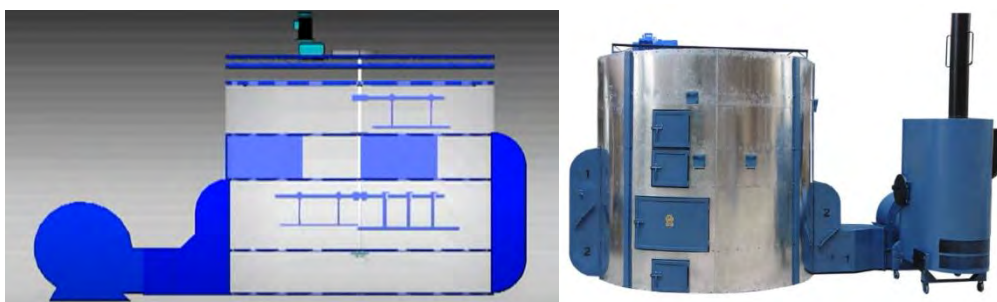


Figura 6: Silo circular CE-500

Tomado de sitio oficial de INGESEC (s.f.)

- **Secadora rotatoria IMSA**

Secadora de tipo rotativa del fabricante peruano IMSA para el secado de granos de café y cacao. Consta de una cámara cilíndrica de 2.4 m^3 , 2 m de diámetro y 1.2 m de largo con un sistema de lubricación sellada que reduce el riesgo de contaminación del grano. El soporte de dicha cámara es de acero estructural ASTM A-36. Para la carga del material húmedo se emplea una elevadora de cangilones de 5x4"; para la descarga, se cuenta con una faja transportadora tubular de 25 cm de diámetro. El intercambiador de calor puede emplear cascarilla de café como combustible y dosificar su entrada mediante un dimmer electrónico. El rango de control de temperatura es 35-80°C. Para el flujo, de hasta $5500\text{ m}^3/h$, se integra un ventilador radio centrífugo de 90°.

El secado en total tarda aproximadamente 24 horas y se obtiene del proceso una humedad final del 11 a 11.5 %. Este modelo es apreciable en la figura 7 a continuación.



Figura 7: Secadora rotatorio IMSA

Tomado de sitio oficial de IMSA (2020)

- **Secadora de bandejas Serie G I/C**

Secadora de bandejas del fabricante y distribuidor peruano VULCANO TEC para el secado y deshidratación de diversos alimentos como frutas, hierbas, cereales, etc. Las superficies en contacto con el sólido húmedo son elaboradas de acero inoxidable AISI 304 y de acero al carbono en la cubierta externa. La carga y descarga en la secadora de bandejas es realizada de forma manual y requiere de por lo menos un operador. Así mismo, la cámara de secado consta de dos cabinas independientes con puertas herméticas y guías para bandejas con aislamiento térmico. La capacidad varía según modelo, desde 28 bandejas de 600x885

mm hasta 56 de 600x1770 mm. Para la unidad de calentamiento cuenta con un quemador a gas automático de 250 BTU y, dependiendo del modelo, uno o dos motores monofásico de 2.6 HP para la generación y distribución homogénea del flujo de aire. La temperatura máxima de operación es de 90°C.



Figura 8: Secadora de bandejas G-5 I/C

Tomado de sitio oficial de VULCANO TEC (s.f.)

3.2. Secadoras desarrolladas en la literatura científica

El siguiente grupo de máquinas secadoras se caracteriza por cada una emplear una tecnología desarrollada desde el ámbito académico. Por un lado, estas presentan alternativas de solución a tecnologías ya consolidadas en el mercado, a efectos de variar alguno de los subsistemas componentes y obtener un proceso más eficiente. Por otro lado, en los proyecto se analiza una planta existente de secado y se busca optimizar los sistemas de control.

- **Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura**

El trabajo de Barbecho y Loja (2019) presenta el proceso de diseño de una máquina híbrida de secado de granos de cacao de tambor rotatorio y la implementación del prototipo respectivo. La localidad a partir de la cual se realiza el estudio del proceso y técnicas de secado del grano corresponde a la zona Troncal ecuatoriana de la provincia de Cañar.

El prototipo de la secadora de tipo rotatoria es un ensamble constituido principalmente por cinco elementos. Primero, la estructura base está elaborada de perfiles cuadrados de acero sobre los que se montan la cámara de secado, la base para el motor, los rodamientos y el reductores de velocidad. Luego, se tiene la cámara cilíndrica de secado, construida a partir de una plancha de acero inoxidable rolada y perforada para permitir el flujo del aire caliente de secado. Debido al análisis realizado por los autores de las condiciones geográficas y

meteorológicas de la zona productora de cacao estudiada, se incluyó en el proceso de diseño la implementación de un colector solar de plana que en conjunto con un intercambiador de calor que utiliza GLP como combustible constituyen el sistema de generación de calor para el aire de secado, y son el tercer y cuarto elemento fundamental de la secadora. Por último, se tiene el tablero del sistema de control; en su interior se encuentra el microcontrolador y los relés y en el exterior los pulsadores selectores y pilotos de iluminación.

El sistema de control implementado cuenta como interfaz al tablero eléctrico, desde el cual se controla el inicio/parada de operación y el encendido seguro del gas GLP en el intercambiador de calor. La temperatura del aire de secado es de 70°C; es monitoreada por un sensor de temperatura de rango -55°C a +125°C y precisión $\pm 0.5^\circ\text{C}$ y regulada mediante un controlador ON/OFF encargado del quemador.

El dispositivo construido registra una capacidad de secar 50 kg con humedad inicial de 55.5 % en un tiempo de 9 horas con una humedad final de 7.04%. La figura a continuación muestra el prototipo de secadora desarrollado.



Figura 9: Máquina híbrida para secado de granos de cacao

Tomada de Barbecho y Loja (2019)

- **Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg**

Esta máquina secadora fue desarrollada como parte del trabajo de titulación de Cueva et al. (2018) para la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en Riobamba, Ecuador. La máquina construida de capacidad de 500 Kg consta de un quemador con blower, una plataforma para carga/descarga, una cámara cilíndrica de secado de acero inoxidable AISI 304, de 2 metros de diámetro y 1220 mm de altura y un brazo agitador del mismo material.

Dicho brazo, también denominado sistema removedor de la cámara cilíndrica, garantiza el secado uniforme de los granos de cacao; el eje de este elemento se encuentra anclado al motorreductor trifásico de 3 HP de potencia, que se mantiene accionado durante todo el proceso girando a 3 RPM. Por otro lado, el flujo de aire caliente de $4.71 \text{ m}^3/\text{s}$ a 44°C es generado a partir de un ventilador centrífugo de 2,1 kW y calentado mediante un quemador de 270 BHP que utiliza GLP. El combustible escogido se considera más eficiente en comparación a los intercambiadores de calor o mediante resistencias eléctricas, además de contar con el beneficio de que reduce su efecto en las propiedades de aroma del cacao durante el secado al estar en contacto indirecto con los granos.

En lo relativo al sistema eléctrico/electrónico de control, el circuito de potencia y control se encuentran en el panel de control, que permite al operario la puesta en operación de la máquina, la activación del control automático del quemador y el encendido/apagado del motorreductor y su variador de frecuencia respectivo. Los sensores e indicadores piloto por su parte son controlados mediante un PLC Logo 7 de Siemens, según lo indicado por los autores.

La curva de secado obtenida de las pruebas de funcionamiento puede ser observada en la figura 10 a continuación. En esta gráfica se compara la humedad y la temperatura externa del grano con respecto al tiempo, indicado en minutos. La toma de datos fue realizada cada diez minutos.

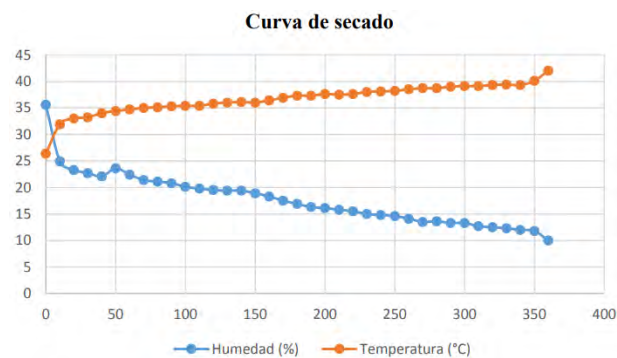


Figura 10: Curva de secado del cacao

Tomado de Cueva et al. (2018)

En conclusión, la máquina secadora automática para cacao logra un secado adecuado de los granos con humedad inicial entre 55 y 60% hasta un 9% de humedad final, manteniendo una temperatura entre 43 a 44°C durante el proceso, tras en un período de 6 horas de secado, mejorando así la eficiencia y producción en gran margen respecto al secado artesanal.

El modelado final de la secadora vertical, donde se pueden observar todos sus componentes integrados, es mostrado en la figura 11 a continuación.

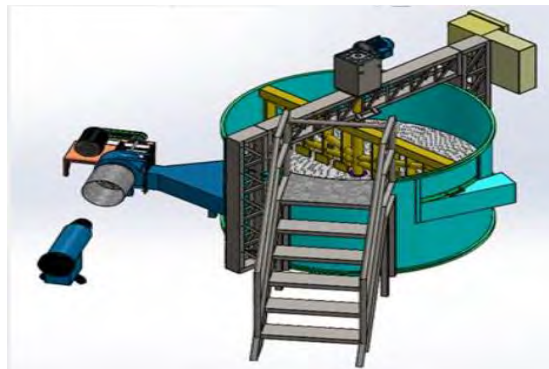


Figura 11: Modelado de la máquina secadora automática para cacao

Tomado de Cueva et al. (2018)

- **Modelado de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente**

La tesis doctoral de Parra (2017) presenta una propuesta alternativa a las técnicas de secado natural a baja escala. La propuesta consiste en una planta piloto para el secado forzado de cacao, que, por un lado, en lo referente a elementos mecánicos, integra cuatro sistemas: el dosificador de granos, el generador de aire caliente, la cámara de secado y el receptor de los granos secos, visibles en la figura 12; por otro lado, el sistema de control de temperatura representa un gran aporte de la propuesta en razón del análisis, explicación y validación que el autor presenta a cerca del modelo matemático del proceso de secado de granos de cacao.



Figura 12: Planta piloto de secado de granos de cacao

Tomado de Parra (2017)

Para el modelado de la planta de secado, Parra plantea las ecuaciones de un modelo de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos; este último que considera los parámetros de secado como temperatura, flujo másico de cacao, vapor y gas de secado como

variables en el tiempo y posición en la cámara de secado. Dichos modelos son después validados en la simulación de la planta y utilizados para el diseño de los controladores. El error promedio entre los valores reales y los predichos por el modelo de parámetros distribuidos, obtenido durante la validación, fue de 1.9% del valor real, con una desviación estándar de 0.018. Después de las pruebas experimentales de los controladores NEPSAC(), GPC y PID, Parra resalta el rendimiento del primero con respecto a los demás, principalmente en cuanto a su comportamiento de la variable manipulada y su capacidad para reducir el consumo de combustible y alargar el tiempo de la electroválvula en el intercambiador de calor, apreciables en la figura 13 a continuación. No obstante, menciona igualmente el mejor seguimiento de la temperatura de referencia con el controlador PID.

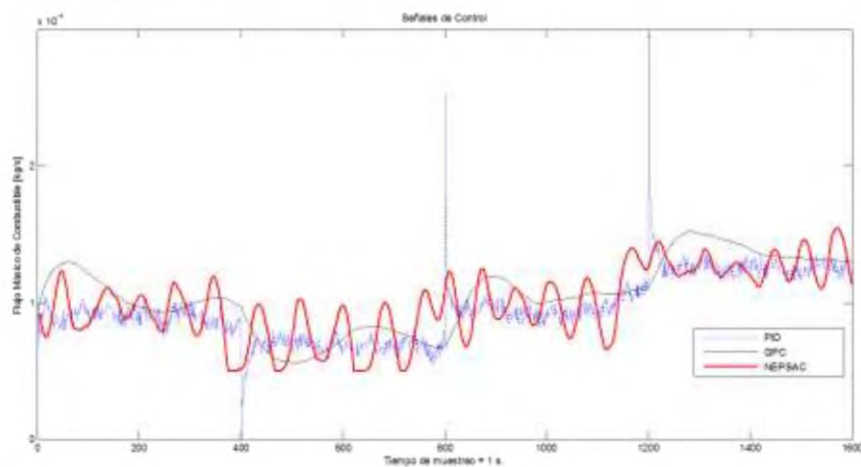


Figura 13: Respuesta de controladores estudiados de flujo másico de combustible [kg/s]

Tomado de Parra (2017)

Las pruebas de funcionamiento y la optimización progresiva de los parámetros de operación dieron como resultado el secado de 200 kg de granos de cacao con humedad en base seca inicial de 55% hasta una humedad final entre el 7 y 8%, en un periodo promedio de 10 horas. Por ese motivo, se concluye que el producto final se obtuvo en un tiempo significativamente menor al del secado natural de duración de entre tres y seis días, con granos más homogéneamente secados y sin penalizaciones al costo de comercialización por granos no secos.

- **Análisis y selección de proceso de secado de cacao y diseño de prototipo de una unidad secadora tipo plataforma**

El proyecto de grado para la Universidad Estatal de Milagro en Ecuador implementa un prototipo de secadora tipo plataforma con capacidad de 35 kg. La unidad secadora consta principalmente de una cámara de secado rectangular, un sacudidor, y el intercambiador de calor debajo de este por donde se hace fluir el aire caliente que llega a la cámara de secado.

La incorporación del sacudidor en la plataforma donde se aloja la cama de grano sirvió como medio para mejorar la homogeneidad del secado, además de evitar la obstrucción con granos de cacao de los orificios por donde cruza el flujo de aire caliente. La construcción de la tina de la plataforma con madera se justifica por diversos factores. Por un lado, se puede mencionar que, al ser la madera un material muy utilizado y disponible para los agricultores, su uso en el secado es conveniente para concretarse en ella el proceso de la determinación de las propiedades organolépticas del grano de cacao. Por otro lado, su buena capacidad de retención del calor en el interior de la cama evita pérdidas de calor y, por lo tanto, favorece al ahorro energético. Además, esta selección de material minimiza la transferencia de calor por conducción que, en el caso de que fuera la tina hecha de metal, provoca generalmente que se quemen los granos con los que entre en contacto directo.

El secado en este equipo se compone de 2 etapas de 2 horas cada una, con un intervalo de 24 horas entre ellas. La temperatura inicial utilizada para el secado del grano húmedo fue de 90°C y con máxima velocidad en el sacudidor, por un lapso de 30 minutos. Transcurrido este lapso, se baja la temperatura hasta 60°C y el sacudidor opera al 75% de velocidad. Cuando se inicia la segunda etapa, necesaria para el ascenso del agua interna del grano a la superficie, la temperatura se sitúa entre 50 y 60°C y el sacudidor es configurado al 50% de velocidad hasta que el cacao haya llegado a la humedad requerida de 7%. El prototipo final de la secadora se observa en la figura 14.

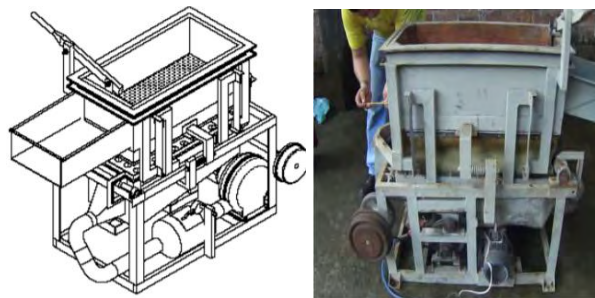


Figura 14: Prototipo de secadora de granos tipo plataforma

Tomado de Gilces y Sanmartín (2013)

3.3. Patentes relacionadas con secadoras de granos

Resulta necesario hacer una revisión de las patentes vinculadas a secadoras de granos. El objetivo es buscar alternativas que podrían hacer más eficiente al sistema, ayuden a economizar costos, den alternativas de solución o atiendan un asunto no previsto en el diseño. Se presenta la siguiente patente a continuación.

- **CN217604562U *Green Coffee Bean Drying Device***

En la patente se describe una secadora de tipo rotatoria para granos de café. Los autores distinguen 12 elementos componentes de la máquina secadora, indicados con su número en la figura 15. Para la carga cuenta con un alimentador de tornillo (10) configurado a modo de rampa diagonal que entra por la tolva superior (9). La máquina es móvil gracias a la plataforma con ruedas (7) en su base. La cámara de secado consiste en un contenedor externo estático (1) y un tambor rotatorio (2), elaborado de una plancha con perforaciones de 1 mm, que contiene tres barras (4) en un arreglo circular que sirven de traíllas homogeneizadoras. Dado que el secado se hace mediante una convección forzada, en la pared del contenedor están embridados los ejes de cuatro ventiladores axiales (3) que generan el flujo de aire, limpio debido a la malla metálica filtrante (3) que antecede la entrada del aire al tambor interno. El flujo de aire sigue su camino por una manguera (6) ancha, flexible y retráctil. El grano seco es descargado desde la bandeja inclinada (5) en la parte lateral inferior de la secadora.

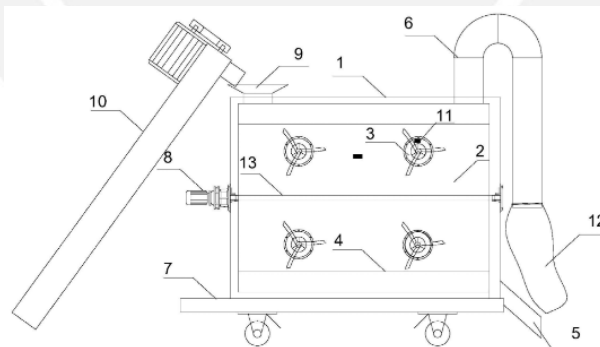


Figura 15: Máquina secadora de granos verdes de café

Tomado de patente CN217604562U de Li et al. (2018)

3.4. Normas y regulaciones con secadoras del grano de cacao

A continuación, se presentan los lineamientos sugeridos y/o exigidos por parte de organismos internacionales relevantes en el rubro del cacao y comités técnicos nacionales de normalización.

- **CAOBISCO/ECA/FCC: “Cocoa Beans: Chocolate and Cocoa Industry Quality Requirements”.**

La presente guía pretende ser un instrumento de información para los participantes en la cadena internacional de suministro del cacao. El documento reúne información clave de aspectos como el cultivo del cacao, seguridad alimentaria y calidad, ofreciendo al mismo tiempo enlaces a fuentes más especializadas.

En lo relativo al secado, los distintos organismos dan como recomendaciones los siguientes puntos rescatados:

- ❖ Los fabricantes requieren que el cacao en grano tenga un contenido de humedad de aproximadamente el 7%. Si supera el 8%, implica no sólo una pérdida de material comestible, sino también un mayor riesgo de crecimiento de mohos y bacterias, con consecuencias potencialmente graves para la seguridad alimentaria, el sabor y la calidad para la elaboración. Con un contenido de humedad inferior al 6.5%, la cáscara será demasiado frágil y los granos se desintegrarán, dando lugar a una proporción elevada de granos rotos. (p. 35)
- ❖ En los secadores artificiales se debe controlar con cuidado la velocidad de secado. Si los granos se secan rápidamente a temperaturas elevadas, se da paso a un sabor excesivamente ácido y a un estado en que se inhiben las reacciones de formación del sabor a cacao durante el secado y tostado posterior. (p. 61)
- ❖ Es esencial evitar el uso de fuegos de madera y cualquier otro medio de quema directa de combustibles, dado que éstos darán lugar a sabores indeseados a humo y también a la contaminación con HAP (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos). (p. 62)
- ❖ Los secadores que queman combustible deben incorporar intercambiadores de calor, y su diseño, operación y mantenimiento debe impedir que los granos entren en contacto con gases y humos de combustión durante el secado y durante el almacenamiento de los granos secos. (p. 62)

- **Norma Técnica Peruana NTP 208.040: CACAO Y CHOCOLATE. Buenas prácticas para la cosecha y el beneficio.**

Esta norma desarrollada por el INACAL establece las buenas prácticas y proporciona orientación para el proceso de obtención del grano de cacao desde la cosecha hasta el beneficio, con el objetivo de asegurar la calidad del producto. El término “cosecha” abarca la recolección, siembra y extracción de las almendras; mientras que el beneficio comprende el fermentado, secado, limpieza y almacenado.

La importancia de esta norma radica en las diversas cooperativas agrarias cafetaleras y cacaoteras, que congregan a cientos de agricultores del rumbo, que han adoptado los lineamientos de esta norma para una buena calidad de sus productos. Los aspectos desarrollados de interés a este proyecto son los que tratan con la etapa de secado y el control del desarrollo de los mohos.

En lo relativo al secado se rescata:

- ❖ El proceso de secado debe alcanzar un contenido de humedad del grano tan bajo como sea posible; ..., para ser almacenados con seguridad se debe reducir a un límite no mayor a 7%. (p. 8)
- ❖ Mantener los áreas, equipos e implementos de secado limpios y en buen estado. Los equipos e implementos deben ser de uso exclusivo para el secado. (p. 9)

Con relación a la prevención del riesgo micotoxicológico y con ello el control del desarrollo de los mohos:

- ❖ Aplicar medidas de prevención para el control de mohos en todas las fases de producción del grano (...) durante la cosecha (selección de granos, adecuada fermentación, buen secado) y en el almacenamiento y transporte. (p. 11)

4. Requerimientos y requisitos del proyecto

Compréndase requerimiento del usuario como la solicitud presentada por las partes interesadas/potenciales usuarios. Los requisitos del usuario representan una traducción clara y concisa del requerimiento asociado y son la base para formular los requisitos de diseño.

4.1. Requisitos del usuario

Sobre la base de la información recopilada de los normas técnicas, literatura científica y encuestas realizadas a cooperativas agrarias cacaoteras, se realiza la categorización respectiva de los requerimientos identificados, para determinar los requisitos de usuario. Se muestran en las tablas 2 y 3 a continuación los requerimientos clasificados y su traducción en requisitos.

Tabla 2

Requerimientos y requisitos de usuario (1-2)

Categoría	Requerimiento de usuario	Requisito de usuario
Funcionalidad	-La secadora debe secar el grano de manera uniforme	- Secado uniforme
	-El proceso debe evitar el crecimiento de moho y bacterias	- Que evite el crecimiento de moho y bacterias
	-El grano secado debe tener buen sabor y olor	- Buen sabor y olor del grano seco
Ergonomía	-Debe ser cómodo para el operario cargar y recoger el grano de la máquina	- Carga y descarga ergonómica
	-No se quiere que la secadora sea ruidosa cuando esté funcionando	- Que no emita ruidos molestos
Seguridad	-los operarios no resultarán heridos cuando usen la máquina o si es que falla una parte de la secadora	- Bajo riesgo para operarios
Fiabilidad	-No se desea que la máquina falle mientras esté operando o después de poco tiempo	- Operación fiable
	-Que la secadora no malogre el grano, quemando o rompiendo su almendra	- Que no queme el grano -Que no quiebre el grano
Robustez	-Debe resistir las condiciones del ambiente donde está la plantación	- Que resista la humedad del ambiente
Ensamble	-La secadora debe poder ser instalada por nuestro personal sin muchas complicaciones y rápidamente	- Fácil instalación
Mantenimiento	-Que el mantenimiento no requiera de mucha capacitación	- Fácil mantenimiento
Uso	-Se desea que se inicie la operación en pocos pasos y que sea fácil de aprender el procedimiento	- Fácil operabilidad

Tabla 3

Requerimientos y requisitos de usuario (2-2)

Categoría	Requerimiento de usuario	Requisito de usuario
Energía	-Que no genere muchos gastos de energía	- Con eficiencia energética
Tiempo	-Se quiere que la etapa de secado dure mucho menos que con el secado al natural	- Que optimice el tiempo de secado
Costo	-La secadora debe ser rentable y adaptarse a lo que producido -Para que sea rentable, operar la secadora debe costar poco	- Costo mínimo de adquisición - Costo bajo de operación

Nota: Elaboración propia

4.2. Requisitos de diseño

De las tablas 4 a la 6 se presentan los requisitos de diseño del proyecto que atienden a los requisitos de usuario descritos en las tablas del apartado 4.1. Estos han sido ideados por el autor desde un punto de vista técnico como medios a través de los cuales se satisfacen las exigencias de los usuarios. Por lo tanto, cada uno de ellos tiene el deber de solucionar en cierto grado el requisito al que atiende.

Aquellos requisitos de proyecto que satisfacen distintos requisitos de usuario se repiten en la sección respectiva. “IF” es la abreviatura para “Factor de importancia”, aplicable para los requisitos de usuario, cuyo valor va de 0 a 4. La importancia del requisito de diseño se detalla en paréntesis con valores entre 0 y 2.

Tabla 4

Requisitos de usuario y diseño (1-3)

Requisito de usuario	Requisitos de diseño
-Secado uniforme (IF=4)	- Secado por convección (2) - Control de temperatura (1) - Mecanismo de uniformización (2) - Fuente de energía convencional (1) - Movimiento de uniformización lento (2) - Distribución homogénea del aire (2) - Superficie de transferencia de calor óptima (2)
-Que evite el crecimiento de moho y bacterias (IF=3)	- Control de humedad final (2) - Tecnología germicida (2)
-Que mejore el sabor y olor del grano seco (IF=4)	- Tratamiento aséptico de los granos (2) - Control de temperatura (1) - Mecanismo de uniformización (1) - Control del flujo de aire caliente (1) - Distribución homogénea del aire (1)

Tabla 5

Requisitos de usuario y diseño (2-3)

Requisito de usuario	Requisitos de diseño
-Grano protegido contra humo de combustión (IF=4)	- Tratamiento aséptico de los granos (2)
-Carga y descarga ergonómica (IF=2)	- Geometría simple (2)
-Que no emita ruidos molestos (IF=2)	- Movimiento de uniformización lento (2)
-Bajo riesgo para operarios (IF=3)	- Parada de emergencia (2)
	- Interfaz simple (2)
	- Secado por convección (1)
	- Manual de usuario (1)
	- Control del flujo de aire caliente (1)
	- Tratamiento aséptico de los granos (1)
-Operación fiable (IF=2)	- Control de temperatura (1)
	- Fuente de energía convencional (2)
	- Interfaz simple (2)
	- Parada de emergencia (2)
-Fácil instalación (IF=3)	- Manual de usuario (1)
	- Geometría simple (2)
	- Mínimo número de componentes (2)
	- Simple proceso de manufactura (1)
	- Componentes estandarizados (1)
-Que no quiebre el grano (IF=4)	- Control de temperatura (2)
	- Mecanismo de uniformización (1)
	- Movimiento de uniformización lento (2)
-Que resista la humedad del ambiente (IF=3)	- Resistencia a la corrosión (2)
-Que no queme el grano (IF=4)	- Secado por convección (2)
	- Control de temperatura (2)
	- Mecanismo de uniformización (2)
	- Lecho aislante térmico (2)
	- Control del flujo de aire caliente (1)
	- Distribución homogénea del aire (2)
	- Superficie de transferencia de calor óptima (1)
-Fácil mantenimiento (IF=3)	- Componentes estandarizados (2)
	- Mínimo número de componentes (2)
	- Manual de usuario (1)
	- Control de temperatura (1)
-Fácil operabilidad (IF=3)	- Control automático de temperatura (2)
	- Interfaz simple (2)
	- Manual de usuario (1)
-Capacidad para secar 50 kg de grano húmedo por día	- Capacidad de 50kg/día (2)
-Con eficiencia energética (IF=3)	- Control automático de temperatura (2)
	- Fuente de energía convencional (2)
	- Lecho aislante térmico (2)
	- Control de flujo de aire caliente (2)
	- Movimiento de uniformización lento (1)

Nota: Elaboración propia

Tabla 6

Requisitos de usuario y diseño (3-3)

Requisito de usuario	Requisitos de diseño
-Que optimice el tiempo de secado (IF=2)	- Mecanismo de uniformización (2) - Superficie de transferencia de calor óptima (2) - Secado por convección (1) - Control de temperatura (1) - Control de flujo de aire caliente (1)
-Costo mínimo de adquisición (IF=3)	- Fuente de energía convencional (2) - Simple proceso de manufactura (2) - Geometría simple (1) - Componentes estandarizados (1) - Mínimo número de componentes (1)
-Costo bajo de operación (IF=3)	- Fuente de energía convencional (2) - Control del flujo de aire caliente (2) - Distribución homogénea del aire (2) - Interfaz simple (1)

Nota: Elaboración propia

Una vez cuantificada la importancia de los requisitos de usuario y el grado en que los distintos requisitos de diseño ideados satisfacen estos, la metodología empleada en el presente trabajo nos permite asignar un peso absoluto a cada requisito con el fin de ponderar su importancia durante la etapa de diseño conceptual. Según el valor del peso absoluto, se clasifica cualitativamente el requisito como demanda o deseo. Luego se procede con la separación de estos según su naturaleza técnica u económica.

Estos detalles mencionados se muestran a continuación en la figura 16, junto con la descripción del impacto del requisito y su método de verificación.

Design requirement (how)	Demand or Wish	Absolute weight (W_A)	Relative weight (W_R)	Technical/Economic classification	Values (How much)	Verification Method
Secado por convección	D	24	2	T	Coefficiente de convección entre 10 y 200 $W/(m^2 \cdot K)$	Informe de validación
Control de humedad final	W	6	1	T	Humedad final entre 7-8%	Inspección según norma técnica
Control automático de temperatura	D	43	4	T/E	Máximo 2% del total son granos sobresecados	Informe de validación
Manual de usuario	W	12	1	T	de componentes y plan de mantenimiento	Documento
Resistente a la corrosión	W	9	1	E	Protección contra categoría de corrosión C2	Selección de componentes (Hoja de datos)
Mecanismo de uniformización	D	28	3	T/E	Máximo 2% del total son granos con secado insuficiente	Informe de validación
Fuente de energía convencional	W	22	2	E	Poder calorífico entre 9 y 14 kcal/kg	Selección de combustible
Lecho aislante térmico	D	20	2	E	Conductividad térmica menor a 0.3 $W/m \cdot K$	Selección de componentes (Hoja de datos)
Geometría simple	W	13	1	T/E	Estructura y componentes con formas rectangulares o circulares	Inspección visual
Movimiento de uniformización lento	D	23	2	T	Emisión de sonidos de máximo 80 dB	Informe de validación
Control del flujo de aire caliente	W	25	2	T	Máximo 2% del total son granos sobresecados	Informe de validación
Componentes estandarizados	W	12	1	E	Componentes y materiales normados intercambiables	Selección de componentes (Hoja de datos)
Simple proceso de manufactura	W	9	1	T	Proceso realizado en talleres locales	Informe de validación
Distribución homogénea del aire	D	26	2	T	95% del área de secado cubierta	Informe de validación
Superficie de transferencia de calor óptima	D	16	1	T/E	Reducción del tiempo de secado en un 50% como mínimo	Informe de validación
Interfaz simple	W	19	2	T	Inicio, interrupción y fin de operación en un máximo de 5 pasos	Inspección visual
Tecnología germicida	W	6	1	E	Eficiencia bactericida mayor a 90%	Informe de validación
Tratamiento aséptico de los granos	D	19	2	T/E	Materiales implementados con grado alimentario	Informe de validación
Parada de emergencia	W	10	1	T	Parada total de la operación en menos de 5 segundos	Informe de validación
Mínimo número de componentes	W	15	1	T/E	Dar preferencia a soluciones con menos componentes	Inspección visual
Capacidad de 50kg/día	D	8	1	T	La máquina podrá secar 50 kg de grano húmedo en un día	Informe de validación

Figura 16: Detalles de los requisitos de diseño

Nota: Elaboración propia haciendo uso de la herramienta informática “*Mechatronic Design Development Tool*” de Vigolo & De Negri (2020)

CAPÍTULO II

5. Diseño conceptual

En este capítulo se presentan las funciones y subfunciones identificadas que debe realizar el sistema de secado y los medios mediante las que podrían ser realizados cada una. Esto lleva a plantear diferentes soluciones evaluadas mediante una matriz morfológica para cada nivel de funciones y un respectivo cuadro de evaluación en el cual se puntúa cada solución sobre la base de la relevancia de cada requisito de diseño que satisface. Se concluye esta etapa con la síntesis de estructura del sistema mecatrónico y el comportamiento general, conformado por la arquitectura del diseño mecatrónico, la arquitectura del sistema eléctrico-electrónico, el bosquejo del sistema físico y el diagrama de comportamiento.

5.1. Descomposición funcional y síntesis de medios

Esta sección abarca los distintos niveles del árbol de funciones del sistema a diseñar. La descripción que acompaña a cada uno de los medios descritos se enfoca en identificar el principio de funcionamientos de los distintos dispositivos y técnicas. De igual modo, se busca resaltar las ventajas y desventajas de cada medio con respecto a las demás opciones.

5.1.1. Nivel 1: Función global de la secadora

Se define la función global “Secar los granos de cacao”, y como medios las formas en las que se pueden secar artificialmente los granos de cacao. A continuación, se describen las tres formas identificadas y el principio de funcionamiento respectivo.

- Secar los granos de cacao
- ❖ Secado por convección

Consiste en la eliminación de la humedad interna del grano a través del contacto directo entre los sólidos húmedos y un gas caliente. El método debe su nombre a que la evaporación del líquido interno que asciende a la superficie del grano e interactúa con el aire caliente corresponde a la transferencia de calor por convección.

Para el calentamiento de gas de secado se emplea habitualmente intercambiadores de calor de biomasa, GLP, o colectores solares. Una ventaja significativa del medio es que se evitan en mayor o menor grado sabores desagradables en los sólidos a secar al reducir el contacto de los granos húmedos con la fuente de calor de secado.

❖ Secado por conducción

En las máquinas que emplean el secado de conducción para eliminar la humedad del grano se utiliza normalmente una pared metálica para tal efecto. El grado de asepsia de las fuentes de calor en este método es bajo. Además, las características químicas de las capas que estén en contacto con el sólido húmedo determinan la temperatura máxima a utilizar a fin de no dañar el grano.

Para el caso de su aplicación en el secado que concierne a este proyecto, la principal desventaja de estos equipos es la alta probabilidad de quemar las cáscaras de las almendras de cacao, disminuyendo así la efectividad del proceso y la calidad del producto final.

❖ Secado por radiación

Los secadores por radiación utilizan energía radiante para extraer la humedad del producto. Esta se obtiene eléctricamente por medio de infrarrojos o de refractarios calentados con gas (Parra, 2017). Dentro de la cámara de secado, una fuente de radiación irradia a los granos con tal de extraer su humedad en un tiempo mucho menor al proceso natural.

En este método, se debe considerar la prioridad de evitar la exposición del sólido húmedo a excesiva temperatura y corto tiempo de secado, a efecto de conservar componentes bioactivos críticos del grano (Ahmed et al., 2013). Su utilización se encuentra restringida a algunos sectores específicos de la industria, debido a su costo de operación, sistemas complejos de control y un mayor tiempo de puesta en operación.

A continuación, se presenta la tabla 7 de comparación entre las opciones escogidas.

Tabla 7

Tecnologías utilizadas para el secado de granos

Secar el grano de cacao	Ventajas	Desventajas
Secado por convección	-Costo de operación bajo -Tratamiento aséptico del producto -Tecnología consolidada	-Mayor número de componentes
Secado por conducción	-Principio de funcionamiento sencillo -Tecnología consolidada -Costo de operación bajo	-Alta probabilidad de quemado del grano -Mayor probabilidad de afectar las calidades organolépticas del grano
Secado por radiación	-Tiempo de secado corto -Tratamiento aséptico del grano	-Costo de operación alto -Limitado a ciertas aplicaciones -Sistema de control complejo

Nota: Elaboración propia

En la figura 17 se presenta la evaluación de los medios descritos. La tabla de evaluación valora las distintas opciones según su grado de satisfacción de distintos requisitos de diseños.

Design Criteria		Evaluation Chart								
		j=	1		2		3		o	
			Secado por convección		Secado por conducción		Secado por radiación		Optimal	
W _r		W _{s1}	W _{s1} ·W _r	W _{s2}	W _{s2} ·W _r	W _{s3}	W _{s3} ·W _r	W _o	W _o ·W _r	
Technical analysis										
1	Control automático de temperatura	4	4	16	3	12	2	8	4	16
2	Mecanismo de uniformización	3	3	9	2	6	2	6	4	12
3	Control automático del flujo de calor	2	4	8	4	8	0	0	4	8
4	Simple proceso de manufactura	1	3	3	3	3	2	2	4	4
5	Distribución homogénea de medio deshumidificadora	2	4	8	0	0	0	0	4	8
6	Superficie de transferencia de calor	1	3	3	2	2	2	2	4	4
7	Tratamiento aséptico de los granos	2	3	6	1	2	4	8	4	8
8	Mínimo número de componentes	1	3	3	3	3	2	2	4	4
Total technical value			T_{t1}	56	T_{t2}	36	T_{t3}	28	T_{to}	64
Relative technical value			R_{t1}	0.88	R_{t2}	0.56	R_{t3}	0.44	R_{to}	1.00
Economic analysis										
9	Control automático de temperatura	4	4	16	2	8	1	4	4	16
10	Fuente de energía convencional	2	3	6	4	8	2	4	4	8
11	Componentes estandarizados	1	3	3	3	3	2	2	4	4
12	Tecnología germicida	1	2	2	1	1	4	4	4	4
Total economic value			T_{e1}	27	T_{e2}	20	T_{e3}	14	T_{eo}	32
Relative economic value			R_{e1}	0.84	R_{e2}	0.63	R_{e3}	0.44	R_{eo}	1.00
Hyperbolic rating			H_{r1}	0.86	H_{r2}	0.59	H_{r3}	0.44	H_{ro}	1.00

Figura 17: Tabla de evaluación de los medios para secar granos artificialmente

La opción mejor valorada fue el secado por convección, de la cual se destaca principalmente la versatilidad del medio para contar con la apropiada distribución homogénea del medio deshumidificador y una superficie de transferencia de calor ideal. Por lo tanto, en el nivel 2 se tomará en cuenta las funciones que necesitan realizar los elementos de un sistema de secado de granos por convección.

5.1.2. Nivel 2: Funciones generales de los subsistemas de la secadora

En este nivel se detallan las funciones con sus respectivos medios de una máquina de secado de granos por convección. Se toman en cuenta el calentamiento y transporte de aire deshumidificador fundamentales. Además, se identifican las funciones de carga y descarga del grano, energización eléctrica de la secadora, la interacción con el operario y la distribución uniforme del sólido en la cámara de secado.

- Alimentar el grano a la secadora

- ❖ Carga manual

Los granos húmedos son descargados por el operador en la cámara de secado ya sea directamente o por medio de una tolva y un conducto inclinado que permiten dirigir el flujo del sólido.

- ❖ Carga asistida

Mediante un mecanismo accionado por motores eléctricos se movilizan ejes de zarandas vibratorias, tornillos sin fin o cintas transportadoras que llevan el sólido húmedo hasta una tolva, sin exigir el esfuerzo de uno o varios operadores.

- Calentar el aire deshumidificador

- ❖ Radiación solar

Por este medio, se convierte a energía calorífica la energía de la radiación solar que impacta sobre un colector solar, por donde circula el aire a calentar que luego entra a la secadora. El COP de este tipo de calentadores usualmente oscila entre 0.8 y 0.9, mayor incluso a la de algunos calentadores eléctricos o de energía fósil; sin embargo, el costo de instalación y mantenimiento de estos equipos suele ser un factor limitante para su elección, además de la posible dependencia climática resultante de su uso.

- ❖ Resistencias eléctricas

La generación del calor de estas resistencias se debe al efecto Joule, según el cual el calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente que circula por ellas. Este principio resulta efectivo en la transformación eficiente de la energía eléctrica a energía calorífica y de una manera rápida y segura. Además, en el caso de que los precios de los combustibles fósiles, como el GLP, Diésel o gas natural, sean muy elevados en una zona, se elimina la dependencia de ellos para la generación del aire caliente.

❖ Gases de combustión

Bajo este principio se hace uso de un intercambiador de calor. Este integra tuberías y un quemador con el cual se genera la llama que, junto con los gases de la combustión de combustibles fósiles o biomasa, calientan el aire en las tuberías. El intercambiador de calor sirve así mismo para un tratamiento indirecto entre el calor de los gases de combustión y los granos a secar, a fin de evitar la contaminación de este último.

A continuación, se presenta en la tabla 8 la comparación por ventajas y desventajas de los medios descritos.

Tabla 8

Tecnologías utilizadas para calentar el aire

Calentar el aire	Ventajas	Desventajas
Radiación solar	-Buena eficiencia energética -Bajo impacto ambiental	-Mantenimiento complejo -Dependencia del clima
Resistencias eléctricas	-Eficiencia energética media -Utiliza fuente de energía convencional -Independencia del clima y de precio de combustibles -Bajo costo de operación	-Mayor número de componentes -Componentes diseñados específicamente para el calentador
Gases de combustión	-Bajo costo de operación -Buena eficiencia energética	-Mayor costo para garantizar el tratamiento aséptico de los granos

Nota: Elaboración propia

- Movilizar el aire deshumidificador por el grano

❖ Circulación tangente

El gas caliente circula tangencialmente por sobre la superficie y base del sólido húmedo que se encuentra estático o en movimiento sobre su lecho.

❖ Lecho fluidizado

El gas circula en contracorriente con el flujo del grano, el cual se hace caer de una parte elevada de la cámara de secado. La velocidad de este gas es la suficiente para contrarrestar el peso de los granos, de ahí que no hay un lecho estático. Se produce en este tipo de circulación el arrastre de partículas finas

❖ **Circulación perpendicular al lecho**

Se hará circular el flujo de gas caliente a través de las perforaciones del lecho, el cual tiene una dirección perpendicular al lecho. Se puede atravesar el grano yendo de su superficie a su base o viceversa. En este último caso, la rapidez no es tan elevada como para hacer que el sólido levite.

- Uniformizar el grano en la cámara de secado

❖ **Movimiento rotatorio horizontal**

Se emplea una cámara de secado cilíndrica horizontal. El tambor es usualmente ensamblado con una inclinación ligera hacia el extremo opuesto de la carga con el fin de que los granos se encuentren distribuidos homogéneamente a lo largo de la cámara. Así mismo, para evitar el reposo de los granos en la base del cilindro es usual la incorporación de aletas en forma de "L" o barras transversales para la remoción y distribución de los granos en todo el volumen control.

❖ **Brazo agitador en silo circular**

Es el principio de uniformización más utilizado por las secadoras de gran capacidad. El brazo agitador va montado sobre una estructura metálica resistente a las cargas estáticas y dinámicas del proceso. Las palas verticales del brazo remueven el lecho desde su base y permiten el constante movimiento de la carga de granos de gran espesor. De esta forma no solo se varía la altura a la que se encuentran cada sólido, si no que permite aumentar la superficie de transferencia de calor entre este y el aire caliente.

❖ **Esparcimiento en bandeja**

Los sólidos húmedos son uniformizados en bandejas preferiblemente perforadas de determinado espesor a través de las cuales se hará circular el aire caliente deshumidificador.

❖ **Esparcimiento en plataforma**

La cámara de secado cuenta con entradas en una o varias de las paredes laterales o perforaciones en la base del lecho por el cual ingresa el aire deshumidificador. Este tipo de uniformización puede incluir adicionalmente un mecanismo que revuelve la base de la cámara para un mayor grado de contacto entre las superficies que intercambian calor y evitar quemaduras entre granos en contacto, si es que el espesor de la cama de granos es muy grande.

❖ **Vibración de plataforma**

La particularidad de este medio es que por debajo de la cámara de secado se incluye un eje de levas motorizado que, al contacto con la base de la cámara, genera movimientos de vibración que permiten movilizar los granos a lo largo y ancho del área de secado. El inconveniente principal de las secadoras que utilizan este principio es el desgaste progresivo en un periodo corto debido al movimiento vibratorio, lo cual aumenta la frecuencia de los mantenimientos preventivos de la secadora.

En la tabla 9 se presentan las ventajas y desventajas de los medios descritos de uniformización del grano.

Tabla 9

Principios empleados para uniformización del grano

Uniformizar el grano	Ventajas	Desventajas
Movimiento rotatorio horizontal	-Reduce significativamente el tiempo de secado	-Movimiento puede quebrar el grano -Tratamiento aséptico medio del grano
Brazo agitador en silo circular	-Buena calidad final del grano seco -Uniformización muy buena	-Para cargas de grano mayores -Mantenimiento más costoso
Esparcimiento en bandeja	-Principio simple de funcionamiento -Mantenimiento simple	-Contacto entre grano y bandeja caliente deteriora calidad del producto
Esparcimiento en plataforma	-Principio simple de funcionamiento -Superficie amplia de transferencia de calor	-No permite espesores muy grandes de camas de granos
Vibración de plataforma	-Uniformización buena	-Mantenimiento frecuente -Vida útil de piezas reducida -Genera ruido molesto

Nota: Elaboración propia

- Interactuar con el operador

A modo de comparación entre los medios, se listan en la tabla 10 las ventajas y desventajas de las opciones presentadas de interacción del operario con la secadora.

Tabla 10

Tecnologías utilizadas para interactuar con el operador

Interactuar con el operador	Ventajas	Desventajas
Sistema de control local	-Fácil operabilidad -Bajo costo de implementación -Fácil mantenimiento	-Bajo grado de integración a sistemas de producción de mayor escala
Sistema de control remoto	-Gran versatilidad del control del sistema -Acceso rápido al sistema de control -Diagnóstico preciso en el caso de fallas	-Alto costo de implementación -Curva de aprendizaje lenta para operarios no familiarizados con equipos electrónicos

Nota: Elaboración propia

- Descargar el grano seco

- ❖ Descarga manual

La máquina incluye un mecanismo de descarga accionado manualmente para el depósito de los granos secos en su recipiente de almacenamiento.

- ❖ Descarga automática

El mecanismo de descarga es accionado automáticamente por un motor o pistón que da paso a la descarga de granos al interior de la cámara de secado. Presenta ventajas ergonómicas y de reducción de la mano de obra.

- Energizar el sistema

- ❖ Energía eléctrica

Los componentes de la secadora son energizados mediante una toma eléctrica presente en la instalación.

- ❖ Energía solar

La energía del sistema proviene de un banco de baterías alimentado por un inversor energizado por un arreglo de paneles solares. Esta opción reduce significativamente el costo de operación del sistema al reducir o eliminar el uso de energía eléctrica de la red local o de combustibles fósiles, además de tener un impacto ambiental mínimo. La principal

desventaja de esta fuente de energía es que se mantiene la dependencia de condiciones climáticas apropiadas para la operación, pues se necesita de radiación solar suficiente y se desea evitar las condiciones climáticas adversas al funcionamiento de los paneles solares.

❖ Energía fósil

En este caso, se emplean combustibles fósiles para alimentar un grupo electrógeno que energiza el sistema. El principio de funcionamiento es sencillo, fiable y garantiza una operación continua de la secadora. Sin embargo, dado que se trata de una instalación de productos alimenticios, se prefiere evitar el contacto de partículas volátiles de los combustibles con los granos a secar, pues pueden llegar fácilmente desde sus contenedores a los granos por corrientes naturales de aire, afectando así permanentemente el sabor del producto a tratar.

La tabla 11 ilustra las ventajas y desventajas de los respectivos medios discutidos para la energización del sistema.

Tabla 11

Tecnologías utilizadas para energizar el sistema

Energizar el sistema	Ventajas	Desventajas
Energía solar	-Bajo costo de operación -Bajo impacto ambiental	-Dependencia del clima -Mayor costo de mantenimiento
Energía eléctrica	-Costo bajo de operación	-Dependencia de la red eléctrica
Energía fósil	-Independencia del clima y de la red eléctrica	-Dependencia del costo de los combustibles fósiles -Combustible altamente volátil que puede contaminar el grano - Impacto ambiental negativo

Nota: Elaboración propia

- Comparación de los medios del nivel 2

La matriz morfológica correspondiente a este nivel del árbol de funciones se añade al Anexo A de este documento. De igual modo, las soluciones ideadas con la combinación de los medios de la matriz morfológica se agregan al Anexo A.

Como paso final, las soluciones del nivel 2 son analizadas en la tabla de evaluación mostrada en la figura 18, tras lo cual se obtiene que la opción mejor puntuada según los requisitos de diseño es la opción 2, destacada por el mecanismo de uniformización sobre una superficie de transferencia de calor ideal ofrecida por el tambor rotatorio horizontal.

Design Criteria	j ^m	Evaluation Chart											
		1		2		3		4		5		o	
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Solution 5		Optimal	
W _i	W _{i1}	W _{i2} ·Wr	W _{i3}	W _{i4} ·Wr	W _{i5}	W _{i6} ·Wr	W _{i7}	W _{i8} ·Wr	W _{i9}	W _{i10} ·Wr	W _o	W _o ·Wr	
Technical analysis													
Resistente a la corrosión	3	1	3	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12
Mecanismo de uniformización	3	1	3	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12
Geometría simple	1	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
Movimiento de uniformización lento	2	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	4	8
Proceso de manufactura	1	4	4	3	3	1	1	3	3	2	2	4	4
Distribución homogénea de medio deshumidificador	2	2	4	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8
Superficie de transferencia de calor	1	1	1	4	4	4	4	3	3	2	2	4	4
Interfaz simple	2	4	8	4	8	3	6	4	8	2	4	4	8
Tratamiento aséptico de los granos	2	2	4	3	6	2	4	3	6	3	6	4	8
Total technical value		T ₁₁ 36		T ₁₂ 47		T ₁₃ 42		T ₁₄ 44		T ₁₅ 40		T _{1o} 56	
Relative technical value		R ₁₁ 0.64		R ₁₂ 0.84		R ₁₃ 0.75		R ₁₄ 0.79		R ₁₅ 0.71		R _{1o} 1.00	
Economic analysis													
Resistente a la corrosión	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
Mecanismo de uniformización	3	2	6	3	9	1	3	3	9	2	6	4	12
Fuente de energía convencional	2	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4	4	8
Geometría simple	1	4	4	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4
Componentes estandarizados	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	4	4
Superficie de transferencia de calor	1	1	1	3	3	3	3	3	3	2	2	4	4
Mínimo número de componentes	1	3	3	3	3	1	1	2	2	3	3	4	4
Capacidad de 50kg/día	1	2	2	4	4	3	3	4	4	3	3	4	0
Total economic value		T ₂₁ 28		T ₂₂ 34		T ₂₃ 22		T ₂₄ 29		T ₂₅ 26		T _{2o} 40	
Relative economic value		R ₂₁ 0.70		R ₂₂ 0.85		R ₂₃ 0.55		R ₂₄ 0.73		R ₂₅ 0.65		R _{2o} 1.00	
Hyperbolic rating		H ₁₁ 0.67		H ₁₂ 0.84		H ₁₃ 0.64		H ₁₄ 0.75		H ₁₅ 0.68		H _{1o} 1.00	

Figura 18: Tabla de evaluación de los medios del nivel 2

Nota: Elaboración propia haciendo uso de la herramienta informática “Mechatronic Design Development Tool” de Vigolo & De Negri (2020).

5.1.3. Nivel 3: Funciones específicas de los subsistemas de la secadora

- Alimentar manualmente la secadora
- ❖ Tolva de base rectangular

Permite distribuir a los granos apilados en su sección trapezoidal a lo largo de la pared de entrada a la cámara de secado, usualmente rectangular, así evitando pilas de granos de gran altura.

- ❖ Tolva cónica

Consiste en una sección cilíndrica en la parte superior y un embudo al inferior desde donde descienden los granos por gravedad. Su diseño evita el daño del sólido por compresión excesiva a causa de altas columnas de granos. Permite un flujo elevado en la entrada de la cámara sobre un área transversal reducida.

- Generar calor con resistencias eléctricas

La tabla 12 a continuación presenta una comparación de las ventajas y desventajas de los medios considerados para el calentamiento del aire de secado con un calefactor de resistencias eléctricas.

Tabla 12

Tecnologías utilizadas para generar calor

Generar calor con resistencias eléctricas	Ventajas	Desventajas
Resistencias tubulares lisas	- Compactas - Geometría con buen desempeño a altas temperaturas - Menor costo en comparación a las flexibles y aleteadas	- Baja área de irradiación - Eficiencia reducida
Resistencias tubulares flexibles	- Flexibles y compactas - Buena densidad de potencia (2-4 W/cm ²)	- Uso preferido para calentar volúmenes pequeños de fluidos.
Calentador de resistencias aleteadas	-Densidad de potencia mayor (2-5 W/cm ²) - Uso versátil	-Mayor costo de fabricación respecto a las resistencias tubulares lisas

Nota: Elaboración propia

- Generar movimiento de rotación del motor

- ❖ Motor de inducción monofásico

Este tipo de motor suele utilizarse en máquinas herramientas, ventiladores, mezcladoras, bombas de agua, entre otras aplicaciones. Suelen ser motores de una potencia menor a 1 CV. El motor monofásico tiene la ventaja de no necesitar una alimentación trifásica, aunque es menos eficiente y de mayor peso para una misma potencia.

- ❖ Motor de inducción trifásico

Es el tipo de motor más utilizado en la industria por su versatilidad y gran robustez para manejar grandes cargas. Los motores trifásicos son ventajosos puesto que requieren de un menor cableado para funcionar y son más eficientes por la distribución de la carga en cada una de sus tres fases.

- ❖ Motor universal monofásico

Este motor puede funcionar con alimentación continua y alterna. Sin embargo, la alimentación alterna acorta su tiempo de vida por el desgaste de las escobillas de conmutación. Es un motor compacto y brinda mayor par por Ampere que otros motores monofásicos, pero no es recomendable para grandes cargas ni velocidades constantes.

- Energizar motor de ventilador

Para la comparación entre los medios para la energización del ventilador de la secadora se presenta la tabla 13 con los beneficios y desventajas de cada uno de ellos.

Tabla 13

Tecnologías utilizadas para alimentar motores trifásicos

Alimentar motor de ventilador	Ventajas	Desventajas
Convertidor de fase estático	- Tecnología consolidada para arranque de motor trifásico - Instalación simple	- No utilizable para alimentación continua de potencia trifásica - No permite la regulación de velocidad
Variador de frecuencia	- Ajuste de velocidad a la demanda real permite ahorro energético de 20-70% - Permite la opción de arranque y regulación de velocidad	- Costo elevado de adquisición

Nota: Elaboración propia

- Generar flujo de aire
- ❖ Ventilador centrífugo radial

Este tipo de ventiladores reciben la corriente de aire a movilizar en dirección de su eje de giro y la devuelven en una dirección perpendicular a este, pues cuenta con palas rectas que forman 90 grados respecto a la velocidad tangente del aire. Entre los distintos ventiladores centrífugos esta suele ser la opción de menos palas, por lo que cuentan con un costo de adquisición más bajo. Una ventaja es su uso apropiado para trabajar con grandes volúmenes de aire y en ambientes en presencia de partículas suspendidas, puesto que sus palas rectas tienen la capacidad de ser autolimpiantes.

- ❖ Ventilador centrífugo de palas curvadas hacia adelante

Estos ventiladores cuentan con aletas curvadas en la dirección a favor del flujo del fluido. Debido al ángulo de inclinación de sus palas, la velocidad total del fluido es la mayor posible en función del ángulo, por lo que es la que puede transportar mayor volumen para un diámetro y velocidad dado, haciéndolos más compactos. Además, dicha geometría permite trabajar sin emitir ruidos molestos. Su punto de operación, debido a su curva de comportamiento, suele ser fijo para poder aprovechar el máximo de la eficiencia del ventilador. A causa de la forma y número de palas, no suele ser recomendado para ambientes con aire polvoriento.

❖ Ventilador centrífugo de palas curvadas hacia atrás

Los álabes de estos ventiladores se encuentran inclinados en la dirección contraria al giro del eje del ventilador. Al igual que con los de palas curvadas hacia adelante, tienen un punto de operación en el que transmiten una mayor cantidad de trabajo específico al fluido que presurizan, y fuere de este punto, el ventilador rinde con eficiencias bajas o medias. Para maximizar su tiempo de vida, recomiendan su uso en situaciones en el que se esté utilizando aire limpio y no muy húmedo, para evitar que las partículas de agua o sucias se acumulen en la parte posterior del álabe o den lugar a la erosión de sus caras.

• Transmitir potencia al eje del tambor

Los mecanismos de transmisión de potencia son evaluados a continuación en la tabla 14 con base en sus ventajas y desventajas en relación con los requerimientos importantes de baja velocidad angular y relación de transmisión alta de la secadora.

Tabla 14

Tecnologías utilizadas para transmitir potencia al eje del tambor

Transmitir potencia al eje	Ventajas	Desventajas
Correa plana	- Apropia para distancias grandes entre ejes - Eficiencia de transmisión de 96-98%	- Empleado para relaciones de transmisión menores a 1:5 - Ideal para velocidades muy altas
Cadena de rodillos	- Eficiencia de transmisión de 97-98% - Apropia para rango de velocidades <17 m/s	- Requiere lubricación frecuente
Caja reductora de engranajes	-Ejes conectados pueden ser paralelos o perpendiculares - Transmisión compacta - Amplio rango de relaciones de velocidad	- Requiere lubricación frecuente - Mayor costo - Mayor número de componentes internos

Nota: Elaboración propia

- Recepcionar señales de entrada

Para la evaluación de los medios considerados para recibir las órdenes de operación de la secadora, se elabora la tabla 15 de comparación de características de cada una.

Tabla 15

Tecnologías utilizadas para Recepcionar señales de entrada

Recepcionar señales de entrada	Ventajas	Desventajas
Pulsadores piloto	- Principio simple de funcionamiento - Bajo costo de adquisición y reparación	- Principio mecánico de funcionamiento propenso a fallas. - Requiere mejor señalización
Pantalla HMI	- Interfaz gráfica intuitiva - Permite observar variables de estado en tiempo real	-Alto costo de reparación

Nota: Elaboración propia

- Alertar al operario

- ❖ Luces piloto

Son elementos electrónicos que emiten una luz intermitente intensa cuando son accionadas por el controlador principal. Presentan un funcionamiento simple, aunque no alcanzan a informar una emergencia con tanta efectividad como una alarma sonora.

- ❖ Alarma sonora

Consiste en una sirena ubicada sobre el panel eléctrico que emite una alarma audible a gran distancia que puede alertar a los operarios de una emergencia o del fin del proceso de secado.

- ❖ Reporte remoto a centro de seguridad

Un periférico conectado al sistema de control emite una señal recibida por una central de monitoreo distante a la planta de secado. El destino de esta señal de alarma puede ser un celular, Tablet o computadora y puede transmitir el tipo de emergencia con información más precisa acerca de los variables del proceso que presentan un inconveniente o representan un riesgo a la seguridad del producto o de los operarios.

- Medir la temperatura del aire de secado

Las siguientes tecnologías para la medición de la temperatura del aire de secado son comparadas en la tabla 16 a continuación. Se consideran ventajosas aquellas características que consideren su idoneidad para la medición de temperatura en el rango de 40-60°C y la distancia física amplia entre el sensor y el controlador.

Tabla 16

Tecnologías utilizadas para medir la temperatura

Medir la temperatura del aire de secado	Ventajas	Desventajas
Termómetro de resistencia	<ul style="list-style-type: none"> -Elaboración a base de platino le confiere certificación IEC 751/DIN EN 60751. -Uso para temperaturas bajas y medias -Transmisor de temperatura integrable 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja sensibilidad -Línea de alimentación tiene mayor efecto sobre medición
Termistor	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sensibilidad - Baja influencia de alimentación sobre la medición 	<ul style="list-style-type: none"> -No integra transmisor de temperatura integrable -Baja precisión -No linealidad de mediciones
Termocupla	<ul style="list-style-type: none"> -Alta precisión -Tiempo rápido de respuesta 	<ul style="list-style-type: none"> -Uso exclusivo para medición de temperaturas >200°C -Costo elevado
Sensor higrométrico	<ul style="list-style-type: none"> -Medición de temperatura y humedad relativa - Buena precisión 	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor costo de adquisición -Humedad relativa no controlable -Menores opciones para la aplicación

Nota: Elaboración propia

- Gestionar sistema de control

A efectos de evaluar los distintos controladores para la gestión de las funciones de la máquina secadora, en la tabla 17 a continuación se presenta la comparación de las características positivas y negativas de cada medio.

Tabla 17

Tecnologías utilizadas para gestionar el sistema de control

Gestionar sistemas de control	Ventajas	Desventajas
PLC	-Reprogramable -Instalación sencilla -Larga vida útil	-Se requiere un personal calificado para la programación. -Costo alto. -Se necesita una toma de corriente independiente estable
Microcontrolador	-Versátiles para realizar modificaciones y/o ampliaciones. -Permiten implementar funciones de control y de comunicación complejas. -Instalación sencilla.	-Menor robustez
Sistema embebido	-Menor costo -Mayor rapidez de procesamiento	-Mayor tiempo de desarrollo -Menor robustez

Nota: Elaboración propia

- Captar energía solar

En la tabla 18 se comparan tres tipos de paneles solares. Se consideran cualidades favorables las de los paneles que brinden la mejor eficiencia energética y requieran menor espacio en el clima caluroso de la selva peruana.

Tabla 18

Tecnologías utilizadas para captar energía solar

Captar energía solar	Ventajas	Desventajas
Panel solar monocristalino	- Eficiencia energética de 17 a 20%, mayor al policristalino - Mayor densidad energética - Larga vida útil	-Más apropiado para climas fríos y nublados - Mayor costo
Panel solar policristalino	- Bajo costo de adquisición - Mejor comportamiento a altas temperaturas	-Eficiencia energética de 13 a 15%
Panel solar de capa fina	- Menor costo de adquisición que las demás opciones	-Eficiencia energética de 7 a 9% -Baja densidad energética

Nota: Elaboración propia

- Descargar automáticamente el grano

En la tabla 19 a continuación se presenta la comparación de los medios para una descarga asistida de los granos al interior de la cámara.

Tabla 19

Tecnologías utilizadas para descargar la cámara de secado

Descargar automáticamente el grano	Ventajas	Desventajas
Actuador lineal neumático	- Control sencillo y preciso de posición - Recomendable para cargas pequeñas y medianas	- Requiere compresora de fluidos - Exige buena limpieza del ambiente
Actuador lineal hidráulico	- Alta relación potencia-peso - Velocidad lineal alta	- Recomendable para cargas grandes
Actuador lineal eléctrico	- Operación sencilla - Menor número de componentes	-Baja velocidad lineal -Baja controlabilidad de posición

Nota: Elaboración propia

- Comparación de los medios del nivel 3

La matriz morfológica y las respectivas soluciones ideadas mediante la combinación de los medios de la matriz son adjuntadas al Anexo A. Posteriormente, se continua con la evaluación de las distintas soluciones mediante la tabla mostrada en la figura 19. La opción 2 resulta la mejor puntuada, con lo cual se culmina con la tarea de la síntesis de medios.

Design Criteria	j=	1		2		3		o		
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Optimal		
		W _{s1}	W _{s1} .W _r	W _{s2}	W _{s2} .W _r	W _{s3}	W _{s3} .W _r	W _o	W _o .W _r	
Technical analysis										
11	Geometría simple	1	1	1	4	4	3	3	4	4
12	Proceso de manufactura	1	3	3	4	4	2	2	4	4
m	Interfaz simple	2	3	6	4	8	3	6	4	8
14	Tratamiento aséptico de los granos	2	3	6	4	8	4	8	4	8
15	Parada de emergencia	1	2	2	3	3	3	3	4	4
16	Mínimo número de componentes	1	2	2	3	3	3	3	4	4
17	Control automático de temperatura	4	2	8	4	16	3	12	4	16
Total technical value		T_{s1}	28	T_{s2}	46	T_{s3}	37	T_o	48	
Relative technical value		R_{s1}	0.58	R_{s2}	0.96	R_{s3}	0.77	R_o	1.00	
Economic analysis										
18	Resistente a la corrosión	1	2	2	3	3	3	3	4	4
19	Componentes estandarizados	1	2	2	3	3	2	2	4	4
20	Control automático de temperatura	4	3	12	4	16	3	12	4	16
21	Superficie de transferencia de calor	1	3	3	3	3	4	4	4	4
Total economic value		T_{e1}	19	T_{e2}	25	T_{e3}	21	T_{eo}	28	
Relative economic value		R_{e1}	0.68	R_{e2}	0.89	R_{e3}	0.75	R_{eo}	1.00	
Hyperbolic rating		H_{s1}	0.63	H_{s2}	0.93	H_{s3}	0.76	H_o	1.00	

Figura 19: Tabla de evaluación de los medios del nivel 3

Nota: Elaboración propia haciendo uso de la herramienta informática “Mechatronic Design Development Tool” de Vigolo & De Negri (2020).

5.1.4. Árbol de funciones

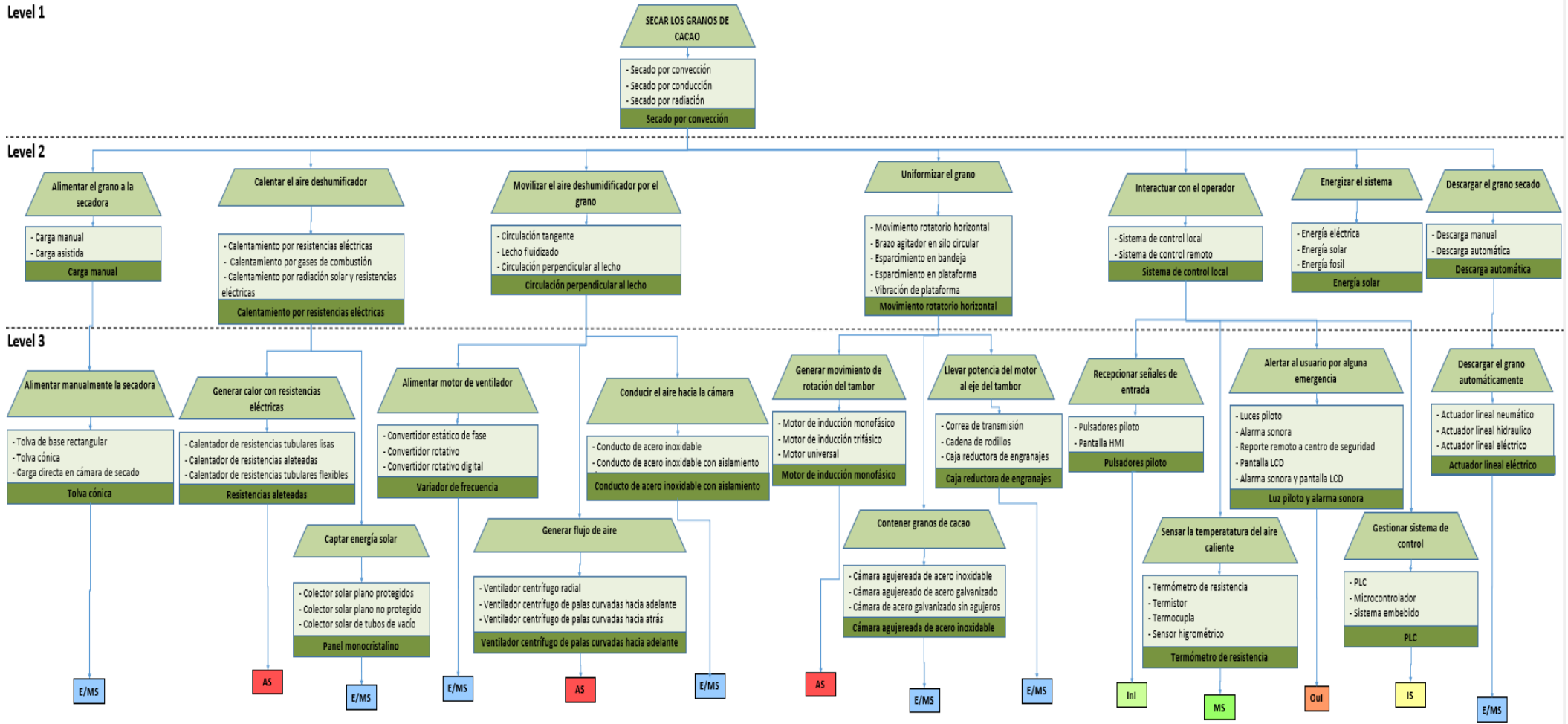


Figura 20: Árbol de funciones para la máquina secadora

5.2. Síntesis de la estructura y del comportamiento general

En esta sección, se presentan dos diagramas que llevan como nombre arquitectura del sistema mecatrónico y arquitectura del sistema eléctrico/electrónico. En el primer diagrama, se cuentan con los medios operacionales seleccionados en la sección previa, que se encuentran clasificados en distintos subsistemas como son el de medición, actuación, información, energía y materia, interfaz de entrada e interfaz de salida. Estos medios son interrelacionados entre sí mediante flechas que indican tanto el flujo de información como el de energía o materia. El segundo diagrama, la arquitectura del sistema eléctrico/electrónico, permite ilustrar con mayor detalle las conexiones necesarias para la protección de los elementos del sistema, una alimentación eléctrica correcta y el acondicionamiento de las señales de los sensores y actuadores, todo con la finalidad de procesar los datos de los distintos módulos: de potencia, entrada/salida, medición, actuación e información.

5.2.1. Arquitectura del sistema mecatrónico

En el diagrama de la figura 21, la arquitectura del sistema, se muestra el flujo de información, energía y materia entre los distintos subsistemas y los elementos componentes del sistema mecatrónico.

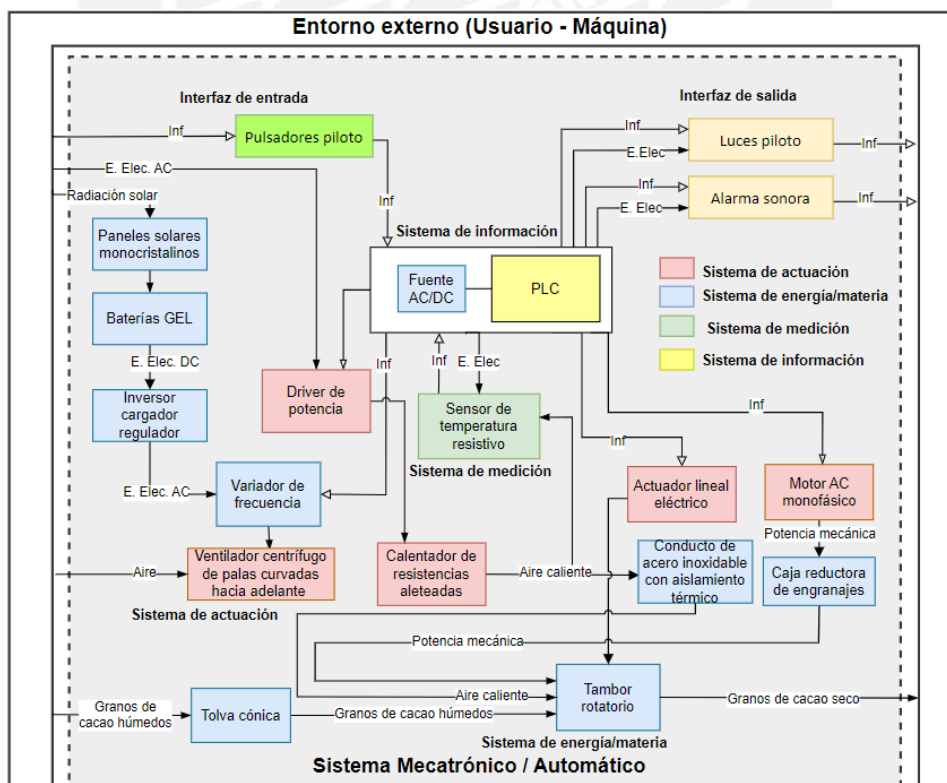


Figura 21: Arquitectura del sistema mecatrónico

Nota: Elaboración propia

5.2.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico

La arquitectura presentada en la figura 22 corresponde a la de los elementos eléctricos y electrónicos del sistema de secado artificial. Estos están divididos en categorías similares a las vistas en la arquitectura previa, con la incorporación adicional de un módulo de potencia. Los elementos son alimentados con líneas de voltaje 220 VAC, 24 VDC o 240 V trifásica según sus especificaciones técnicas e intercambian información a través de líneas de información eléctrica, de valor 0 o 24 V, o líneas de información discreta, a través de la cual se envían cadenas de bits.

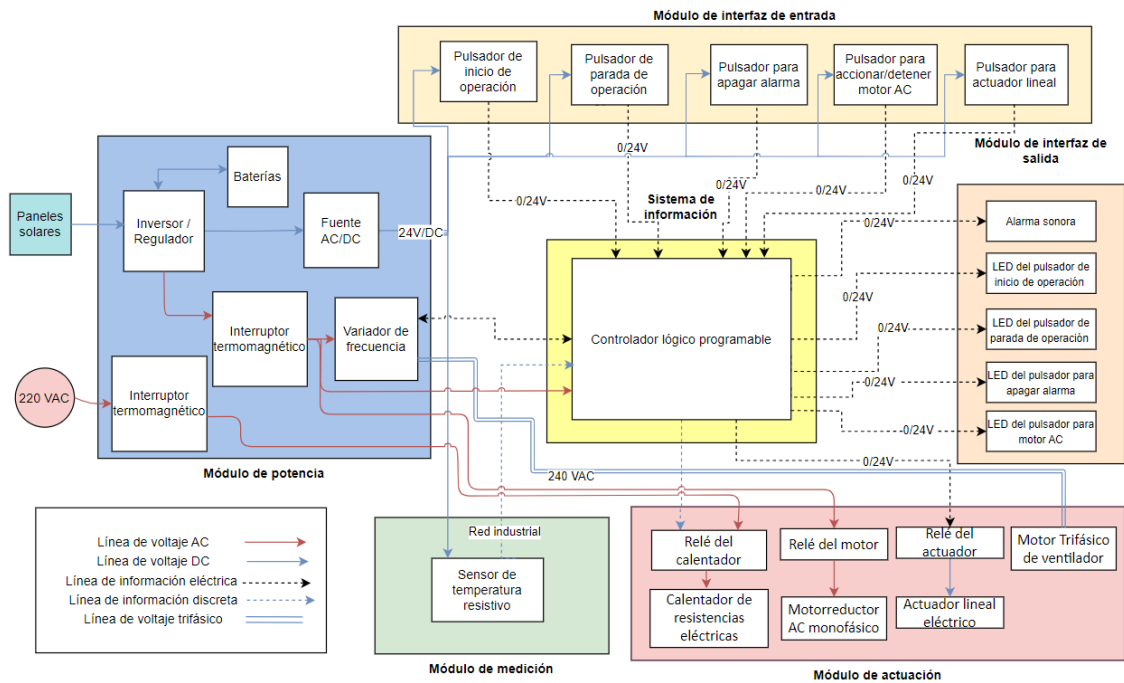


Figura 22: Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico

Nota: Elaboración propia

5.2.3. Bosquejos del sistema

En la figura 23, se observa una vista isométrica de la secadora, cuyos elementos principales han sido señalados y nombrados en la leyenda de la parte inferior de la imagen. El aire caliente deshumidificador que ingresa a la cámara interna corresponde al aire propulsado por el ventilador centrífugo. El aire caliente después ingresa a la cámara de secado por medio de los agujeros con los que cuenta la cámara rotatoria interna. La operación comienza cuando es recibido el comando respectivo en el panel de control, tras lo cual se acciona el motor AC, que transmite la potencia mecánica al eje del tambor conectado a su caja reductora, y finalmente empieza la circulación de aire en el interior de la cámara. Puesto que se trabaja con temperaturas elevadas de 40 a 50°C, la carcasa exterior debe contar con una lámina interna de material aislante para evitar pérdidas de calor y accidentes por contacto con superficies calientes. Cuando la humedad del cacao llegue al valor requerido del 7%, momento registrado por el sensor higrométrico instalado cerca del conducto de escape del aire, se procede a desactivar al motor y el ventilador y un comando es enviado desde el controlador para encender la alarma sonora del panel de control.

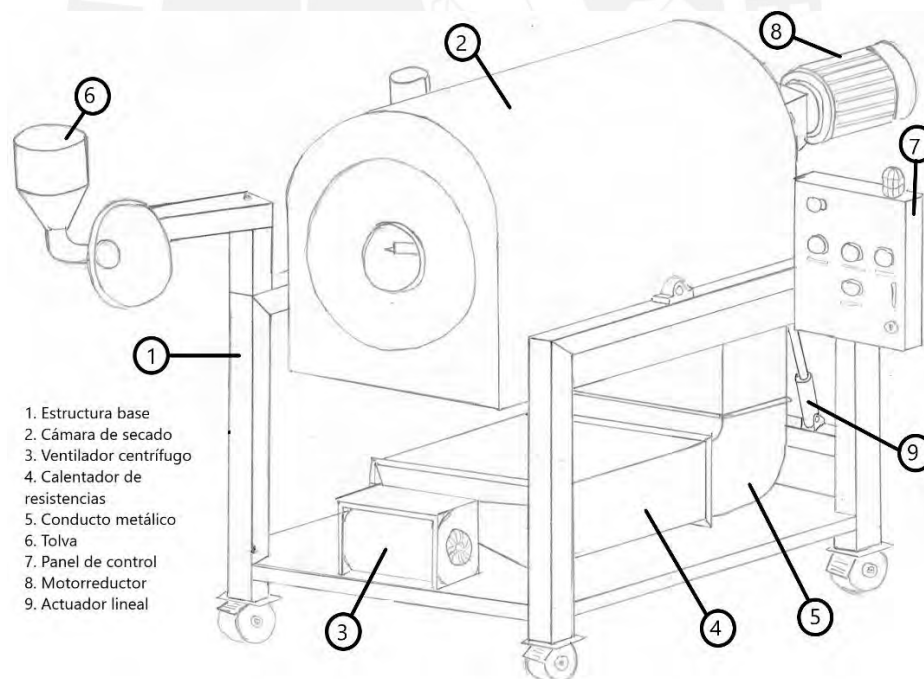


Figura 23: Vista isométrica de la secadora

Nota: Elaboración propia

Por último, en la figura 24 se muestra la vista de perfil del tambor rotario para el secado. Un lado del tambor cuenta con un eje accionado por un motorreductor de ejes paralelos, mientras que el resto del cuerpo de la cámara reposa sobre rodillos montados

sobre la carcasa externa, cuyos bordes son representados por las líneas punteadas en el dibujo. Adicionalmente, una mordedura en el lado inferior derecho permite observar las paletas que evitan que se tenga un lecho estático de los granos de cacao mientras el tambor gira.

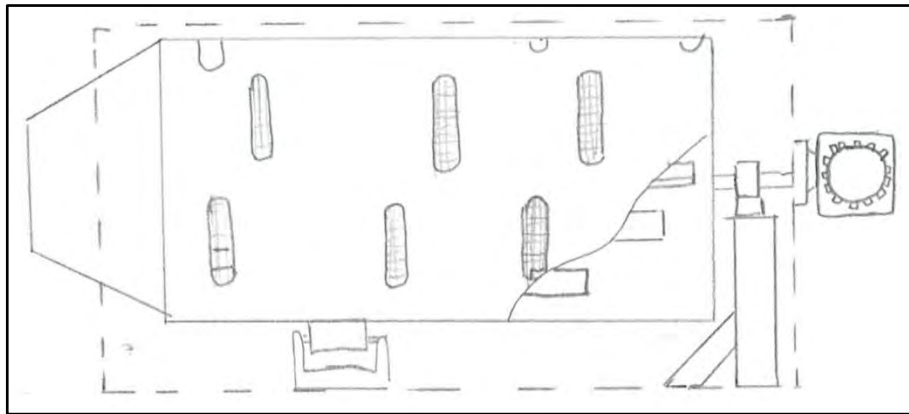


Figura 24: Vista preliminar de perfil de la cámara interna de secado

Nota: Elaboración propia

5.2.4. Diagrama de comportamiento

Los presentes diagramas son esquemas de las acciones y funciones que se deben realizar por parte de los usuarios o el software del sistema antes del inicio de la operación y las realizadas durante el funcionamiento del sistema de secado artificial.

La figura 25 muestra el diagrama del comportamiento del sistema de secado para la operación de la máquina. Tras la carga de los granos y de la confirmación del operario para el inicio de la operación desde el panel de control, se da la señal de alerta al usuario del inicio de operación con la alarma sonora. Luego, se procede con el encendido de los elementos de accionamiento e instrumentación de la secadora. Con los datos de temperatura del aire de secado, se regula la potencia eléctrica del calentador de resistencias. Una vez alcanzada la humedad relativa del grano deseada de 8%, se incluyen en el diagrama las acciones respectivas realizadas por el sistema de control, hasta el accionamiento manual del actuador lineal para la descarga de los granos secos.

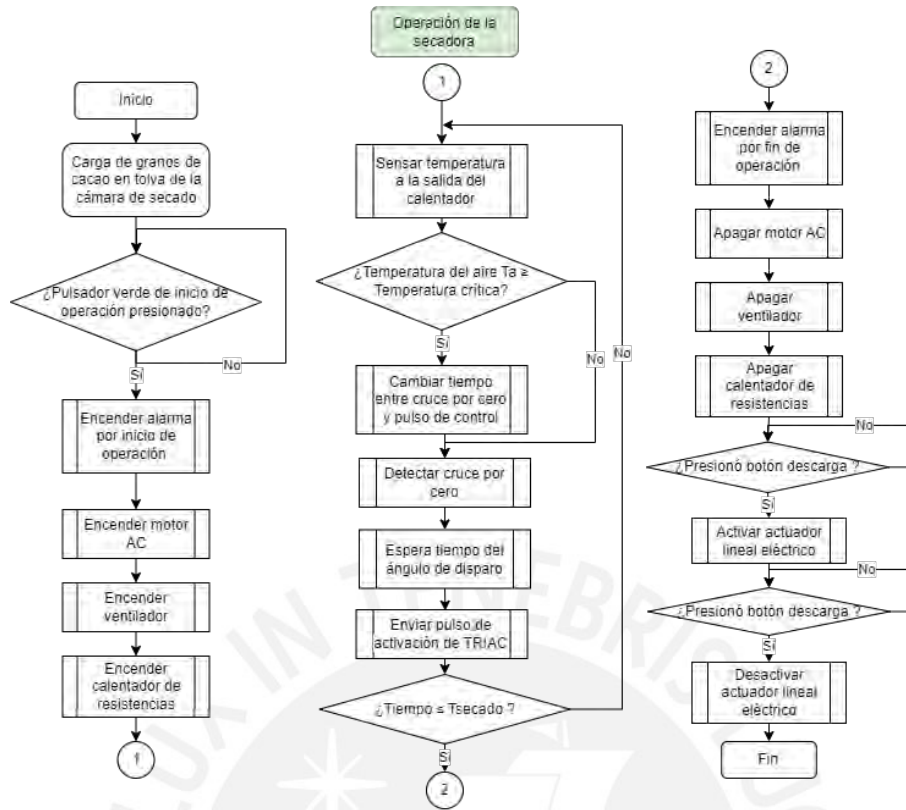


Figura 25: Diagrama de comportamiento de la secadora durante la operación

Nota: Elaboración propia

En los esquemas incluidos en la figura 26 se esquematiza el comportamiento del sistema en dos situaciones específicas. El diagrama de la izquierda se muestra el flujo de acciones en el caso de que se presione el botón para el control de encendido y apagado del motor AC; en el diagrama de la derecha, el caso de una situación de emergencia.

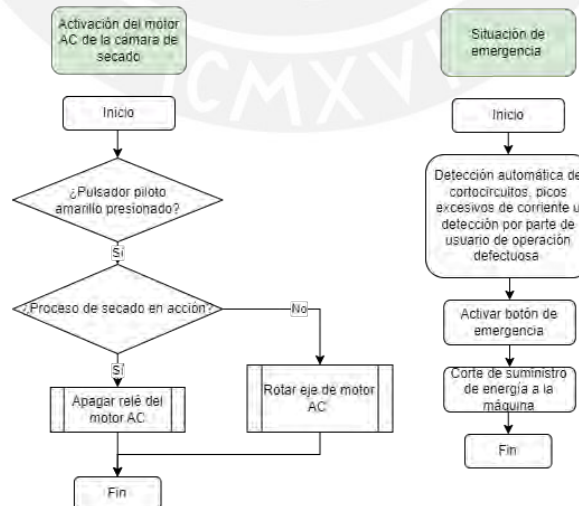


Figura 26: Diagrama de comportamiento para motor y situación de emergencia

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO III

Diseño del sistema mecatrónico

El diseño de la secadora de granos de cacao involucra el desarrollo de la teoría, diagramas y cálculos necesarios para el diseño cada uno de los subsistemas que la conforman, así como la integración de cada uno de ellos. Este capítulo se ocupa de documentar la etapa de diseño de los subsistemas identificados de la secadora, mediante la cual se identifican, se adecuan y relacionan todos los respectivos componentes. La figura 27 a continuación muestra al sistema de secado con tres de los subsistemas identificados en una leyenda con su etiqueta respectiva. Adicional a estos tres subsistemas se cuenta por un lado con el subsistema para el control de la temperatura del aire caliente. Por otro lado, se halla el que cumple la función de adaptación de la acometida eléctrica de la máquina secadora.

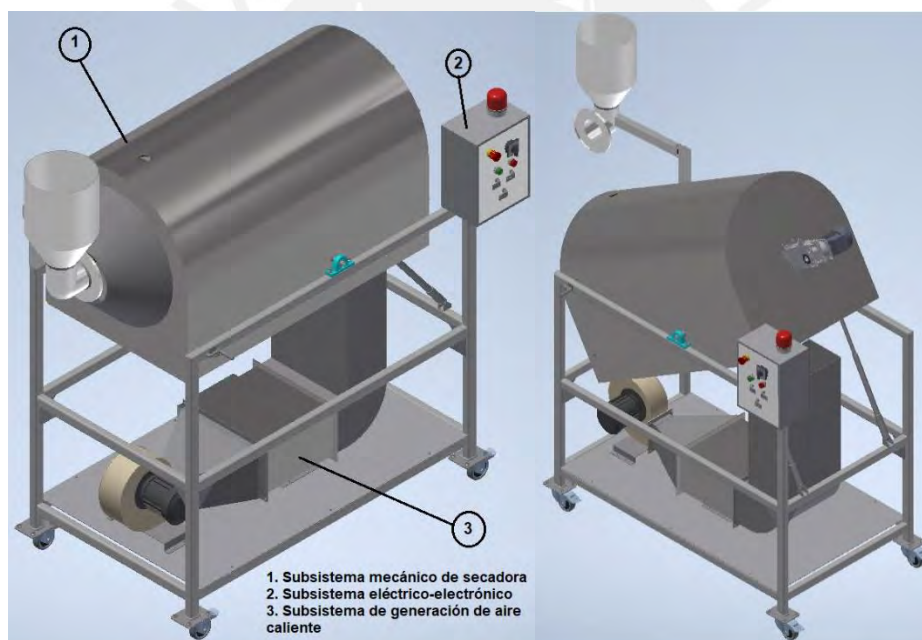


Figura 27: Secadora de granos de cacao

Nota: Elaboración propia.

En la etapa de diseño conceptual se determinó que el medio más apropiado para nuestros fines mediante el cual se secan los granos es el de la transferencia de calor por convección. El proceso de remoción de la humedad al interior de los granos mediante la transferencia de calor por convección implica el análisis de distintos fenómenos que se llevan a cabo desde la carga de los granos húmedos en la secadora hasta su extracción con una humedad apropiada para ser almacenada. Entre estos fenómenos se debe estudiar

el proceso psicrométrico para el acondicionamiento del aire caliente que absorbe la humedad de los granos; además, los procesos termodinámicos involucrados a analizar son la transferencia de masa, pues se extrae agua del interior del grano al ambiente exterior, y la transferencia de calor, en la que se consideran los cambios de fase del agua a remover y la transferencia por conducción en el proceso de calentar y conducir el aire de secado del ambiente hasta la cámara de secado.

Una vez establecida la arquitectura y componentes de los sistemas mecánico y de generación de aire caliente, será necesario diseñar el sistema de control de la temperatura del aire caliente. Esto conlleva la selección de componentes eléctricos y electrónicos, la interfaz del usuario y la elección y programación de la estrategia de control para finalmente poder simular el comportamiento de la planta de secado a controlar.

6 Diseño mecánico de la secadora

El presente apartado comprende una memoria descriptiva, del cálculo y diseño, de los elementos mecánicos de la máquina secadora. Lo definido queda descrito y representado en los planos mecánicos de ensamble y despiece, listados en el último subacápite y anexos al final del presente documento.

6.1 Dimensionamiento del tambor rotatorio

El tambor rotatorio es el elemento de la secadora en la que se coloque la carga de granos. Se le introduce el aire caliente para la remoción de la humedad y cuenta con un movimiento rotatorio con el fin de uniformizar los granos de cacao durante el secado. Las dimensiones finales del tambor rotatorio se obtienen a partir de la capacidad deseada para secado de los granos con alto contenido de humedad y la densidad de los granos de cacao.

Se tienen los datos iniciales de capacidad de la secadora por los requisitos de diseño y las características físicas del cacao.

$$V_{cacao} = \frac{C}{\rho_c}$$

donde:

C : Capacidad de trabajo de la secadora, 60 kg.

ρ_c : Densidad del cacao, $0,775 \frac{g}{cm^3}$.

$$V_{cacao} = \frac{60\,000}{0,775} = 77419,35 \text{ cm}^3.$$

A fin de contar con una distribución uniforme de la corriente de aire caliente en la cámara de secado, los valores recomendados de volumen utilizado de una secadora según Sucunuta (2011) y Barbecho (2019) se encuentran en el rango de 7% y 8 %, con la posibilidad de emplear hasta el 15% por cuestiones de seguridad. Asumiendo un volumen empleado de 15 %, se tiene:

$$V_{cámara} = \frac{V_{cacao}}{15\%} = 516131,33 \text{ cm}^3.$$

El largo “h” del tambor se determina en conjunto con el radio externo del tambor giratorio. Tomando en cuenta la sección circular que forma la carga de granos en el tambor (Figura 28) , el porcentaje de volumen utilizado del cilindro, se consideran las siguientes fórmulas y se elabora la tabla para calcular los valores de h y R que se obtienen.

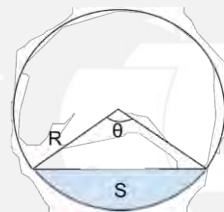


Figura 28: Segmento circular formado por granos de cacao

Nota: Elaboración propia

$$A_{sc} = \frac{R^2(\theta - \sin(\theta))}{2},$$

$$\frac{A_{sc}}{A_s} = \frac{(\theta - \sin(\theta))}{2\pi},$$

donde:

A_{sc} : Área de la sección circular formada por los granos de cacao

A_s : Área de la base del tambor giratorio

h: Largo del tambor giratorio

$$V_{cacao} = A_{sc}h = 77419,35 \text{ cm}^3.$$

Tabla 20

Dimensiones del tambor giratorio

h (cm)	A_{sc} (cm ²)	θ (rad)	R (cm)
80	967,75	1,62675	55,50
100	774,20	1,89149	40,53
120	645,16	1,89149	37,00
130	595,54	1,89149	35,55
150	516,13	1,89149	33,09

Nota: Elaboración propia

De esta manera, el tambor giratorio tendrá un radio interno de 37 cm y un largo de 1,2 m. La figura 29 muestra el modelo 3D de dicho tambor. En las aberturas que permiten el ingreso de aire, se instalan mallas metálicas de acero inoxidable de 0,5”x0,5”, incluidas en el modelo, para mantener los granos al interior del tambor.

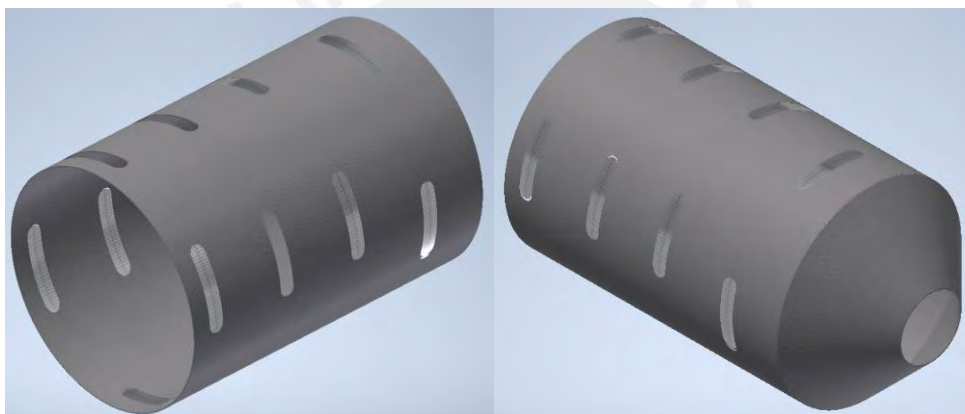


Figura 29: Modelo 3D del cilindro del tambor giratorio

Nota: Elaboración propia

6.2 Diseño de la carcasa del tambor rotatorio

La carcasa metálica constituye, junto a los rodillos de soporte, la base de apoyo del tambor rotatorio. Es la estructura a la que se fijará el bastidor que soporta el eje de transmisión del tambor. Además, la carcasa permite contener el aire que se recibe del ducto por el cual es transportado el aire caliente y direccionarlo al interior del tambor rotatorio. Por último, protege a los operarios de estar en contacto directo con un elemento móvil y de sufrir quemaduras al tocar superficies con temperaturas elevadas.

Las consideraciones para el diseño son las dimensiones del tambor calculadas en la sección 6.1 y resaltada en la tabla 20.

Para el diámetro del tambor de 74 cm se considera:

- ❖ 5 cm de espacio por lado debido a la plancha de aislante térmico.
- ❖ 3 cm de espacio de distanciamiento por lado del tambor al aislante.

Para un largo del tambor de 120 cm:

- ❖ 10 cm del lado posterior debido al árbol de transmisión de 25 cm de largo.
- ❖ 5 cm de espacio de distanciamiento del lado frontal.

Debido a la menor área superficial de la geometría, se opta por que la parte superior de la carcasa sea rodada con diámetro igual al ancho de la carcasa.

De esta manera, las dimensiones finales de la carcasa son largo 1350 mm, ancho 90 mm y altura 92 cm. La figura 30 a continuación muestra el modelo 3D de la misma.

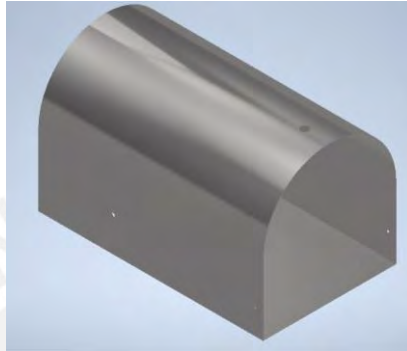


Figura 30: Modelo 3D de carcasa de la cámara de secado

Nota: Elaboración propia

6.3 Cálculo de la potencia del motor

El tambor de secado realizado un movimiento de rotación durante todo el proceso de secado a una velocidad constante. Para el cálculo de la potencia y selección del motor, se desarrolla el cálculo de las inercias del tambor, la carga de granos y el árbol de transmisión que componen el ensamble móvil.

- **Cálculo de la inercia de los granos de cacao**

Se considera que la inercia de la carga de granos equivale a la de un anillo de radio interno R_1 y radio externo R_2 , como el mostrado en la figura 38, y se calcula según la fórmula:

$$I_c = \frac{1}{2} M_c (R_1^2 + R_2^2).$$

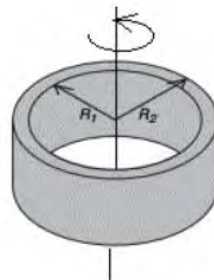


Figura 31: Representación de carga de granos mediante un anillo

Tomado de Momentos de inercia, 2006, en repositorio de la UPV

(<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/solido/inercia/inercia.html>)

Donde R_1 corresponde al espesor de la capa de granos, R_2 al radio interno del tambor y M_c a la masa de granos húmedos a secar.

$$I_c = \frac{1}{2} (60 \text{ kg})(0,341^2 + 0,37^2) = 7,595 \text{ kgm}^2.$$

- **Cálculo de la inercia del tambor giratorio**

El tambor es elaborado a partir de una plancha de acero inoxidable ASTM A500 de 3 mm y de radio 37 cm. Así, el tambor puede considerarse como un cilindro hueco de espesor insignificante, por lo que su inercia se calcula como:

$$I_T = \frac{1}{2} M_T (R_T^2).$$

Donde:

M_T : masa del tambor giratorio

R_T : Radio exterior del tambor giratorio

Para determinar la masa M_T se puede emplear la fórmula:

$$M_T = \rho_{plancha}(V) = \rho_{plancha}(A_s e) = \rho_{plancha} \left(2\pi \left(R_T - \frac{e}{2} \right) h e \right)$$

$$M_T = 7909 \left(2\pi \left(0,4 - \frac{0,003}{2} \right) \right) \times 1,2 \times 0,003 = 71,3 \text{ kg}.$$

Por lo tanto:

$$I_T = \frac{1}{2} 71,3 (0,373^2) = 4,960 \text{ kgm}^2.$$

- **Cálculo de la inercia del eje del tambor**

El eje se considera como un cilindro robusto de diámetro de 30 mm. Por ello, la inercia de rotación alrededor del eje principal obedece a la fórmula:

$$I_e = \frac{1}{2} M_e R_e^2.$$

Se debe calcular primero la masa del eje. Se considera para ello la expresión a continuación. La densidad es la de una barra de acero a partir de la cual es torneada.

$$M_e = \pi (R_e)^2 L_e \rho$$

$$M_e = \pi (0,015 \text{ m})^2 * 0,15 \text{ m} * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,832 \text{ kg}.$$

Por lo tanto:

$$I_e = \frac{1}{2} 0,832 \text{ kg} (0,015 \text{ m})^2 = 0,000094 \text{ kgm}^2$$

La inercia total corresponde a la suma de las 3 inercias calculadas.

$$I = I_T + I_c + I_e,$$

$$I = 13,3 \text{ kgm}^2.$$

Se procede a calcular la aceleración angular, que obedece la expresión:

$$\alpha = \frac{w_f - w_i}{T}$$

Donde:

α : aceleración angular del tambor [rad/s²]

w_f : velocidad angular final del tambor [rad/s], 3.14 rad/s

w_i : Velocidad inicial del tambor [rad/s], 0 rad/s

T : Tiempo en el que el tambor da una vuelta completa inicialmente [s], 1 s

$$\alpha = \frac{3,14-0}{1} = 3,14 \frac{rad}{s^2}$$

Con dicho valor, se calcula el torque necesario:

$$T_{et} = \alpha I = 41,76 Nm.$$

Conociendo el torque necesario en el eje del tambor, se calcula la potencia en el eje del tambor:

$$P_{et} = T_{et}\omega$$

$$P_{et} = 41.76(3.14) = 131,13 W.$$


Considerando una eficiente de la caja reductora de 85 % se tendrá que la potencia en el eje del motor debe ser:

$$P_{em} = \frac{P_{et}}{\eta} = 154,27 W.$$

El valor comercial escogido es de 1,12 kW. El fabricante Kraftmann ofrece un motor monofásico de dicha potencia con las siguientes características.

Tabla 21

Especificaciones del motor seleccionado

No. de Modelo.	NEMA 1.5HP-KRAFTMANN
Imagen	
Número de polos	2
Tensión nominal	127/220V @ 60Hz
Potencia nominal	1,12 kW @ 1500 RPM
Grado de protección	IP56
Temperatura de operación	-20°C~40°C

Nota: Datos tomados de Motorex (<https://www.motorex.com.pe/p/>)

El motorreductor seleccionado debe llevar la velocidad de salida a 30 RPM, se debe poder montar mediante una brida en el extremo de su eje de salida y, por último, que los ejes de entrada y salida del mismo pueden ser ortogonales o de ejes paralelos.

La marca Transtecno ofrece cajas reductoras de ejes ortogonales. El modelo es compatible con una entrada de potencia de 12 kW, velocidad de giro de salida igual a 30 RPM, peso de 17 kg y torque de salida de 39 Nm, acorde a lo calculado a la sección anterior, es el de denominación CMB402-FBD-71B14, mostrado en la figura 32.

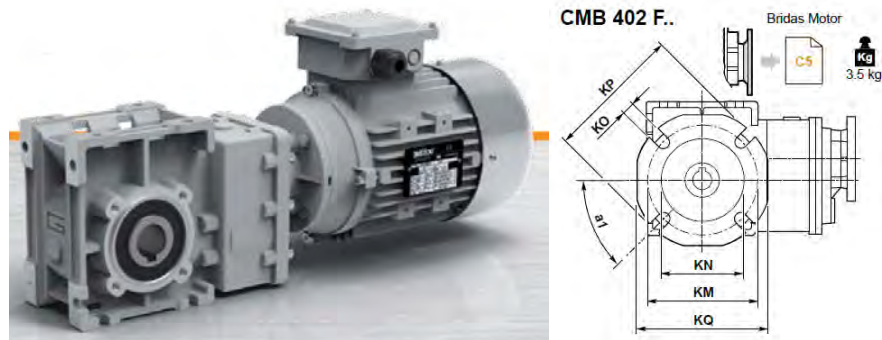


Figura 32: Motorreductor de ejes ortogonales Transtecno CMB402

Nota: Elaboración propia

6.4 Dimensionamiento del eje del tambor

Para el cálculo de las fuerzas sobre el eje del tambor, primero se hallan las reacciones en los apoyos del tambor rotatorio. A la izquierda el tambor se apoya sobre rodillos que le permiten girar sobre su propio eje; a la derecha, se identifica la reacción resultante de apoyarse sobre su eje.

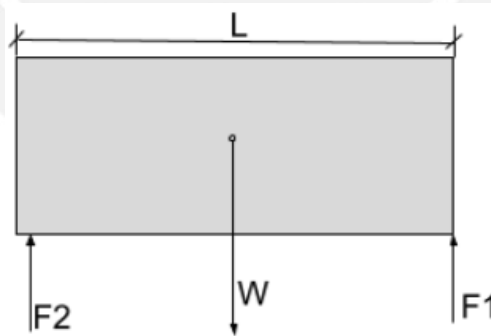


Figura 33: DCL del tambor giratorio

Aplicando sumatoria de momentos en el punto de aplicación de F1:

$$\Sigma M_{F1} = 0$$

$$F_2 L = \frac{WL}{2},$$

$$F_2 = 710,5 \text{ N.}$$

Aplicando sumatoria de fuerzas en el eje vertical:

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$F_2 = F_1 = \frac{W}{2} = 710,5 \text{ N.}$$

Se consideran como materiales para el eje del tambor a los aceros SAE 1020 y el AISI 1045 cuyas propiedades son las mostradas en la tabla 22.

Tabla 22

Propiedades físicas de los aceros considerados

Acero	σ_B (MPa)	σ_F (MPa)	E (MPa)
SAE 1020	490 - 588	370	$2,1 \times 10^5$
AISI 1045	650-800	390	$2,1 \times 10^5$

Nota: Información tomada de “Resistencia de materiales 2”, por Rodriguez, J., 2019.

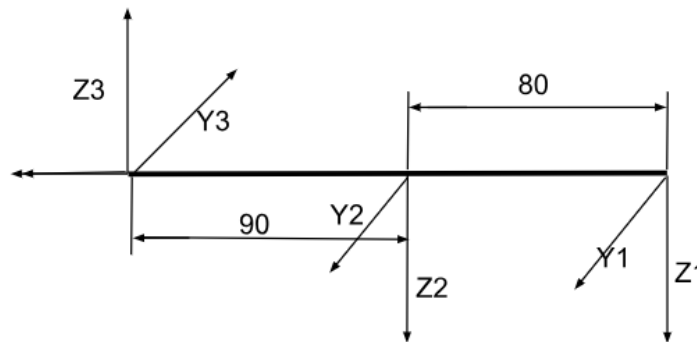


Figura 34: DCL del eje del tambor

Según la potencia calculada del motor en el inciso previo, $P = 150 \text{ W}$ y la velocidad de giro es de 30 RPM. La eficiencia de la transmisión es 90%.

El torque transmitido por el árbol será:

$$Mt = \frac{\eta P}{\omega} = \frac{150 * 0,9 * 60}{2\pi * 30} = 42,994 \text{ Nm} = 42994 \text{ Nmm},$$

$$Mt = \frac{Y_1 D}{2}.$$

Se asume un diámetro $D = 30 \text{ mm}$ para el eje. Por lo tanto:

$$Y_1 = 2866,2 \text{ N},$$

$$Z_1 = W_{motorreductor} = 245 \text{ N},$$

$$\Sigma M_{Y_2} = -2866,2 * 90 - Y_3 * 80 = 0 \rightarrow Y_3 = -3224,45 \text{ N},$$

$$\Sigma M_{F_Y} = 0 : Y_3 = Y_2 + Y_1 \rightarrow Y_2 = -6090,97 \text{ N},$$

$$\Sigma M_{Z_2} = Z_3 * 90 + 245 * 80 = 0 \rightarrow Z_3 = -217,77 \text{ N},$$

$$\Sigma M_{F_Y} = 0 : Z_3 - Z_2 - Z_1 = 0 \rightarrow Z_2 = 462,77 \text{ N}.$$

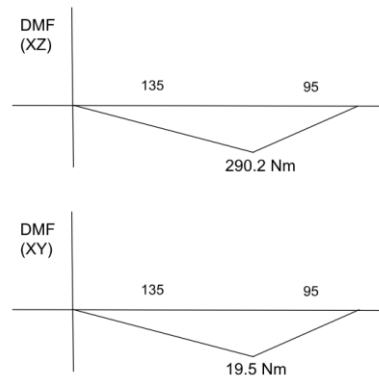


Figura 35: Diagrama de momentos flectores en planos XY y XZ

Nota: Elaboración propia

Para el análisis de la sección más cargada del eje se considera:

$$\text{Momento Flector: } M_f = \sqrt{(290,2^2 + 19,5^2)} = 290,85 \text{ Nm}$$

$$\text{Momento Torsor: } M_t = 42,99 \text{ Nm}$$

Los esfuerzos correspondientes en función del diámetro d serían:

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d^3} = \frac{2964,1 * 10^3 \text{ N}}{d^3 \text{ mm}^2},$$

$$\tau_t = \frac{16M_t}{\pi d^3} = \frac{218,9 * 10^3 \text{ N}}{d^3 \text{ mm}^2}.$$

El esfuerzo equivalente según Von Mises es:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{2964,1 * 10^3}{d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{218,9 * 10^3}{d^3}\right)^2} \leq \frac{\sigma_F}{FS} = \frac{370}{2} = 185 \text{ MPa}.$$

Se obtiene $d = 25,2 \text{ mm}$ empleando SAE 1024 y $d = 24,5 \text{ mm}$ con AISI 1045. Debido a la pequeña diferencia entre los diámetros mínimos y el menor costo del material, se opta por el SAE 1024.

Por lo tanto, el eje cuenta con tres secciones. Una de diámetro 25 mm la cual se apoya en los rodamientos y las dos secciones de los extremos de diámetro 20 mm. La pieza CAD diseñada es la mostrada en la figura 36 a continuación.



Figura 36: Modelo CAD del eje del tambor

Selección de rodamiento del eje

La secadora de granos diseñada se considera una máquina utilizada para 8 horas de trabajo diario no siempre utilizada al máximo por lo que la expectativa de vida útil se estima en 15000 horas de funcionamiento.

El diámetro interior del rodamiento debe ser de 25 mm; debe ser desmontable y soportar netamente carga radial resultante de las reacciones de apoyo. Adicionalmente, sus características deben ser favorables en caso existe desalineación en funcionamiento al tratarse de un tambor rotario con distribución desbalanceada de cargas y correcta disposición para ser montado como rodamiento fijo. Por ello, se seleccionan rodamientos de bolas a rótula.

La carga radial es 6,11 kN, En el catálogo de rodamientos SKF (SKF, 2015) se pueden encontrar los rodamientos de bolas a rótula 1305 ETN9, 1305 EKTN9 y 2205 ETN9. Considerando los parámetros de fuerza axial, velocidad de giro y horas de funcionamiento mencionadas, se opta por el 1305 ETN9. La chumacera asociada es una chumacera tipo puente con manguito de fijación modelo UKP306D1 de NTN.

Tabla 23

Resultados de la selección del rodamiento

	d	D	B	L_{10h}	L_{10mh}
1305 ETN9	25	62	17	16705,5	100 230

La simulación de los elementos involucrados en el soporte del tambor rotatorio como el bastidor y la carcasa metálica de la secadora se presenta a continuación en la figura 37.

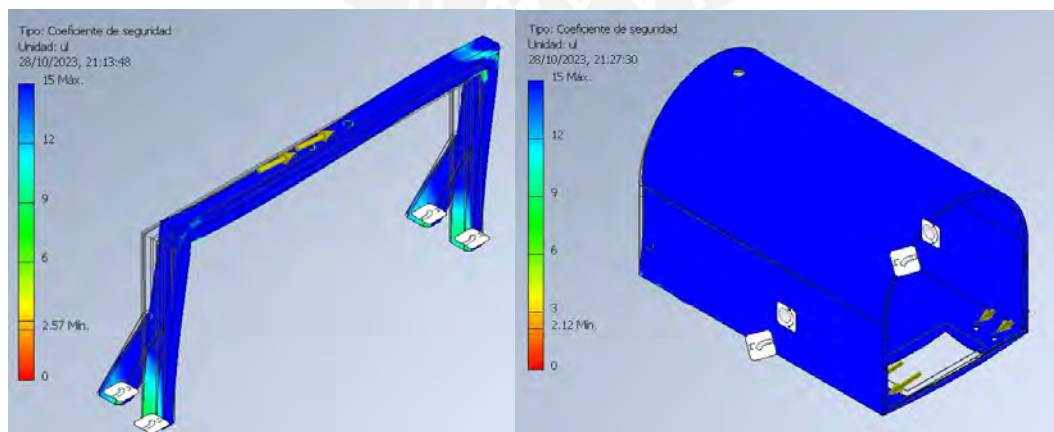


Figura 37: Simulación de esfuerzos en elementos de soporte

Nota: Elaboración propia

Con las medidas conocidas de la carcasa y el tambor y la comprobación de resistencia de materiales realizada, se muestra el modelo del mecanismo mediante el cual se logra generar el movimiento rotatorio del tambor. El ensamble de la cámara de secado constituido por el tambor, la cruceta, los rodillos de soporte, el motorreductor y la carcasa metálica se muestra en vista lateral y sección en la figura 38.

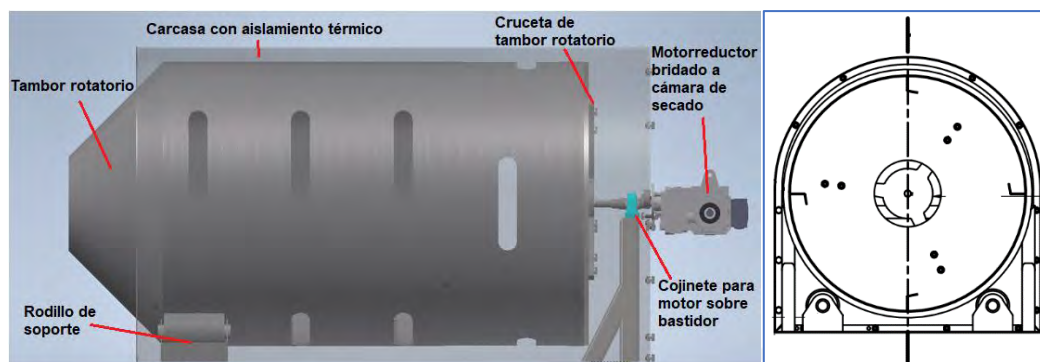


Figura 38: Modelo del ensamble de la cámara de secado

Nota: Elaboración propia

6.5 Diseño de levantadores

Los levantadores son los elementos que se encuentran soldados a las caras internas del tambor rotatorio que sirven el propósito de elevar los granos de la parte baja de la cámara y así garantizar que el secado de los sólidos húmedos sea uniforme.

Para calcular las dimensiones de estos elementos de la cámara de secado se sigue las ecuaciones presentadas por C.G.J. Baker, en su trabajo “*THE DESIGN OF FLIGHTS IN CASCADING ROTARY DRYERS*” publicado en 1988.

Las partes de un levantador son el vástago y el retenedor. La longitud de estas partes (L y L' respectivamente) y el ángulo Ψ entre ellos, así como la velocidad de giro N y el número máximo de levantadores n_f , deben ser definidos previo a los cálculos adicionales para el diseño integral de la cámara de secado.

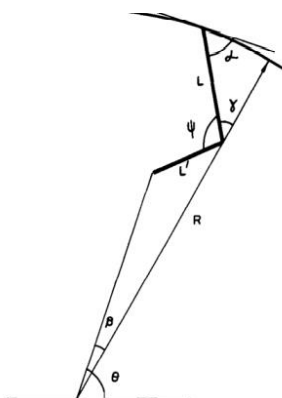


Figura 39: Dimensiones para un levantador angulado

Tomado de Baker (1988)

Como valores iniciales, se asignan algunas dimensiones a los retenedores:

L: Longitud del vástago; 6 cm

L': Longitud del retenedor; 3 cm

N: Velocidad de giro del tambor giratorio; 30 RPM

Ψ : Ángulo entre caras internas del vástago y del retenedor; 100°

n_f : Número de levantador por sección; 4

Para hallar γ_L se emplea la fórmula:

$$\gamma_L = \sin^{-1} \left[\frac{R \cos \alpha_L}{\sqrt{R^2 - 2RL \sin(\alpha_L) + L^2}} \right].$$

Donde:

γ_L : Ángulo entre el radio delimitador del extremo del vástago y su cara externa

α_L : Ángulo entre tangente a la circunferencia y el vástago; 90°

R: Radio interno de la cámara [m]

$$\gamma_L = \sin^{-1} \left[\frac{0,37 \cos 90^\circ}{\sqrt{0,37^2 - 2(0,37)(0,06) \sin(90^\circ) + 0,06^2}} \right] = 0^\circ.$$

El ángulo β_L es la apertura de la proyección de los extremos del retenedor y se calcula según:

$$\beta_L = \tan^{-1} \left[\frac{L' \sin(\gamma_L + \Psi)}{L' \cos(\gamma_L + \Psi) + \sqrt{R^2 - 2RL \sin(\alpha_L) + L^2}} \right].$$

$$\beta_L = \tan^{-1} \left[\frac{(0,03) \sin(100^\circ)}{0,03 \cos(100) + \sqrt{0,35^2 - 2(0,35)(0,06) \sin(90) + 0,35^2}} \right] = 3,79^\circ.$$

El diámetro efectivo es el que se extiende del eje del tambor hasta la sección más externa del vástago. Se calcula según la fórmula:

$$D_e = D - 2(L' \cos(180 - \alpha_L) + L).$$

Donde:

D_e : Diámetro efectivo del tambor [m]

L': Longitud del retenedor [m]

r_e : Radio efectivo del tambor [m]

$$D_e = 0,74 - 2(\cos(90) (0,03) + 0,06) = 0,62 \text{ m},$$

$$r_e = 0,31 \text{ m.}$$

El ángulo de separación entre levantadores es:

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{n_f} = \frac{360}{4} = 90^\circ.$$

El índice de fuerza centrífuga y gravitacional depende de la velocidad de rotación y la longitud de los vástagos. Está definido mediante la expresión:

$$\vartheta = \frac{r_e \omega^2}{g},$$

donde:

ϑ : Índice de fuerza centrífuga y gravitacional

ω : Velocidad de rotación [rad/s]

g : gravedad [m/s^2]

$$\vartheta = \frac{(0,31)(15 \times \frac{\pi}{30})^2}{9,81} = 0,0779.$$

Los levantadores se sueldan al tambor de la cámara de secado con una separación de 90° cada uno. Además, a fin de asegurar la contención de granos al interior de la cámara rotatoria, se tiene una malla fina de acero inoxidable en cada rendija de entrada de aire, tal como se muestran en la figura 40.

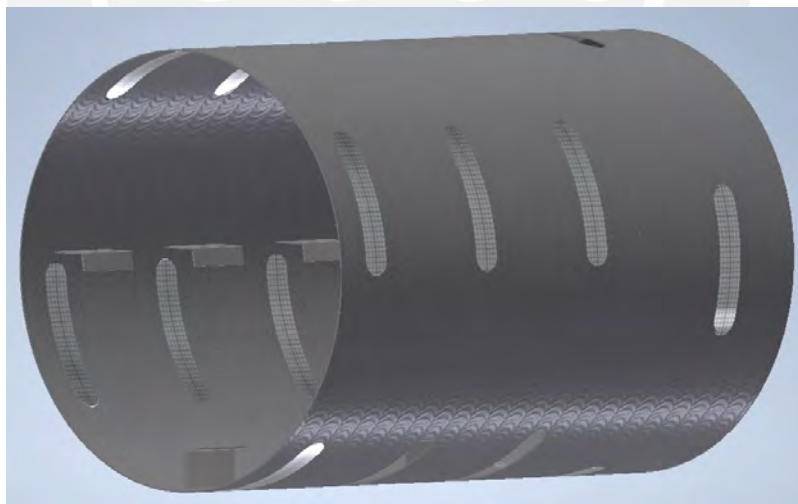


Figura 40: Ensamble del tambor con el levantador

Nota: Elaboración propia

6.6 Diseño de estructura de soporte y selección de perfiles metálicos

La estructura metálica que soporte la cámara de secado experimenta cargas estáticas y dinámicas durante la operación de secado. En la presente sección, se dimensiona dicha estructura considerando el requisito de una geometría simple y la descarga automática de granos ideada. Luego, para la selección del perfil apropiado, se identifican y modelan las cargas soportadas acorde a los parámetros de funcionamiento resultantes de los requisitos de diseño.

• Geometría de la estructura

Para la determinación de la altura de la estructura se ilustra la geometría respectiva en la figura 41 a continuación.

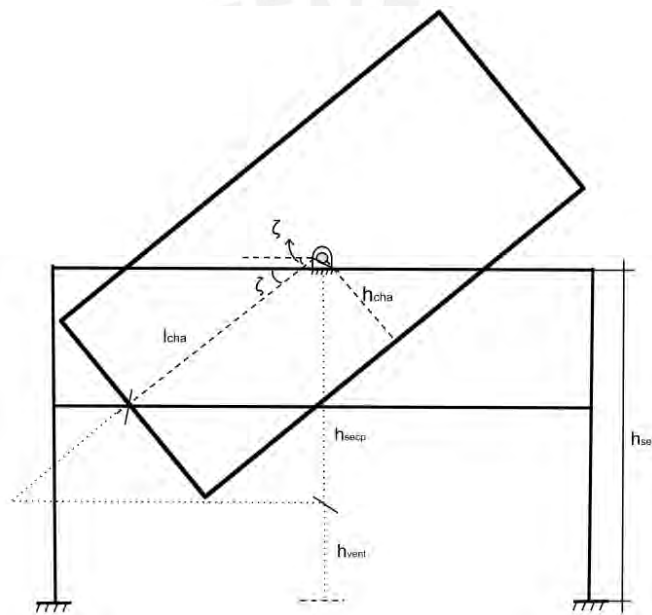


Figura 41: Geometría de la cámara de secado inclinada para descarga

Nota: Elaboración propia

Donde:

h_{cha} : distancia de pivote a base de cámara de secado; 214 mm

l_{cha} : distancia de pivote a sección frontal de cámara de secado; 675 mm

h_{secp} : distancia necesaria de la cámara para la descarga de granos

h_{sec} : altura de la estructura de la secadora

ζ : inclinación total de la cámara de secado; 45°

$$h_{secp} = h_{cha} \sec(\zeta) + (l_{cha} - h_{cha} \tan(\zeta)) \sin(\zeta)$$

$$h_{secp} = 214 \sec(45^\circ) + (675 - 214 \tan(45^\circ)) \sin(45^\circ) = 628,6 \text{ mm} .$$

Se debe evitar el riesgo de colisión de la cámara con la parte inferior de la estructura donde se encuentra el ventilador y los ductos para el transporte del aire. Por ello, se estima una distancia h_{vent} de la base al punto más elevado del ventilador igual a 450 mm. Además, debido a que para facilidad de cálculo se escogió el punto medio de la longitud de la cámara de secado, se agrega un factor de corrección a la altura de 1.1, por lo que h_{sec} es:

$$h_{sec} = 1.1(h_{secp} + h_{vent}) \approx 1200 \text{ mm}$$

Luego, con el dato de la altura se pasa al cálculo de la longitud y carrera deseada del actuador lineal. A este efecto, se ilustra en la figura 42 la geometría respectiva de la secadora con el actuador con y sin accionamiento.

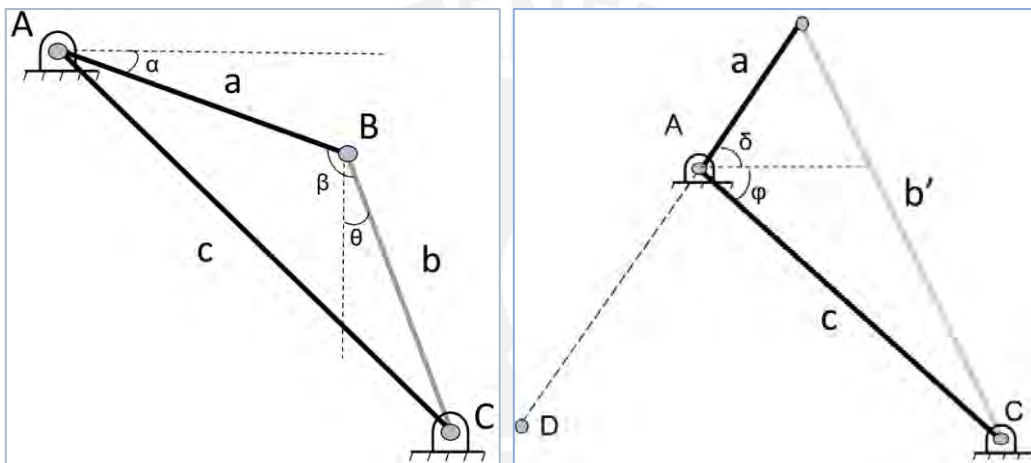


Figura 42: Geometrías de la estructura según posición del actuador lineal

Nota: Elaboración propia

Donde:

A : Punto de pivote de la secadora

B : Unión de base de cámara de secado con actuador lineal

b: Longitud de actuador lineal retraído

b': Longitud de actuador lineal extendido

C: Punto de apoyo de base de actuador lineal

D: Extremo frontal de cámara de secado

θ : Inclinación vertical de actuador; 20°

φ : Ángulo entre horizontal y segmento \overline{AC}

Se puede observar de la geometría de la secadora con el actuador lineal accionado que la relación $\overline{AB}/\overline{BD}$ determinará la longitud b' del actuador extendido, donde \overline{BD} es la longitud total de la cámara de secado y \overline{AB} la distancia del pivote al punto de apoyo del actuador en la parte trasera de la cámara. Así, b' será menor mientras $\overline{AB}/\overline{BD}$ sea

menor, con lo que se tendrá un actuador de menor carrera, aunque solicite ligeramente mayor potencia que para relaciones $\overline{AB}/\overline{BD}$ más grandes debido al mayor torque necesario al tener una palanca más corta entre el pivote y el punto de acción de la fuerza. En conclusión, se optará por una ubicación del pivote más cercana a la parte posterior a fin de emplear un actuador lineal de menor carrera, a efecto de los menores costes que ello y la reducción de dimensiones finales de la estructura de soporte implican.

Para el ángulo α , se considera al pivote ubicado el punto medio de la sección rectangular de la cámara de secado, por lo que:

$$\alpha \approx \tan\left(\frac{h_{cham}}{w_{cham}}\right) \approx 20^\circ$$

La longitud aproximada de a se puede obtener considerando la posición del pivote más cercana a la parte trasera de la cámara de secado:

$$a = 0,85\sqrt{h_{cham}^2 + (w_{cham})^2} = 600 \text{ mm}$$

Luego, ya que se determinó $h_{sec} = 1200 \text{ mm}$, la distancia vertical d_{vpa} del pivote al apoyo de la base del actuador es 600 mm . La distancia horizontal pivote-actuador d_{hpa} :

$$d_{hpa} = 0,85w_{cham} + d_{hbp},$$

donde:

d_{hbp} : distancia horizontal de unión cámara – actuador a base de actuador; 120 mm

Por lo que:

$$c = \sqrt{d_{hpa}^2 + d_{vpa}^2} = 920$$

Finalmente, la longitud b del actuador se obtiene mediante la expresión

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\beta)$$

De ello, $b = 410 \text{ mm}$. Si se varía d_{hpa} a una distancia menor, b disminuye. Por lo tanto, la longitud b puede estar entre 400 a 500 mm .

Para b' , se halla primero φ , mediante ley de senos:

$$\frac{c}{\text{sen}(\beta)} = \frac{b}{\text{sen}(\varphi - \alpha)},$$

$$\varphi = 42^\circ.$$

Luego:

$$b'^2 = a^2 + c^2 - 2\cos(\varphi + \delta)ac,$$

$$b' = 850 \text{ mm.}$$

Por lo tanto, se contará con un actuador lineal con longitud inicial entre 400 a 500 mm y una longitud extendida entre 850 a 900 mm.

De este modo, conociendo las especificaciones del actuador lineal que se requiere para la geometría presentada, se selecciona un actuador disponible en el mercado con dichas características. Se presenta la opción seleccionada en la tabla 24 a continuación.

Tabla 24

Especificaciones técnicas de actuador lineal eléctrico

Características	Actuador lineal eléctrico LA25
Imagen	
Voltaje de alimentación	24 V
Corriente @ Max. Carga	8 A
Carrera	300 mm
Fuerza Estática Máx.	600 N
Fuerza Dinámica Máx.	2200 N
Precio	\$397

Elaboración propia. Imagen tomada de Bansbach Easylift. Disponible en (<https://www.easye.us/products/easye35/>)

• Selección de perfil de la estructura

Se seleccionó el perfil adecuado para la estructura a partir de los perfiles de acero galvanizado ASTM A500 ofrecidos por Aceros Arequipa, mostrados en la figura 43.

DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPESORES (mm)												
	1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	4.0	4.5	6.0	8.0	10.0	12.0	
RECTÁNGULO													
L E													
20 x 40	1.35		1.70										
25 x 50	1.65	2.04	2.26										
40 x 50		2.46	2.73										
40 x 60	2.26	2.75	3.03		3.60	4.25							
40 x 80	2.71		3.66		4.39	5.19							
50 x 70			3.67		4.56	5.43							
50 x 75						5.42							
50 x 100		4.16	4.50		5.56	6.60	8.59	10.10	13.24				
50 x 150			6.17		7.68	9.17	11.73	13.63	17.95				
150 x 100					9.66	11.55	15.31	17.16	22.66				
200 x 100						13.91	18.45	20.70	27.37	36.10	44.64		
200 x 150						16.26	21.59	24.23	32.08	42.38	52.49		
250 x 100								24.23	32.08	42.38	52.49		
250 x 150								27.76	36.79	48.66	60.34		
300 x 200									46.21	61.22	76.04	90.65	
400 x 200											91.74	109.49	
500 x 300												123.14	147.18

Figura 43: Perfiles rectangulares de acero galvanizado ASTM A500

Tomado de catálogo de perfiles de Aceros Arequipa (2020)

Para escoger el perfil adecuado, se debe conocer los esfuerzos a los que están sometidos los perfiles más cargados. Dichos perfiles son los que se encuentran en la parte superior de la estructura y soportan el peso de la cámara de secado, el cual incluye el tambor giratorio, su eje, el motorreductor y la carcasa.

Las fuerzas que actúan sobre los perfiles se calculan a partir del DCL (Figura 37) de la cámara de secado. La parte delantera de la cámara corresponde a la parte izquierda de la imagen.

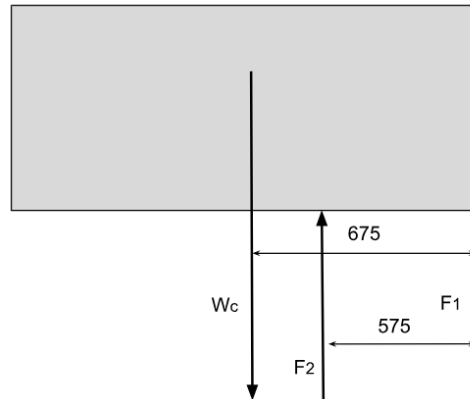


Figura 44: DCL de la cámara de secado, vista lateral

Donde:

F1: Fuerza de soporte de actuador lineal

F2: Fuerza de soporte en pivote

Wc: Peso de la cámara de secado, 240 kg

$$\Sigma M_{F2} = 0: 100Wc = -575F1 \rightarrow F1 = -409 \text{ N},$$

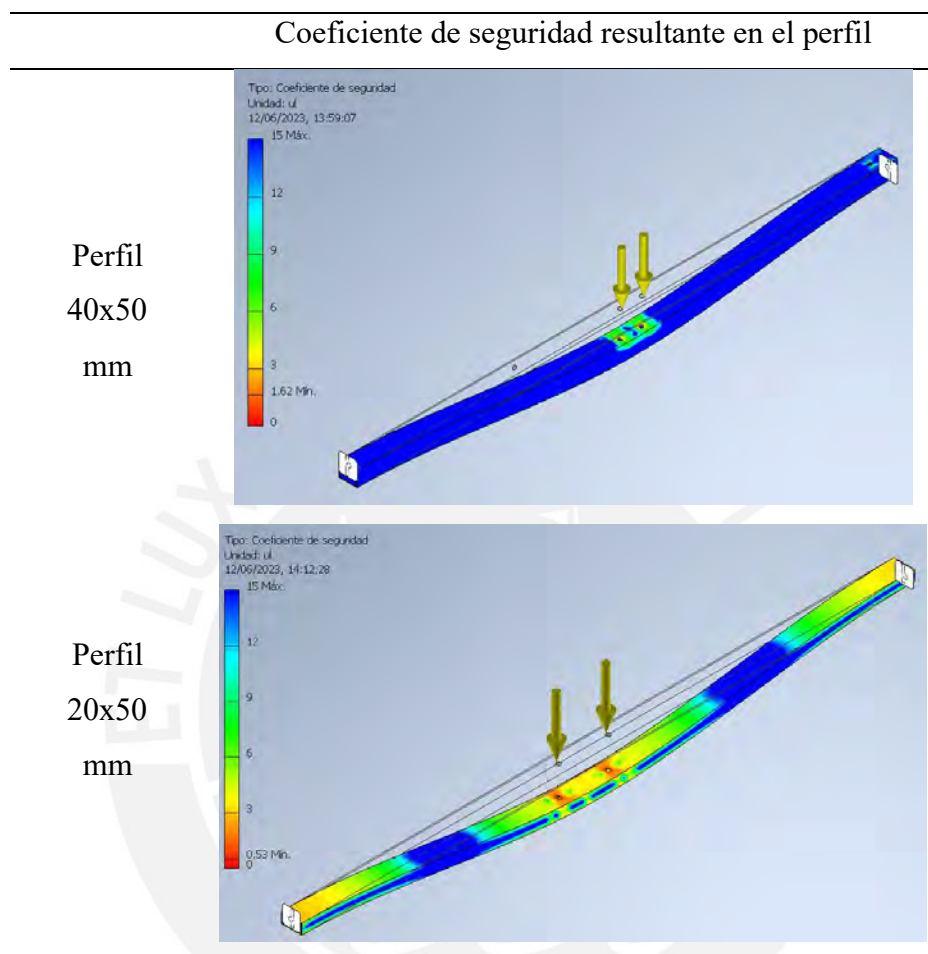
$$\Sigma F_y = F1 + F2 - Wc = 0 \rightarrow F2 = 2761 \text{ N}.$$

Se realiza la simulación de esfuerzos para los perfiles 40x50 mm con espesor de pared de 1.8 mm y los de dimensión 20x50 mm con espesor de pared de 1.8 mm.

Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 25 y son los esfuerzos equivalentes según Von Mises a lo largo del perfil.

Tabla 25

Resultados de análisis estático de los perfiles



Como se observa en la tabla, el coeficiente de seguridad mínimo en el perfil 40x50 mm es 1,62, mientras que en el de 20x50 es igual a 0,53, lo que significa que fallaría bajo las sollicitaciones de carga de la secadora. Considerando los resultados de las simulaciones de los perfiles ofrecidos, se opta por el perfil rectangular de dimensiones 40mm x 50 mm con espesor de pared de 1,8 mm y densidad de 2,46 kg/m.

- **Análisis modal de la estructura de soporte**

De igual modo, como parte del análisis de la geometría de la estructura se realizó un análisis modal a 10 distintas frecuencias. El desplazamiento total calculado es 0.94 mm y los resultados presentados son desplazamientos normalizados de los perfiles. En la tabla 26 a continuación se presentan las dos frecuencias para la cual la estructura presenta una deformación más generalizada en sus vigas críticas, como son en las que

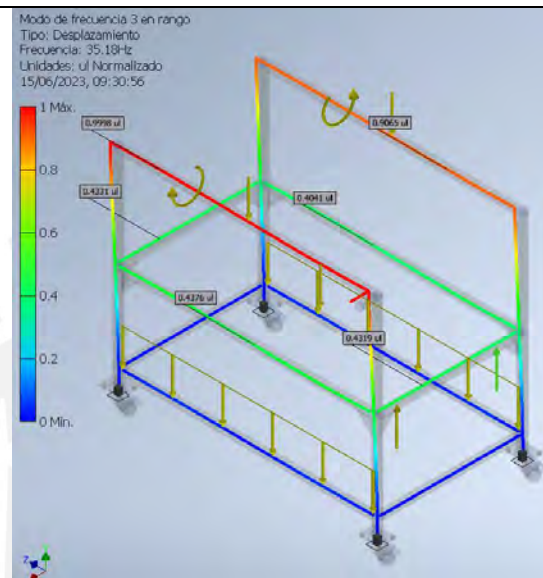
se asientan las bases de los actuadores lineales y donde se encuentran los cojinetes para pivotar la cámara de secado. Dado que la frecuencia normal de trabajo estará entre 0,5 a 2 Hz, la geometría presentada es la ideal para la secadora diseñada.

Tabla 26

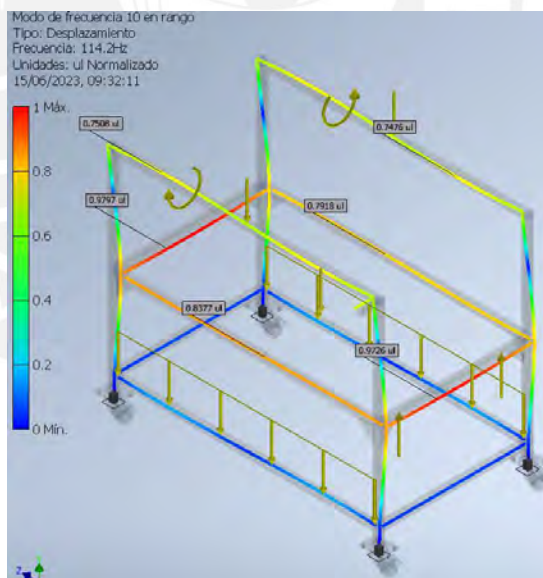
Resultados de análisis modal de la estructura

Desplazamiento normalizado de la estructura a distintas frecuencias

Desplazamiento
normalizado
@ 35,2 Hz



Desplazamiento
normalizado
@ 114,2 Hz



6.7 Cálculo de las dimensiones de la tolva

Para la carga de los granos de cacao húmedos en la cámara de secado se hace uso de una tolva mecánica. La geometría y rugosidad de este elemento deben asegurar un llenado eficaz del tambor rotatorio sin que se produzcan estancamientos del producto en el conducto de la tolva. Adicional a ello, se verifica en su diseño que la resistencia

de la tolva es tal que el material soporte las solicitaciones de presión y esfuerzos al realizar la descarga del producto dentro de ella.

Para el caso particular de la secadora diseñada, la geometría ilustrada en la figura 44 a continuación se adapta mejor que las tolvas de sección rectangular.

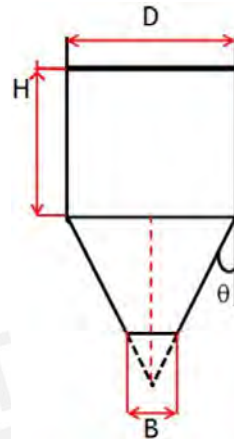


Figura 45: Geometría de la tolva cónica

Tomado de “Diseño mecánico de tolvas industriales” por Paredes, 2017.

El volumen de este tipo de tolva se determina según la expresión:

$$V = \frac{\pi}{24 \tan \theta} (D^3 - B^3) + \frac{\pi}{4} D^2 H.$$

Donde:

D: Diámetro de sección cilíndrica

B: Diámetro menor de parte cónica

θ : Ángulo de inclinación de la sección cónica

H: Altura de sección cilíndrica

Se inician los cálculos de dimensionamiento dándole un valor al ángulo de inclinación θ tomando en cuenta el coeficiente de fricción estático entre los granos de cacao húmedos y la superficie de metal de la tolva. En el caso de granos de café lavados, se toma el valor dado por Oliveros-Tascon (1985), donde el coeficiente medio de fricción del grano al contacto con el metal es $\mu = 0.67$.

Con dicho valor el ángulo θ se estima obedeciendo la relación:

$$90^\circ - \theta > \cos^{-1}(\mu) = 47^\circ$$

Por lo tanto, se opta por $\theta = 30^\circ$.

Adicionalmente, se conoce el diámetro más pequeño ($B = 126 \text{ mm}$) de la parte cónica siguiendo el diámetro menor al extremo frontal de la cámara rotatoria previamente determinado.

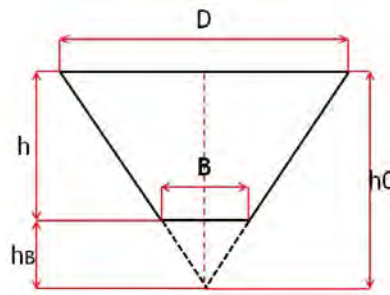


Figura 46: Geometría de la sección cónica

Nota: Adaptado de “Diseño mecánico de tolvas industriales” por Paredes, 2017

Las dimensiones características de esta sección se calculan mediante las expresiones:

$$h_0 = \frac{D}{2 \tan \theta},$$

$$h_B = \frac{B}{2 \tan \theta},$$

De esta manera:

$$h_B = \frac{126}{2 \tan (30^\circ)} = 109,1 \text{ mm.}$$

Para obtener el valor del diámetro mayor D, se realizar un par de iteraciones con el valor de la altura de la parte cónica para así obtener un diámetro que facilite su fabricación.

Tabla 27

Dimensionamiento de sección cónica de tolva

h	h_0	D
100	209,1	241,4
120	229,1	264,5
140	249,1	287,6
150	259,1	299,2
160	269,1	310,7

Se obtiene así B=126 mm, h=150 mm y D= 300 mm.

Para el cálculo del volumen, se desea que el llenado a la capacidad de 60 kg de la cámara de secado se haga en un mínimo de 3 acciones de carga, para así evitar que el operario tenga que cargar más de 20 kg a la vez. Por ello, para obtener la altura H de la sección cilíndrica de la tolva se sigue la ecuación:

$$V = \frac{\pi}{24 \tan 30^\circ} (0,30^3 - 0,126^3) + \frac{\pi}{4} 0,30^2 H = \frac{20}{\rho_{\text{cacao}}},$$

$$H = \frac{\frac{20 \text{ kg}}{775 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 5,7 \times 10^{-3}}{0,04524} = 28 \text{ cm.}$$

El siguiente paso en el diseño de la tolva involucra el cálculo de los esfuerzos sobre la tolva. Ravenet (1975) cita la fórmula desarrollada por Janssen para el cálculo de la presión que ejerce determinado sólido sobre una tolva de carga.

$$P = \frac{D \rho g}{4 \mu K} \left(1 - e^{\left(\frac{4 \mu K (h-H)}{D} \right)} \right),$$

Donde:

ρ : Densidad del cacao

μ : Coeficiente de rozamiento entre cacao y acero,

K : Relación entre la fuerza de compresión horizontal y la vertical,

h : Altura de sección cónica

Para el caso de la presión máxima se cuenta con la expresión simplificada a continuación.

$$P_{\text{max}} = \frac{D \rho g}{4 \mu K}.$$

El valor de la relación entre la relación de fuerza de compresión horizontal y vertical K se obtiene del máximo entre las siguientes expresiones:

$$K = \max \left\{ 0,4; \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}; \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta} \right\},$$

donde:

δ : Ángulo efectivo de fricción interna; 45° para el grano de cacao

$$K = 0,4$$

La presión máxima sobre la tolva resulta:

$$P_{\text{max}} = \frac{0,3(775)9,8}{4(0,67)0,4} = 2,125 \text{ KPa.}$$

El material de la plancha a partir de la cual es elaborada la tolva será acero inoxidable 304 ($\sigma_F = 235 \text{ MPa}$). Con dicho dato y asumiendo un factor de seguridad $FS = 2$, la expresión para calcular el espesor de la plancha es:

$$t > \frac{P_{\text{max}} D FS}{\sigma_F} = 0,03 \text{ mm}$$

Para la elaboración de demás piezas con solicitaciones de esfuerzo menor a las de la cámara de secado se empleará una plancha de acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de

espesor. Esta misma será utilizada para la elaboración de la tolva para así aprovechar la mayor cantidad de material.

6.8 Lista de planos

Los planos de ensamble y despiece respectivos para los componentes mecánicos se encuentran en el anexo y son listado en la tabla 28.

Tabla 28

Lista de planos

Descripción	Denominación de lámina
Secadora de granos de cacao	A2-L1
Estructura de soporte	A2-L2
Tolva cónica	A2-L3
Cámara de secado	A2-L4
Plancha base	L1-01
Soporte de ventilador	L1-02
Soporte de calentador	L1-03
Ducto trapezoidal	L1-04
Ducto metálico curvo	L1-05
Ducto metálico rectangular	L1-06
Placa de soporte	L1-07
Soporte de actuador	L1-08
Placa para ruedas	L2-01
Perfil soporte 840x40x50 mm	L2-02
Perfil 1590x40x50 mm	L2-03
Placa de articulación	L3-01
Perfil 435x50x40 mm	L3-02
Tapa de tolva	L3-03
Conducto curvo	L3-04
Tolva cónica	L3-05
Carcasa de cámara	L4-01
Tambor rotatorio	L4-02
Levantador de granos	L4-03
Cruceta del tambor	L4-04
Eje de transmisión	L4-05
Bastidor de soporte	L4-06
Tapa trasera	L4-07
Tapa trasera de tambor	L4-08

7. Diseño del sistema de generación de aire caliente

7.1 Características climáticas del entorno de operación

La secadora de granos propuesta está pensada para operar en las principales regiones cacaoteras del Perú. A efecto de obedecer a esta premisa, se toman las condiciones climáticas de la localidad de Bagua, ubicada en la región Amazonas a 420 m.s.n.m. Según el mapa climático del Perú elaborado por el SENAMHI (2020), Bagua cuenta con un clima muy lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año. La temperatura máxima en la etapa más calurosa del año oscila entre 30 °C y 36 °C y la mínima en la etapa más templada entre 17 °C y 21 °C. Se tomará en cuenta una temperatura promedio de 27 °C y una humedad relativa del aire del 90%. Estos datos son útiles para poder dimensionar los conductos de aire y la selección de los componentes del sistema en cuestión.

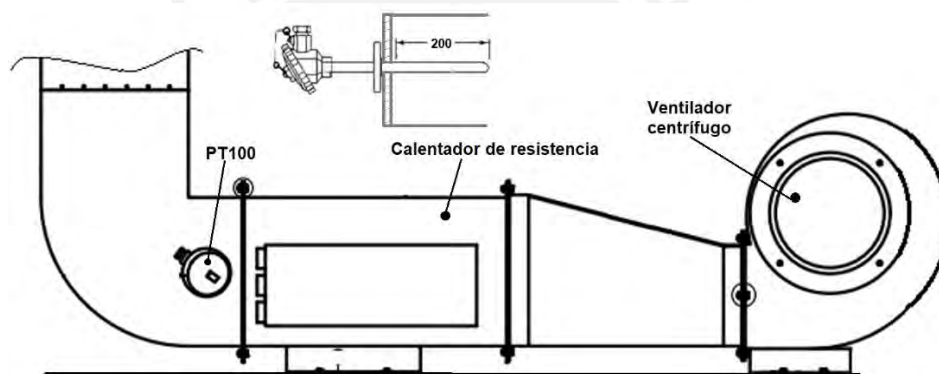


Figura 47: Sistema de generación de aire caliente

Nota: Elaboración propia

7.2 Parámetros de secado

Las variables definidas a continuación son las empleadas para los cálculos de dimensionado del sistema de generación de aire caliente.

- **Parámetros del aire de secado**

Humedad relativa (ϕ)

Es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido en el aire y la cantidad máxima que puede contener a determinada temperatura y presión. Se formula mediante el cociente entre la presión del vapor de agua y la presión de saturación a la temperatura de la mezcla.

$$\phi = \frac{P_v}{P_s}$$

Donde:

P_v : Presión del vapor de agua en la mezcla [atm]

P_s : Presión de saturación del agua a la temperatura de la mezcla [atm]

Humedad absoluta (X)

Es la relación entre la masa de vapor de agua m_v contenida en la mezcla y la masa de gas seco m_g .

$$X = \frac{m_v}{m_g}.$$

Donde:

m_v : Masa de vapor de agua en la mezcla [kg]

m_g : Masa de gas seco en la mezcla [kg]

Temperatura de bulbo húmedo (TBH)

Es la temperatura marcada por un termómetro que cuenta con una tela humedecida en su bulbo medidor mientras atraviesa por él una corriente de aire. Usando una carta psicrométrica, permite conocer la humedad relativa del aire.

Temperatura de bulbo seco (TBS)

Es la temperatura marcada por un termómetro con su bulbo medidor expuesto directamente a una corriente de aire.

- **Flujo de aire dentro de la cámara de secado**

Es la velocidad de la masa de aire que atraviesa una determinada área.

$$G = \rho_a 3600 v_a.$$

Donde:

G : Flujo de aire de secado [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$]

ρ_a : Densidad del aire; $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

v_a : Velocidad del aire [m/s]

- **Coefficiente de convección entre el aire y el grano**

Se considera en este caso el coeficiente de convección cuando el flujo de aire es perpendicular a la superficie del sólido húmedo. Treybal (1980) da la expresión:

$$h_c = 4,2G^{0,37}.$$

Donde:

h_c : Coeficiente de convección entre el aire y el grano [$\text{KJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$]

- **Parámetros del grano húmedo de cacao**

Contenido de humedad en base húmeda (X_h)

Es la relación entre la masa de agua y la masa total del sólido húmedo. Es el parámetro más empleado para cuantificar la humedad de un sólido, a diferencia del contenido de humedad en base seca.

$$X_h = \frac{m_a}{m_s + m_a}.$$

Donde:

m_a : masa de agua en el sólido húmedo

m_s : masa seca del sólido húmedo

Humedad de equilibrio (X_e)

Es la humedad a la cual la presión del agua al interior de un sólido húmedo es igual a la presión del aire alrededor de dicho sólido. Cuando se alcanza este nivel de humedad, la transferencia de agua del interior del grano al ambiente exterior se detiene. La ecuación presentada a continuación corresponde a la propuesta por Trejos (1986) para el café pergamino, un fruto perteneciente a la misma familia del cacao. Es válida para temperaturas de aire entre 10 a 56 °C.

$$X_e = (P_1 H_r + P_2 H_r^2 + P_3 H_r^3) e^{(Q_1 H_r + Q_2 H_r^2 + Q_3 H_r^3) T}.$$

Donde:

H_r : Humedad relativa del aire

T: Temperatura del aire caliente [°C]

$P_1 = 61,030848$, $P_2 = -108,37141$, $P_3 = 74,461059$

$Q_1 = -0,037049$, $Q_2 = 0,070114$, $Q_3 = -0,035177$

Humedad crítica (X_c)

Es el contenido de humedad que al ser alcanzado se inicia el periodo de velocidad decreciente del proceso de secado.

Calor latente para vaporización del agua contenida en el grano de cacao (H_{fg})

Es la energía necesaria para realizar el cambio de fase de líquido a vapor del agua contenida en el sólido húmedo. Se emplea la ecuación propuesta por Trejos (1986) para el café pergamino.

$$H_{fg} = (2502,4 - 2,42958T)(1 + 1,44408e^{-21,5011X_i}).$$

Donde:

H_{fg} : Calor latente de vaporización [KJ/kg]

T: Temperatura de la superficie del grano [°C]

X_i : Contenido de humedad inicial del grano

Temperatura del producto durante el secado (T_s)

Se determina haciendo uso de la carta psicrométrica. Dependerá de la temperatura y humedad del aire del ambiente y de la temperatura del aire a la entrada del tambor giratorio.

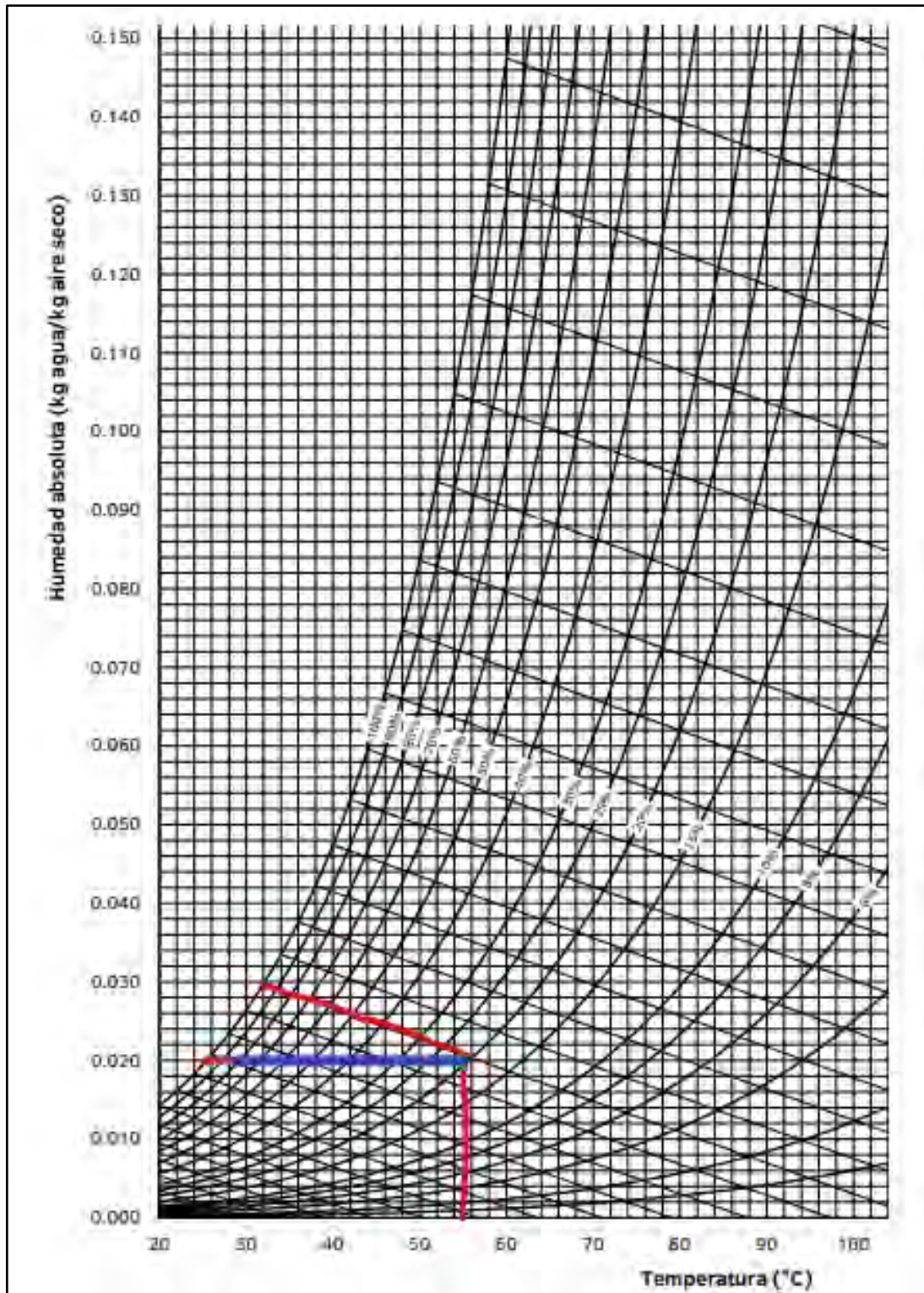


Figura 48: Carta psicrométrica de aire y agua a altas temperaturas
Tomado de "Esquemas y mapas conceptuales de Procesos Hidrológicos", por Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 2019

Para un calentamiento del aire de 27°C con 90% de humedad hasta 55°C y 20% de humedad relativa se obtiene que la temperatura de la superficie del cacao es igual a 31°C (TBH a las condiciones del aire dentro de la cámara).

7.3 Cinética del proceso de secado

Según Treybal (1980), en el proceso de transferencia de masa del secado de ciertos sólidos húmedos se pueden identificar dos periodos, uno a velocidad constante y otro a velocidad decreciente, visibles en la figura 49:

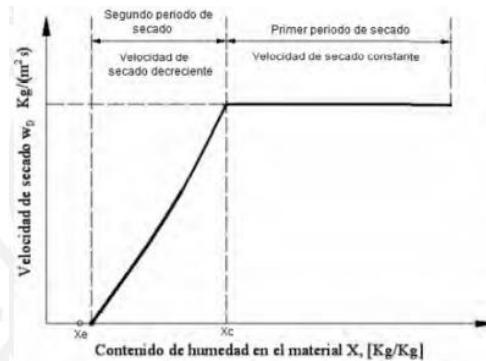


Figura 49: Contenido de humedad versus velocidad de secado

Tomado de "Operaciones de transferencia de masa", por Treybal, pp. 725-733., 1980

- **Velocidad de pérdida de humedad en el periodo de velocidad constante**

En este periodo la masa interna de agua en el grano se traslada hacia su superficie y el secado se lleva a cabo por la evaporación del agua sobre dicha superficie. La velocidad de extracción de agua, medida en $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$, se calcula según la expresión:

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

donde:

T_a : Temperatura del aire caliente de secado [°C]

T_s : Temperatura de la superficie del grano [°C]

- **Tiempo del proceso de secado durante el periodo de velocidad constante**

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

$$t_c = \frac{m_c(X_i - X_c)}{A_s R_c}$$

Donde:

m_c : Masa seca de cacao [kg]

A_s : Área de secado [m^2]

X_c : Humedad crítica a la temperatura de secado

- **Velocidad de pérdida de humedad en el periodo de velocidad decreciente**

Este periodo inicia cuando la humedad del producto en base húmeda es menor o igual a la humedad crítica. La velocidad de secado se evalúa por medio del proceso de transporte de la humedad desde el interior del sólido hacia su superficie y ya no se incluye la evaporación del agua en la superficie pues ya ha cambiado de fase. Según Treybal (1980), se calcula mediante la ecuación:

$$R_d \geq \frac{R_c}{\ln\left(\frac{X_c - X_e}{X_f - X_e}\right)}$$

Donde:

X_f : Humedad final del grano

X_e : Humedad de equilibrio

- **Tiempo del proceso de secado durante el periodo de velocidad constante**

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

$$t_d = \frac{m_c(X_c - X_e)}{A_s R_d}$$

7.4 Dimensionamiento y selección del ventilador centrífugo

- **Cálculo del tiempo de secado**

Usando los conceptos previos, se hace uso de las ecuaciones presentadas para obtener los datos del tiempo total de secado y velocidad del flujo de aire de secado.

Tabla 21

Datos conocidos de aire y grano de cacao

Humedad relativa del aire caliente	Ts (°C)	Ta(°C)	Hfg (kJ/kg)	Ms (kg)	Xc	Xe	Xi	Xf	As(m ²)
0,20	32	55	2424,6545	18	0,31	0,0647	0,7	0,09	3,3

Tabla 30

Velocidad del aire y tiempo de secado

v_a (m/s)	G (kg/m ² h)	hc (kJ/m ² h°C)	Rc (kg/m ² h)	tc (h)	td (h)	Ttotal(h)
0,4	1728	66,243	0,6284	3,39	4,84	8,22
0,5	2160	71,944	0,6825	3,12	4,45	7,57
0,6	2592	76,965	0,7301	2,91	4,16	7,08
0,8	3456	85,609	0,8121	2,62	3,74	6,36
1	4320	92,978	0,8820	2,41	3,45	5,86
1,2	5184	99,466	0,9435	2,25	3,22	5,48
1,5	6480	108,027	1,0247	2,08	2,97	5,04
2	8640	120,160	1,1398	1,87	2,67	4,53

Se escoge la velocidad de 2 m/s para el aire de secado. De esta manera, se evita el fenómeno de aplastamiento de grano que sucede cuando se tiene velocidades altas del aire. Según lo calculado en la tabla, con el flujo de aire trasladándose a 0,2 m/s el tiempo total de secado sería de 4 horas con 32 minutos.

Cálculo del flujo de aire necesario

La masa de agua inicial es la de 60 kg de cacao con una humedad a base húmeda de 70%. Por lo tanto:

$$M_{ai} = 60 * 0.7 = 42 \text{ kg.}$$

Lo cual significa que la masa de material seco es:

$$M_{ms} = 60 - 42 = 18 \text{ kg.}$$

El contenido final de agua se determina según la expresión:

$$M_{af} = \frac{X_f M_{ms}}{1 - X_f} = 1,78 \text{ kg.}$$

Esto implica que la masa de agua retirada es igual a:

$$M_{ar} = M_{ai} - M_{af} = 40,22 \text{ kg.}$$

Conocido este valor, se consideran la humedad absoluta al inicio y al final del proceso de secado. Si el aire inicialmente se encuentra a 27°C y humedad del 90% entonces la humedad absoluta w_1 según la carta psicrométrica es 0,0206. El aire sale del proceso completamente saturado a 32°C lo cual resulta en una humedad absoluta $w_2 = 0,03$.

Estos datos permiten conocer el flujo másico que considera adicionalmente el tiempo de secado determinado en la sección previa.

$$\dot{m}_a = \frac{M_{ar}}{T_{total}(w_2 - w_1)} = \frac{40,22}{4,53 * (0,03 - 0,0206)} = 944,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

El volumen específico del aire, considerado como gas ideal, se calcula con la siguiente expresión:

$$v_a = \frac{R T_{ia}(1 + 1,608w_1)}{P_a},$$

donde:

T_{ia} : Temperatura inicial del aire, 300 K

P_a : Presión atmosférica, 101325 Pa

R: Constante del aire, 287 J/kgK

$$v_a = \frac{287 * 300(1 + 1,608 * 0,0206)}{101325} = 0,8779 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}.$$

Finalmente, el caudal de aire necesario para el proceso de secado es:

$$Q_a = v_a \dot{m}_a,$$

$$Q_a = 0,8779 * 944,5 = 829,2 \frac{m^3}{h}.$$

Una vez conocido el valor del caudal, se debe calcular la pérdida de presión a lo largo del trayecto por el que circula el aire caliente; esto tramo abarca desde la entrada de aire por el ventilador hasta la salida del aire saturado hacia el exterior de la cámara de secado. En el trabajo “Ventiladores para secadores de café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos” elaborado por Gutierrez et al. (2012), el autor cuantifica las pérdidas de presión en el sistema utilizando la expresión:

$$\Delta p_t = 1,15(\Delta p_e + \Delta p_m + \Delta p_{cr} + \Delta p_p + \Delta p_c).$$

Donde:

Δp_t : Caída total de presión

Δp_e : Caída de presión en la entrada del ducto metálico

Δp_m : Caída de presión en el ducto

Δp_{cr} : Caída de presión en el calentador de resistencia eléctricas

Δp_p : Caída de presión en la plancha perforada

Δp_c : Caída de presión a través de la cama de granos de cacao

Para calcular Δp_e se emplea la siguiente fórmula planteada por Mataix (1982) para máquinas hidráulicas:

$$\Delta p_e = \rho_a \alpha \left(1 + \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v^2}{2},$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aire; 1,14 kg/m³

α : coeficiente de corrección por ángulo de inclinación, (0,27 @ 15°)

A_1 : Área de ingreso del aire; 0,043 m²

A_2 : Área de salida del aire; 0,05 m²

v : Velocidad de entrada del aire; 5,5 m/s

$$\Delta p_e = 1,14 * 0,27 * \left(1 - \frac{0,043}{0,05}\right)^2 * \frac{5,5^2}{2} = 1,76 Pa = 0,18 mmca.$$

Para el cálculo de Δp_m se considera la pérdida de presión por la sección curva del conducto metálico de sección rectangular. El diferencial de presión en esta sección obedece la relación:

$$\Delta p_m = k \frac{9,8 v^2}{16,35},$$

donde:

k : constante de perdidas en sección rectangular, según figura

v_a : Velocidad promedio del aire, 2 m/s

R/D	Relación de tamaños W/D					
	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
0,0 (a escuadra)	1,50	1,32	1,15	1,04	0,92	0,86
0,5	1,36	1,21	1,05	0,95	0,84	0,79
1,0	0,45	0,28	0,21	0,21	0,20	0,19
1,5	0,28	0,18	0,13	0,13	0,12	0,12
2,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10
3,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10

Figura 49: Coeficiente de codos de sección cuadrada y rectangular

Tomado de <https://slideplayer.es/slide/4354532/>, por Molina, M., 2015

Según medidas estimadas de los ductos para ventiladores se sabe que $W = 230$ mm, $D = 215$ mm. Se escoge una relación $R/D = 1$ para reducir la pérdida de presión.

$$\Delta p_m = 0,21 * \frac{2^2}{16,35} * 9,8 = 0,503 Pa = 0,0513 mmca,$$

Para calcular Δp_c se emplea la ecuación de Ergun para caídas de presión en lechos empacados:

$$\frac{\Delta p_c}{L} = \frac{150 \mu v_l (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \phi_s^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75 \rho_a v_l^2 (1 - \varepsilon)}{D_p \phi_s \varepsilon^3}$$

Donde:

μ : Viscosidad del aire a 55°C; $1,963 \times 10^{-5}$ kg/ms

v_l : Velocidad del aire a través del lecho; 0,84 m/s

D_p : Diámetro del grano de cacao; 0,667 cm (Fierro, 1990)

ϕ_s : Esfericidad del grano de cacao; 0,391 (Fierro, 1990)

ε : $\left(\frac{V_{Lecho} - V_{ocupad}}{V_{Lecho}}\right)$ Fracción de vacíos del lecho; 0,85

L: Altura del lecho; 0,15 m

$$\Delta p_c = 0,1 \left(\frac{150 * 19,63 * 10^{-5} * 0,84}{0,00667^2 * 0,391^2} * \frac{(1 - 0,85)^2}{0,85^3} + \frac{1,75 * 1,14 * 0,84^2}{0,00667 * 0,391} * \frac{(1 - 0,85)}{0,85^3} \right),$$

$$\Delta p_c = 26,1 Pa = 2,66 mmca.$$

La caída de presión a través de la plancha perforada se puede tomar como el 10% de la caída en la cama de cacao según Costales (1995):

$$\Delta p_p = 0,3 \text{ mmca.}$$

Se sabe de Gutierrez et al. (2012) que la pérdida de presión promedio en intercambiadores de calor es de 18.133 mmca para caudales de 100 m³/min y que las pérdidas de presión en dichos intercambiadores tienen un comportamiento aproximadamente lineal. Por lo cual se puede calcular Δp_{cr} para el caudal de 13,82 m³/min utilizado por la secadora:

$$\Delta p_{cr} = 18.133 \text{ mmca} * \frac{13,82}{100} = 2,51 \text{ mmca.}$$

La caída de presión total Δp_t es igual a la suma de todas las caídas calculadas:

$$\Delta p_{cr} = 5,71 \text{ mmca.}$$

Considerando la magnitud de Δp_{cr} y el caudal $Q_a = 829,2 \frac{m^3}{h}$ se busca un ventilador comercial que tenga dicho punto de operación en su curva característica.

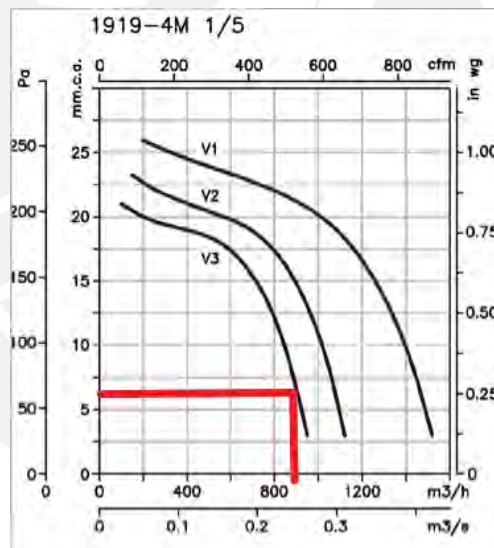



Figura 51: Curvas de funcionamiento de ventiladores

Adaptado de *Catálogo General-Ventiladores y extractores industriales*, pp. 106-110, por Sodeca

Las especificaciones técnicas del ventilador CBD-1919-4M 1/5 son las mostradas en la tabla 31.

Tabla 31

Características de ventilador centrífugo seleccionado

Característica	Valor
Modelo	Modelo CBD-1919-4M 1/5
Imagen	 <p>CBX</p>
Velocidad máxima (RPM)	1476
Equivalencia pulgadas	7/7
Corriente máxima @ 220V (A)	1,75
Potencia Instalada (kW)	0,15
Caudal máximo (m^3/h)	1520
Nivel sonoro dB(A)	59
Peso aprox. (kg)	7

Datos tomados de Catálogo General, pp. 106-110, por Sodeca

7.5 Diseño del ducto para conducción del aire caliente

• Selección del material aislante térmico

Con el efecto de disminuir las pérdidas de energía térmica en el sistema se debe escoger una lámina de material aislante que recubra las paredes tanto del conducto como de la carcasa de la secadora. Se analizan las siguientes opciones de la tabla 32.

Tabla 32

Materiales aislantes evaluados

Características	Lana de vidrio	Lana de roca	Corcho expandido	Poliuretano proyectado
Imagen				
Espesor	50 mm	30 mm	25 mm	50 mm
Tamaño	1,24 m x 24 m	1 m x 8 m	1 m x 0,5 m	0,305 m x 0,305 m
Coefficiente de conducción térmica	0,06 W/Km	0,04 W W/Km	0,035 W/Km	0,028 W/Km
Precio	++	+++	+++	+

Tomando en consideración la conducción térmica, la rigidez y el precio de las opciones, se opta por la lana de roca. Además, con esta opción se cuenta con un menor riesgo de desprendimiento de partículas que pueden afectar la calidad de los granos.

7.6 Selección del calentador de resistencias

Para la elección del calentador, en esta sección se determinan las solicitaciones del sistema de calentamiento realizando el cálculo de la cantidad de fluido a transportar por el ducto y el grado de aislamiento del mismo.

• Diseño térmico para el calentador de resistencias térmicas

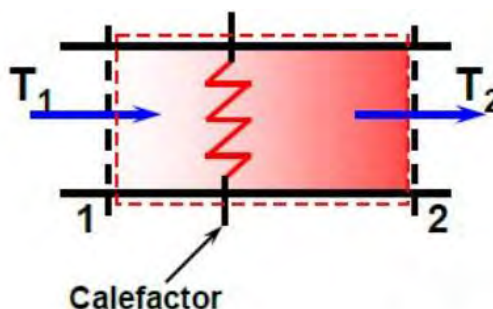


Figura 52: Proceso de calentamiento con resistencias

Tomado de "Sesión 14: Psicrometría", por López, J., PUCP, 2019.

En el proceso psicrométrico descrito en la figura anterior, la energía eléctrica que circula por las resistencias idealmente se disipa completamente a modo de energía calorífica que es transferida hacia el flujo de aire que las cruza transversalmente. Esto genera que la entalpía del fluido aumente. El flujo de energía necesario para elevar la temperatura de determinada corriente de aire con un calentador de resistencias eléctricas será directamente proporcional al flujo másico de dicho fluido y a su cambio en entalpía. Dicho principio es formulado en la expresión a continuación.

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1).$$

La relación que guarda la temperatura y humedad absoluta del aire es:

$$h = 1,005 * T + w(1,88 * T + 2501).$$

Las entalpías respectivas en la etapa inicial y final del proceso de secado son:

$$h_1 = 78,17 \frac{KJ}{Kg} \text{ (a } 27^\circ C),$$

$$h_2 = 107,36 \frac{KJ}{Kg} \text{ (a } 55^\circ C).$$

Por lo tanto, conociendo el flujo másico de aire necesario para el proceso calculado previamente, la potencia necesaria en las resistencias para elevar la temperatura del aire ambiental hasta los 55°C es:

$$\dot{Q} = 0,2622 \frac{Kg}{s} * \left(107,36 \frac{KJ}{Kg} - 78,2 \frac{KJ}{Kg} \right) = 7,63 \text{ kW}$$

- **Análisis de pérdidas de calor en el ducto metálico**

La energía calorífica que porta el flujo de aire caliente de la secadora tiene como principal propósito la reducción del contenido de agua en los granos húmedos. Sin embargo, cierta cantidad de este calor se pierde al ambiente exterior por medio de las paredes de la secadora. Para contrarrestar dicho efecto y reducir la pérdida de energía en el sistema de secado, resulta necesario la inclusión de una capa de material aislante térmico. Así mismo, el recubrimiento de las paredes con dicho material permite reducir el riesgo de accidentes por quemaduras de los operarios que entren en contacto con las superficies calientes de la secadora.

La magnitud de estas pérdidas se puede obtener mediante el modelamiento del sistema de conducción del aire como un arreglo de resistencias opuestas a la transferencia de calor. Por un lado, el calor se transfiere al ambiente por medio del flujo de aire al interior del ducto, denominada convección interior; por otro lado, a través del

aislante en las paredes del ducto. Por último, se considera la transferencia por convección externa que se debe al flujo natural de aire en los alrededores de la secadora. La transferencia de calor descrita se ilustra en la figura 53.

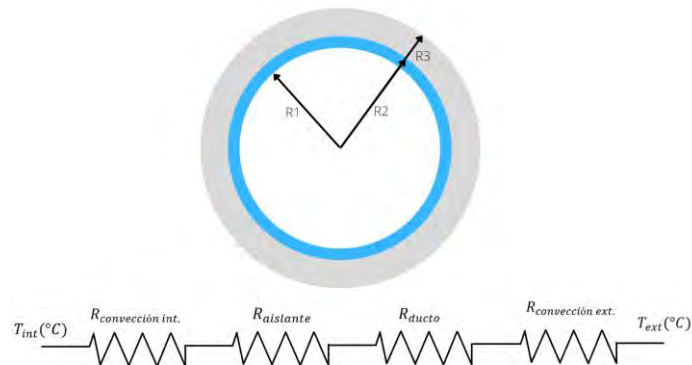


Figura 53: Resistencias térmicas del ducto metálico

Nota: Elaboración propia

La resistencia a la conducción por medio del aislante se puede determinar mediante la fórmula:

$$R_{aislante} = \frac{e_a}{k_a A_{aislante}},$$

donde:

e_a : espesor del aislante;

k_a : coeficiente de conducción del aislante;

$A_{aislante}$: Área de la superficie del aislante;

$$R_{aislante} = \frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,04 \cdot (0,22 \cdot 2 + 0,478 \cdot 2) \cdot 0,51} = 1,053 \text{ K/W.}$$

De modo similar, la resistencia a la conducción a través de las paredes metálicas obedece a la expresión:

$$R_{ducto} = \frac{e_d}{k_d A_{ducto}},$$

donde:

e_d : espesor de las paredes del ducto;

k_d : coeficiente de conducción de las paredes del ducto;

A_{ducto} : Área de la superficie del ducto;

$$R_{ducto} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{50,2 \cdot (0,22 \cdot 2 + 0,478 \cdot 2) \cdot 0,51} = 8,42 \cdot 10^{-5} \text{ K/W.}$$

La resistencia a la convección al interior y exterior del ducto se conocen a partir de la expresión:

$$R_{convección} = \frac{1}{h A},$$

donde:

h : coeficiente de convección.

A : Área de la superficie en contacto con el aire.

Para ambos casos de convección se debe determinar su coeficiente convectivo h característico.

Se sabe para el caso de convección interna que el aire que fluye por el ducto de sección cuadrada está a 55°C. Para los cálculos en adelante se calcula el diámetro hidráulico equivalente del ducto que se obtiene mediante la fórmula:

$$d_h = \frac{4 A_{ducto}}{\text{Perímetro}_{ducto}},$$

$$d_h = \frac{4 * (0,22 * 0,478)}{0,22 * 2 + 0,478 * 2} = 0,301 \text{ m.}$$

Las propiedades físicas del aire a 55°C para calcular el tipo de flujo que se produce al interior del ducto se obtienen de los datos provistos por Çenyel & Boles (2015):

ρ_{ac} : densidad del aire caliente; $1,076 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

k : Conductividad del aire; $0,0277 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$.

Pr : Número de Prandtl; 0,7215.

μ : Viscosidad dinámica; $2,560 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$.

Previamente se determinó que la velocidad del aire caliente del proceso v_a debe ser 2 m/s. De esta manera, el número de Reynolds para el flujo resulta de la ecuación:

$$Re = \frac{\rho_{ac} v_a d_h}{\mu},$$

$$Re = 1,076 * 2 * 0,301 / 2,560 \times 10^{-5} = 25\,302,8.$$

Por lo tanto, se sabe que se cuenta con un flujo turbulento al interior del ducto para la transferencia de calor por convección forzada. El número de Nusselt debe ser calculado siguiendo la expresión que corresponde al régimen turbulento, propuesta por Dittus & Boelter:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4},$$

$$Nu = 0,023 * 25\,302,8^{0,8} * 0,7215^{0,4} = 67,23.$$

Para calcular el coeficiente convectivo al interior se cuenta con la relación adicional que involucra al número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_{int} d_h}{k},$$

$$h_{int} = \frac{67,23 * 0,0277}{0,301} = 6,20 \frac{W}{m^2 K}.$$

El coeficiente convectivo para el exterior del ducto se conoce a partir de una estimación de la velocidad del aire en el ambiente. Para la convección natural, la expresión que correlaciona el número de Nusselt con el resto de los grupos adimensionales, el número de Grashof y de Prandtl, puede ser de la forma:

$$Nu = C(Gr Pr)^n.$$

El número de Grashof se calcula según la expresión (Barrantes, s.f.):

$$Gr = \frac{\rho^2 * L^3 * g * k * (T_{sup} - T_{amb})}{\mu^2},$$

donde:

g : aceleración de la gravedad; $9,8 \text{ kg/m}^2$.

T_{sup} : Temperatura de la superficie exterior del ducto; $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

T_{amb} : Temperatura del ambiente: 25°C

$$Gr = 981\,242\,024,3,$$

de esta manera resulta:

$$Gr Pr = 717\,189\,795,6.$$

Los valores de C y n para $Gr*Pr$ entre 10^7 y 10^{12} son $0,125$ y $0,333$ respectivamente:

$$Nu = 104,5.$$

Se obtiene que el coeficiente de convección natural para el exterior es $h = 8,73 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Por lo tanto, se puede hacer el cálculo de las resistencias térmicas a la convección y resulta:

$$R_{convección \text{ int.}} = \frac{1}{6,2 * 0,711} = 0,226 \text{ K/W},$$

$$R_{convección \text{ ext.}} = \frac{1}{8,73 * 0,711} = 0,161 \text{ K/W}.$$

Entonces:

$$\Sigma R = R_{convección \text{ int.}} + R_{convección \text{ ext.}} + R_{aislante} + R_{ducto} = 1,4401 \text{ K/W}$$

Y con ello se determina el flujo de calor perdido:

$$\dot{Q}_{perdido} = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{(55^\circ - 25^\circ)}{1,44} = 20,83 \text{ W}.$$




Una vez calculado el flujo calorífico necesario para el proceso de secado se obtiene:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{calentamiento} + \dot{Q}_{perdido} = 7,63 \text{ kW} + 20,83 \text{ W} = 7,65 \text{ kW}$$

Se procede a evaluar las distintas soluciones ofrecidas por los fabricantes de calentadores eléctricos para ductos de ventilación en la tabla 33.

Tabla 33

Calentadores eléctricos evaluados

Característica	Watlow	Wattco	Vulcanic
Imagen			
Tipo de resistencia	Lisas	Aleteada	Aleteada
Potencia Máxima	9 kW	10 kW	11,25 kW
Dimensiones (mm)	267x191x514	305x163x356	220x365x420
Peso	25 kg	11 kg	11 kg



La opción de Watlow se descarta por tener un peso y dimensiones mucho mayores a las del resto de fabricantes; un ducto que se adapta a las dimensiones de este modelo resulta en un costo mayor en materiales para el ducto. Por último, la solución ofrecida por Wattco requería de un ducto rectangular bastante alto (30,5 cm), lo cual interviene con la cámara de secado al momento de realizar la descarga de granos, pues el ducto está localizado en la parte inferior de la secadora. En conclusión, se opta por el calentador de resistencias eléctricas aleteadas Vulcanic de 11,25 kW y 11 kg de peso para la secadora.

7.7 Selección del sensor de temperatura

Este sensor se coloca tras la salida del aire del calentador de resistencias mediante una brida instalada en el ducto metálico. Al establecer un lazo cerrado de control con el sensor de temperatura es posible entregar la cantidad de potencia necesaria para el calentador eléctrico. De esta manera, se mantiene la temperatura del aire caliente a 55°C para no dañar la integridad y sabor del grano de cacao. Los sensores analizados a continuación son la instrumentación común para ductos metálicos por su robustez, facilidad de instalación y precisión. En la siguiente tabla 34 se presentan sus especificaciones técnicas.

Tabla 34

Sensores de temperatura evaluados

Características	Siemens TS200 (Termocupla Tipo J)	Krohne PT100 Optitemp TRA-F13
Imagen		
Tipo	Termopar Tipo J	Termorresistencia 2 hilos
Rango de medición	$-40^{\circ}\text{C} - +750^{\circ}\text{C} \pm 2.2^{\circ}\text{C}$	$-50^{\circ}\text{C} - +400^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$
Dimensiones	$\text{Ø}6 \times 250 \text{ mm}$	$\text{Ø}6 \times 305 \text{ mm}$
Tensión de alimentación	$V_{max} = 20 \text{ V}$	$V_{max} = 20 \text{ V}$
Transmisor de temperatura	Sí	Sí

La precisión de cada sensor diferencia principalmente las dos opciones. La primera, un termopar, trabaja en un rango de temperaturas de -40°C hasta los 333°C con una desviación de $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$; la termorresistencia Krohne tiene una precisión mayor de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$. Por ello, la última opción tiene un precio mayor. Para efectos de la función que cumple en la secadora, la precisión y rango de trabajo de la termocupla tipo J Siemens TS200 con termopozo satisface las necesidades del sistema de calentamiento de aire. Para la termocupla seleccionada, se tendrá un transmisor de temperatura compatible con la entrada analógica 0-10V del PLC.

El transmisor seleccionado es:

- Marca: Xiamen Maxwell
- Modelo: TT-513-V
- Montaje: Riel DIN
- Tensión de alimentación: 12-36 VDC
- Compatibilidad: Termocupla (K, S, R, B, N, E, J, T, WRe3/255, WRe5/26, WRe5/20)
- Salida Analógica: 0-10 V

8. Diseño del sistema de control de temperatura de aire de secado

Previamente, se estableció que el aire caliente de secado debe mantenerse a una temperatura de 55°C durante el secado de los granos de cacao. Así mismo, a esta temperatura se mantiene un determinado margen de seguridad que permite evitar que se dañe la calidad física y organoléptica de los granos.

El calentador de resistencias seleccionado en la sección previa es alimentado con una fuente monofásica de voltaje alterno. Debido a que la potencia máxima consumida por el calentador es 11,25 kW, se debe hacer uso de un circuito electrónico de potencia instalado entre la fuente monofásica y la carga eléctrica para regular la potencia total entregada al calentador.

En la presente sección se evalúan los elementos electrónicos que deben constituir el circuito de potencia del sistema de control de temperatura tomando en consideración las especificaciones técnicas del calentador eléctrico de resistencias y el controlador que requieren el sistema de secado diseñado.

8.1 Selección del controlador

Para la elección del controlador de la secadora se deben conocer integralmente las entradas y salidas empleadas por el sistema de secado en conjunto.

Para la elección del controlador de la secadora se deben conocer integralmente las entradas y salidas empleadas por el sistema de secado en conjunto. La tabla 35 lista los elementos de la secadora que deben conectarse al controlador.

Tabla 35

Señales de entrada y salida de la secadora


Elemento	Cantidad de elementos	Cantidad de señales por elemento	Tipo de Señal
Pulsadores	3	1	Entrada Digital
Selector de mando	1	2	Entrada Digital
Circuito de detección de cruce por cero	1	1	Entrada Digital
Indicadores Pilotos	3	1	Salida Digital
Actuador lineal	2	1	Salida Digital
Baliza de alarma	1	1	Salida Digital
Calentador de resistencias	1	1	Salida Digital
Termopar	1	1	Entrada analógica

Se requiere 1 entrada analógica, 6 entradas digitales y 7 salidas digitales. Con dichos requerimientos se opta por el PLC S7-1200 de Siemens, que igualmente ofrece

protección del sistema de control contra el ambiente de trabajo, robustez de funcionamiento y herramientas informáticas que facilitan el desarrollo del programa de control e integración con demás componentes. Las especificaciones del CPU se muestran en la tabla 36. Este controlador ofrece protección del sistema de control contra el ambiente de trabajo, robustez de funcionamiento y herramientas informáticas que facilitan el desarrollo del programa de control e integración con demás componentes.

Tabla 36

Especificaciones técnicas de PLC Siemens S7-1200

Características	Siemens PLC S7-1200
Imagen	
Tensión de alimentación	24 VDC
Modelo CPU	CPU 1214C-DC/DC/DC (6ES7214-1AG40-0XB0)
Entradas digitales	14 (Tipo 1 IEC Sumidero)-24VDC@4mA
Salidas digitales	10 (Salida Estado sólido MOSFET)- 24VDC@0.5A
E/S analógicas	2 Entradas (0-10V)
Puertos de comunicación	1 (Profinet)
Potencia	12 W

Datos tomados de "Controlador programable S7-1200. Manual del Sistema", por Siemens, 2014

Se escogió el PLC con salidas digitales tipo estado sólido MOSFET debido a la estrategia de control de temperatura del aire de secado que se implementará. La alimentación para el modelo de CPU con dichas salidas DC es necesariamente de corriente continua, según la oferta del fabricante. Por ello, se debe escoger una fuente de alimentación DC que cumpla con los requerimientos de potencia, filtrado y robustez exigidos para energizar un controlador como el escogido.

8.2 Diseño y simulación del sistema de control de temperatura

- Diseño del sistema de control de temperatura

El control de temperatura del aire caliente se realizará mediante el control de la potencia entregada al calentador de resistencias. Este objetivo se logra con el bloque de potencia, a la que corresponde la regulación de la salida PWM conectada al relé de

estado sólido que se interpone entre la fuente de energía y el terminal de alimentación del calentador. El circuito de control cuenta con una arquitectura mostrada en el diagrama de bloques de la figura 54 a continuación. La fuente de corriente alterna tiene de por medio al bloque de potencia entre sí y la carga que alimenta. Dicho bloque se encargará de entregar la potencia eléctrica al calentador según los parámetros que recibe del bloque de control, constituido por el PLC que recibe información de la temperatura del aire de secado.

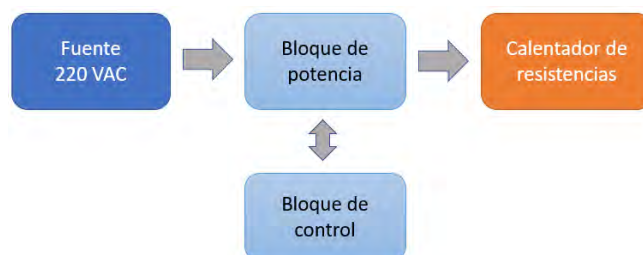


Figura 54: Diagrama de bloques del control

Nota: Elaboración propia

Con las mediciones de temperatura del sensor, el controlador determina el ciclo de trabajo apropiado de la salida digital del PLC con la finalidad así de mantener la temperatura ideal en el lazo de control. La figura 55 muestra el esquema del bloque de potencia sugerido para la solución de control.

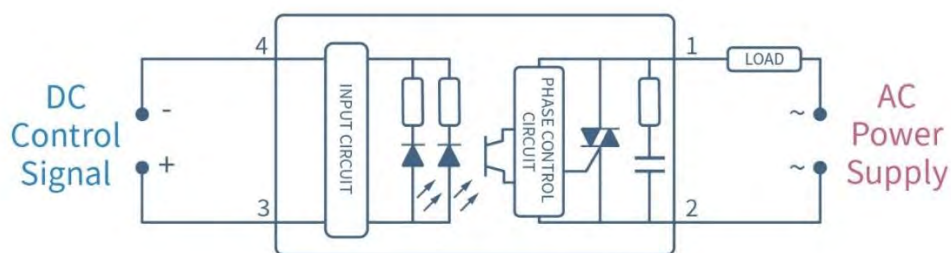


Figura 55: Esquema del bloque de potencia

Figura tomada de "An Introduction to the Solid-State Relay" por HUIMI Electronics (s.f.)

- **Selección del Relé de Estado Sólido**

Considerando las solicitaciones del calentador de resistencias que se calcularon en el capítulo previo, las características de la acometida eléctrica y del controlador, se elabora la tabla 37 a continuación para la selección del relé del estado sólido que alimenta el calentador.

Tabla 37

Consideraciones eléctricas para relé de estado sólido

Consideraciones electrónicas	Fuente monofásica	Calentador de resistencias	Relé de estado sólido G3PB-235B-VD
Voltaje	220 V @ 60 Hz	220 V	12-24 VDC (IN) / 220 VAC (OUT)
Corriente	-	24 A	35 A
Componentes	-	-	Capacidad Detección Cruce por Cero, montable riel DIN

- **Simulación del sistema de control de temperatura**

El modelo matemático del calentador eléctrico de resistencias es presentado en la literatura científica como un sistema dinámico de primer orden con una componente de retardo (sistema FOPDT), que se representa como:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1},$$

donde:

K : La ganancia del proceso en estado estable;

T : La constante de tiempo del proceso;

τ : El retardo temporal del proceso.

Diversos autores que emplean este modelo, como Chang et al (2009) o Zhang et al. (2014), dan distintos valores a estas constantes del proceso, como resultado del empleo de distintos calentadores y la aplicación de distintos métodos de reconocimiento del sistema. Para la simulación del calentador de este proyecto se inicia empleando el modelo de Duan (2010) que, en su trabajo para el diseño de un controlador predictivo PID-Difuso, emplea en su investigación un calentador eléctrico de 8 kW de alimentación monofásica, similar al empleado en el presente proyecto, y presentan el modelo del sistema con los siguientes valores para las constantes:

$$G(s) = \frac{T(s)}{\dot{Q}(s)} = \frac{2,8e^{-40s}}{178s + 1}.$$

Luego, como se ilustró en el diagrama de bloques de control de la figura 58, si se conoce la potencia \dot{Q} a suministrar para mantener la temperatura deseada, la computadora de la secadora deberá calcular de igual modo el ángulo de disparo para el respectivo valor de \dot{Q} . Se conoce por Flores (2020) la expresión que relaciona el voltaje

efectivo V_0 con el ángulo de disparo α_c de un controlador monofásico bidireccional con carga resistiva:

$$V_0 = V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha_c + \frac{\sin 2\alpha_c}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

La reorganización de los términos resulta:

$$2\pi \left(\frac{V_0}{V_s} \right)^2 - 2\pi + 2\alpha_c - \sin 2\alpha_c = 0.$$

Conociendo que la corriente eléctrica que alimenta el calentador es constante y la variación de la potencia entregada proviene de la variación del voltaje alterno, se obtiene la expresión:

$$2\pi \left(\frac{\dot{Q}}{P_t} \right)^2 - 2\pi + 2\alpha_c - \sin 2\alpha_c = 0,$$

donde:

P_t : Potencia máxima del calentador eléctrico; 11,25 kW.

Luego, como producto de la linealización de $l(\dot{Q}, \alpha) = 0$ alrededor de (\dot{Q}_o, α_o) , con $l(\dot{Q}_o, \alpha_o) = 0$, se obtiene la relación entre los dos parámetros a continuación:

$$\frac{\alpha_c}{\dot{Q}} = \frac{\Delta\alpha_c}{\Delta\dot{Q}} = \frac{2\pi\dot{Q}_o}{P_t^2(1 - \cos 2\alpha_o)},$$

donde:

\dot{Q}_o : Potencia de calentador en punto de equilibrio; 7,65 kW,

α_o : Ángulo de disparo en punto de equilibrio; $\frac{21\pi}{40} rad$.

De esta manera, tras simular el comportamiento del modelo del sistema, la planta resulta como se presenta en la figura 56.

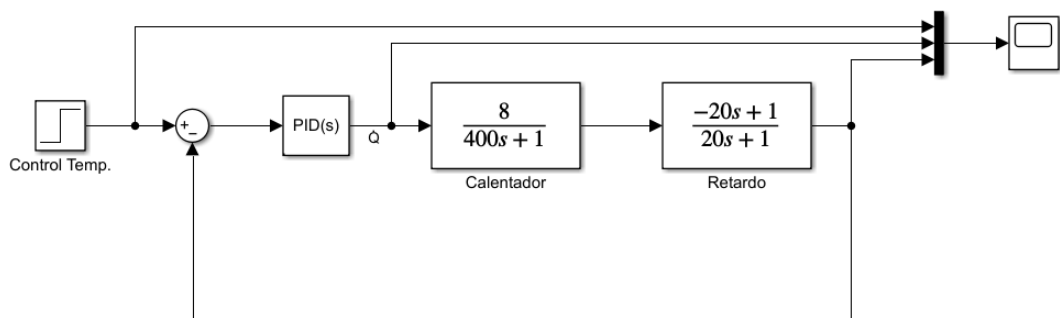


Figura 56: Modelo del sistema de calentamiento del aire de secado

Nota: Elaboración propia

Para la sintonización del controlador PI se realiza el análisis del diagrama de Bode del sistema en lazo abierto. Los requisitos de diseño para el controlador de la planta se centran en controlar el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento. Un bajo sobreimpulso evita la exposición de los granos a una temperatura muy elevada y el tiempo de establecimiento bajo significa que si la temperatura se eleva inicialmente por encima de la temperatura consigna, se reduce el tiempo de exposición a dicha temperatura no deseada. Los requerimientos considerados son:

M_p : Sobreimpulso; 10%,

e_{ss} : Error en estado estacionario: 1 %,

T_s : Tiempo de establecimiento; 500 s.

T_r : Tiempo de respuesta; 250 s.

Los resultados de la sintonización del controlador PI se muestran en la figura 57 a continuación.

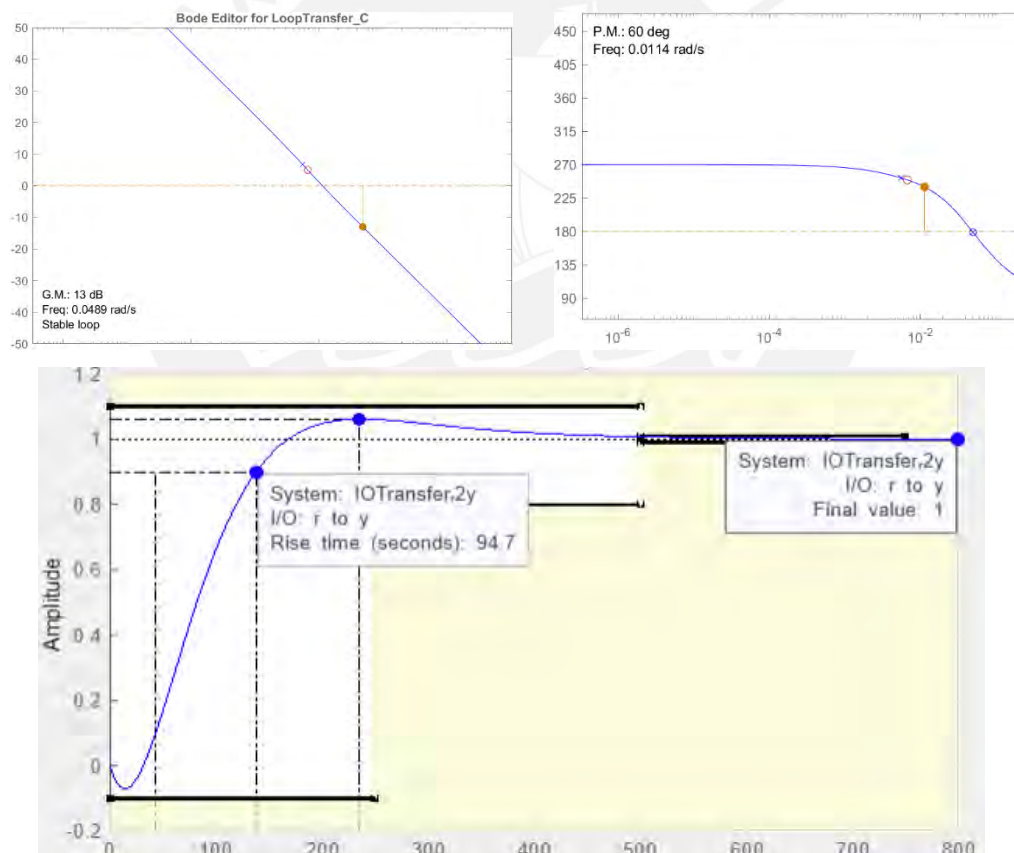


Figura 57: Comportamiento del sistema de calentamiento del aire

Nota: Elaboración propia

Para una entrada tipo escalón con valor final 55, el comportamiento deseado del sistema en lazo cerrado es como se muestra en la figura 58, donde la señal roja es la temperatura; la azul, la magnitud de la potencia.

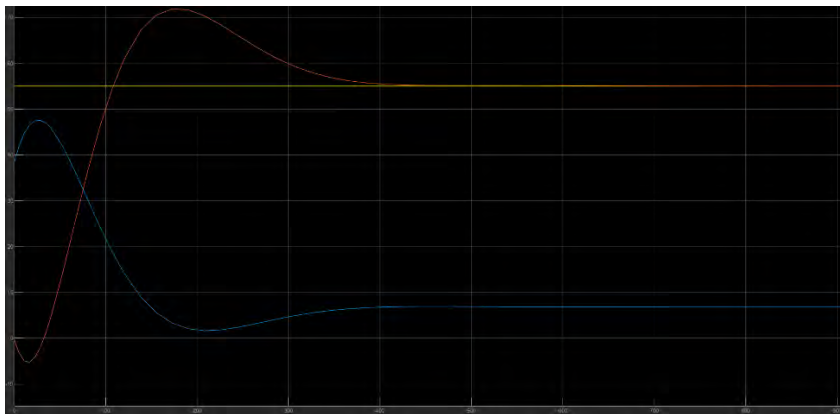


Figura 58: Respuesta del sistema de calentamiento en lazo cerrado

Nota: Elaboración propia

9. Diseño del sistema de alimentación de energía

La máquina secadora desarrollada opera en la localidad de Bagua, Amazonas. Esta ubicación se caracteriza por su clima tropical húmedo propio de la baja Amazonía, con presencia de radiación solar intensa durante la mayor parte del año. Estas condiciones climáticas del lugar de operación serán aprovechadas mediante la integración de un sistema energético solar que permita alimentar a los distintos componentes eléctricos de la secadora, tomando en consideración que se debe mantener una buena relación del costo de implementación con el beneficio de la inversión. El sistema diseñado se muestra en la figura 59 a continuación.

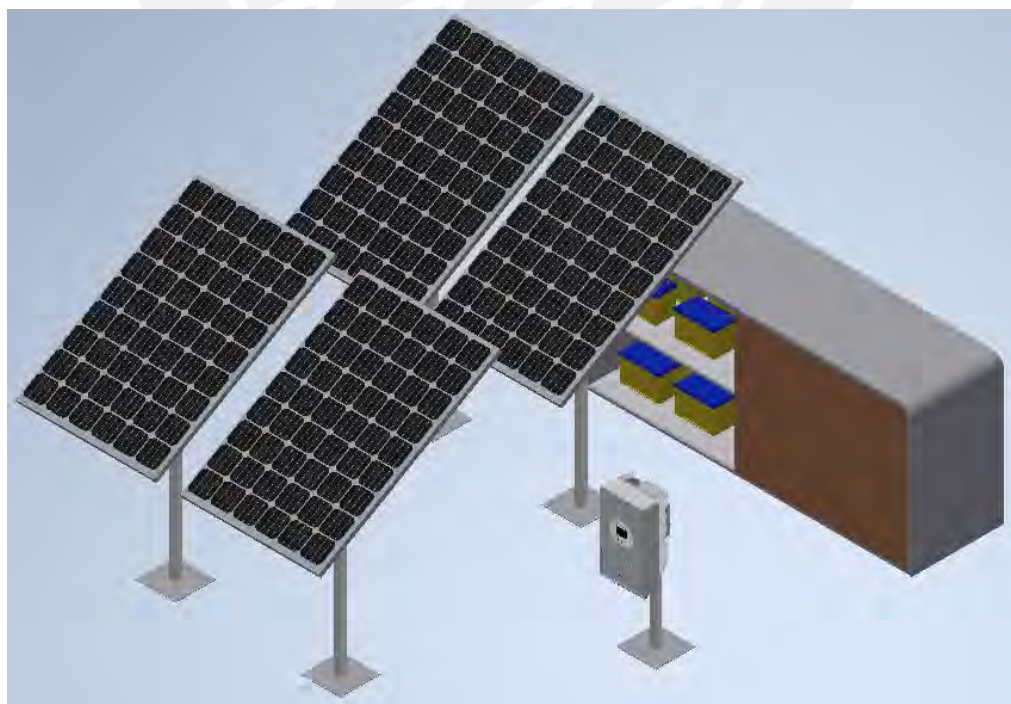


Figura 59: Sistema de alimentación eléctrica de energía solar

Nota: Elaboración propia

Ante aquellos elementos de la secadora que no puedan ser alimentados enteramente por el sistema de paneles solares, se recurre a la instalación de red eléctrica pública a la que se puede tener acceso en los lugares de acopio o cosecha donde opera la secadora. Esta elección se justifica por los costos elevados de combustibles en distintas localidades de la región amazónica. Una toma de corriente de la red eléctrica adaptada y un arreglo de paneles solares con baterías, inversor y un regulador satisfarán nuestros requerimientos energéticos para la máquina secadora de tambor rotatorio diseñada.

En los apartados siguientes, se realizan los cálculos necesarios para la selección de los componentes que integran este sistema energético de la secadora.

9.1 Cálculo de la energía eléctrica consumida por la secadora

Se hará el cálculo de la potencia dividiendo los componentes eléctricos de la secadora en dos grupos. El primero, agrupa el ventilador, actuadores lineales, motor y elementos del tablero eléctrico. El segundo grupo lo constituye el calentador de resistencias. Para el cálculo de las variables se hace uso del “Manual de cálculo de instalación fotovoltaica aislada con baterías” de José Alonso Lorenzo (2015).

$$P_{T1} = (P_{vent} + P_{AL} + P_{motor} + P_{elec}) = 100 + 150 + 600 + 25 = 875 W,$$

$$P_{T2} = P_{cal} = 7600 W.$$

El consumo energético medio diario P_{td} se calcula obedeciendo la expresión:

$$P_{td} = \frac{P_{total}(T_{secado}) FS}{\eta_{bateria} \eta_{inversor}},$$

donde:

$\eta_{bateria}$: Eficiencia de la batería; 0,90

$\eta_{inversor}$: Eficiencia del inversor; 0,95

FS : Factor de seguridad para la alimentación eléctrica del sistema; 1,25

$$P_{td1} = \frac{875 W \times 4.5 \text{ h} \times 1.2}{0.9 \times 0.95} = 5,54 \frac{kWh}{\text{día}}.$$

$$P_{td2} = \frac{7600 W \times 4.5 \text{ h} \times 1.2}{0.9 \times 0.95} = 48 \frac{kWh}{\text{día}}.$$

Luego, se debe tomar en consideración la radiación solar promedio característica de la zona de operación de la secadora para así poder determinar la potencia conjunta que deben generar los paneles solares. El sitio web *NASA Prediction of Worldwide Energy Resource* permite conocer dichos datos para la localidad de Bagua productora de cacao.

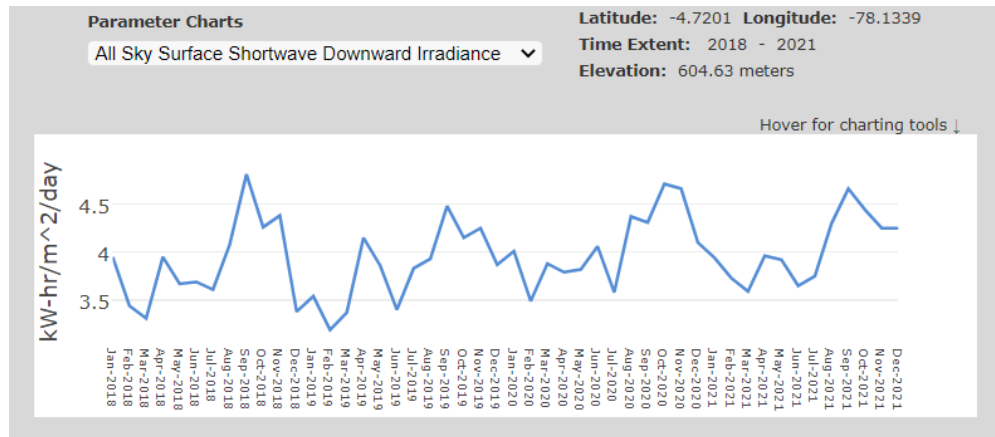


Figura 60: Radiación solar en Bagua del año 2018 al 2021

Tomado de "NASA Prediction of Worldwide Energy Resource", 2022

La potencia generada por los módulos solares se calcula obedeciendo la expresión:

$$P_{GFV} = \frac{P_{td}}{1000 HPS_{crit} PR'}$$

donde:

P_{GFV} : Potencia generada por un módulo solar.

P_{td} : Consumo medio energético diario [W],

HPS_{crit} : Horas de sol pico promedio; 4,3 kWh/m²/día,

PR: Factor global de funcionamiento; 0,9,

$$P_{GFV1} = \frac{5530}{4,3 \times 0,9 \times 1000} = 1,43 \text{ kWp.}$$

$$P_{GFV2} = \frac{48000}{4,3 \times 0,9 \times 1000} = 12,403 \text{ kWp.}$$

9.2 Evaluación de alternativas de alimentación de carga

La inversión necesaria para la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaico que permita la energización de todos los componentes eléctricos de la secadora debe ser comparado con los costos de un sistema fotovoltaico para un grupo de componentes y otro grupo alimentado por la red eléctrica local.

Considerando la radiación solar con la que se cuenta en esta zona, se procede a hacer el cálculo del número de paneles y área de terreno necesaria para cada escenario de sistema de alimentación eléctrica.

Para un panel policristalino de 24 V, 340 Wp y dimensiones 1956x992x40 mm, cada grupo de componentes eléctricos requiere un número de paneles solares determinados por la expresión:

$$N_T = \frac{P_{GFV}}{P_{MPP}}$$

donde:

N_T : Número de paneles en paralelo

P_{MPP} : Potencia máxima del módulo, 340 Wp.

Para el grupo 1:

$$N_{T1} = \frac{1\,430}{340} = 4.$$

Y el grupo 2:

$$N_{T2} = \frac{12\,403}{340} = 36$$

El área de terreno necesaria para alimentar al grupo 1 es de 8 m^2 , mientras que para alimentar a ambos grupos se requieren 79 m^2 , lo cual no es favorable para agricultores que normalmente usarían ese espacio para secar granos o cultivar plantas de cacao. Así mismo, el número de baterías necesarias para almacenar la energía producida por los paneles es 10 veces mayor. Como última consideración, el inversor requerido para alimentar al calentador sería de una magnitud mucho mayor, incrementado el costo total del proyecto y aumentando el tiempo de retorno de la inversión. Por lo tanto, se opta por alimentar con energía solar al primer grupo de componentes y mediante la red eléctrica local al calentador de resistencias.

9.3 Alimentación por energía solar

El sistema está compuesto por paneles y baterías, que operan con corriente continua, y un inversor/cargador, para obtener corriente alterna a la salida. Se seleccionan a continuación dichos elementos.

- **Selección del panel solar**

Una vez conocida la cantidad de potencia que debe generar nuestro sistema energético de paneles solares, la cantidad de unidades que se tiene que adquirir dependerá de la potencia máxima que cada panel individual puede generar. Dada la ventaja de los paneles policristalinos sobre los monocristalinos por su eficiencia de conversión y costo, se opta por la opción ilustrada en la tabla 38 a continuación, con una potencia máxima comercialmente accesible.

Tabla 38

Especificaciones del panel solar seleccionado

Características	Panel policristalino 24V
Imagen	
Máxima Potencia	340 Wp
Corriente de corto circuito	9.45 A
Número de celdas	72
Eficiencia del módulo	17 %
Dimensiones	1956x992x40mm
Peso	20.9 kg
Precio	S/ 607.9

Como se especificó en la sección anterior, se requieren 4 de estos paneles solares.

- **Selección de las baterías y reguladores**

Para el almacenamiento y acondicionamiento eléctrico adecuado para los actuadores, sistema de sensado y demás componentes de control, se seleccionan baterías además de un componte inversor-regulador para adaptar la salida de tensión hacia el sistema de secado.

La capacidad del banco de baterías está dada por la expresión:

$$C_{ne}(Ah) = \frac{P_{td} N}{V_{bat} P_{d,max}}$$

donde:

N: Número de días de autonomía del banco; 2

V_{bat} : Voltaje nominal del sistema; 24 V


$P_{d,max}$: Porcentaje máximo de descarga de baterías; 75%

$$C_{ne}(Ah) = \frac{5530 \times 2}{24 \times 0,75} = 614,44.$$

Las baterías de GEL escogidas tienen una capacidad de 150 Ah, por lo que se requieren 4 baterías de 24 V. Dado que las baterías son de 12 V, se requerirán 8 baterías de GEL de 150h. Las especificaciones de estas baterías según el fabricante se muestran a continuación en la tabla 39.

Tabla 39

Especificaciones de la batería seleccionada

Características	Batería GEL de 12V
	
Voltaje nominal	12 V
Capacidad de carga	150 Ah
Medidas	407x173x233
Peso	33.5 kg
Corriente máxima de descarga	1170 A(5 s)
Requiere mantenimiento	No
Precio	S/ 854.5

Después, deben calcularse las características deseadas para el regulador de voltaje, dado que los paneles tienen una tensión máxima de 37 V y la del sistema es de 24 V. La corriente a la entrada del regulador se calcula tomando en cuenta la corriente de corto circuito propio de los paneles:

$$I_{ent} = 1,25 I_{MODSC} N_p,$$

donde:

I_{MODSC} : Corriente unitario de un panel en condiciones de cortocircuito

N_p : Número de paneles

$$I_{ent} = 1,25 * 9,45 * 4 = 47,25 \text{ A}$$

A la salida del regulador se toma en consideración los elementos a alimentar con este elemento. La expresión siguiente permite conocer tal magnitud:

$$I_{sal} = 1,25 \frac{P_{AC}}{\eta_{inv} V_{bat}},$$

donde:

P_{AC} : Potencia consumida por elementos alimentados con corriente alterna; 875 W

Por lo tanto:

$$I_{sal} = 1,25 \frac{875}{0,95 * 24V} = 46,60 \text{ A}$$

El regulador debe poder soportar 47,25 A en la entrada y 46,6 A en la salida. Dado que los elementos a energizar requieren de corriente alterna, se necesita conocer las exigencias para el inversor del sistema.

Se toma en consideración los picos de corriente generados al momento del giro inicial del motor relacionados al arranque y superación de la inercia. Estos son tal que se


cuadruplica la potencia eléctrica durante el resto de funcionamiento del tambor giratorio de secado. Por ello, el cálculo de la potencia del inversor obedece a la expresión:

$$P_{in} = 1,2(125 + 700 * 4) = 3,510 \text{ kW}$$

Conociendo estas solicitaciones de potencia del inversor y corriente eléctrica en el regulador, se opta por el inversor, cargador y regulador SPF 3000 W 24V de la marca Must Solar. Los datos técnicos se muestran en la tabla 40.

Tabla 40

Especificaciones del inversor cargador

Características	Inversor cargador SPF 3000 W-24V
Imagen	
Voltaje de operación	24 V
Corriente de carga máxima	80 A
Potencia de salida del inversor	3000 W (230 VAC @ 50/60 Hz)
Eficiencia	93 %
Forma de la onda de salida	Onda sinusoidal pura
Dimensiones	540x395x241 mm
Peso neto	12 kg
Precio	S/ 1566,99

10. Diseño del sistema eléctrico-electrónico

En esta etapa del diseño se concreta el desarrollo de la arquitectura del sistema eléctrico-electrónico presentado en el capítulo 8 relativo al comportamiento general del sistema de secado. Se seleccionan los componentes electrónicos específicos de los módulos de control, actuación y sensado, así como el resto de los componentes eléctricos necesarios para la integración del sistema.

En el siguiente diagrama de la figura 61 se presenta un esquema simplificado de las conexiones y la alimentación eléctrica de los diversos componentes escogidos tanto para el diseño electrónico como para el eléctrico.

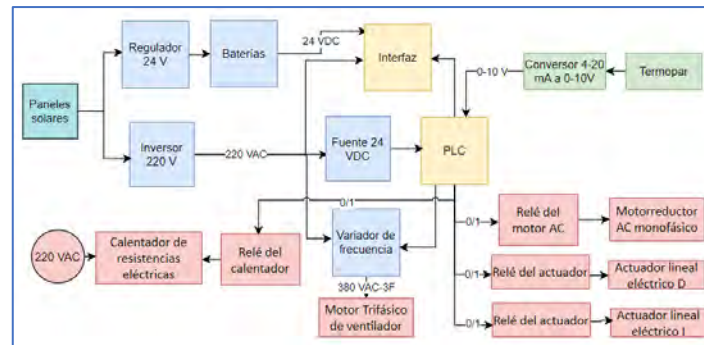


Figura 61: Diagrama de conexiones

Nota: Elaboración propia

10.1 Selección de componentes del tablero eléctrico

En este apartado se considera la selección de dos elementos actuadores del sistema. Los elementos eléctricos restantes, como llaves térmicas, diferenciales y contactos se dimensionan acorde a las cargas solicitadas. Finalmente, se alista el plano eléctrico con el que debe elaborarse el tablero.

- **Selección del variador de frecuencia**

El variador de frecuencia que se seleccione debe poder entregar una potencia conjunta de 850 W, la requerida por el motor trifásico del ventilador. Además, este dispositivo debe tener una salida que permita alimentar con potencia trifásica al motor y así mismo hacer posible que se mantenga la velocidad de giro. Se presenta como un requisito que la comunicación que mantenga con el PLC sea mediante un protocolo compatible con el PLC del fabricante Siemens.

Por ello, se opta por el variador de frecuencia Siemens G120 de 1,1 kW.

Tabla 41

Especificaciones técnicas de variador de frecuencia Siemens G120



Características	Siemens G120
Potencia suministrada	1,1 kW (1AC/3AC @ 200-240V)
Modelo de parte	6SL3210-1PB15-5UL0
Corriente de Entrada/Salida	7,5 A/3,2 A
Protocolo de comunicación	PROFINET
Motores compatibles	Motores de inducción trifásicos, motores AC monofásicos.

- **Selección de alarma sonora**

En la tabla 42 siguiente se comparan las especificaciones técnicas de dos opciones para su correcta evaluación.

Tabla 42

Especificaciones para alarma sonora del tablero

Características	XVBL1B4	BEM-1101J
Imagen		
Potencia	2 W	20 W
Tensión de alimentación	24 VDC	220 VAC
Nivel de sonido	95 dB	120 dB
Dimensiones	Ø 70x139 mm	Ø 90x170 mm
Precio	\$ 19,28	S/ 116

Se optará por la primera opción XVBL1B4 por sus dimensiones menores y su tipo de alimentación. En el segundo caso se cuenta con una notificación sonora eficaz, pero se consume mayor potencia y para su energización se requeriría de un circuito de control de potencia, pues la alarma se alimenta con corriente alterna y el PLC cuenta principalmente con salidas digitales de 24 VDC.

- **Tablero eléctrico**

El tablero eléctrico con los componentes seleccionados es el mostrado en la figura 62 a continuación, tomando en consideración las funciones establecidas de la secadora en la página 49. Además, el plano eléctrico de la figura 62 explica a mayor detalle la composición de dicho tablero.

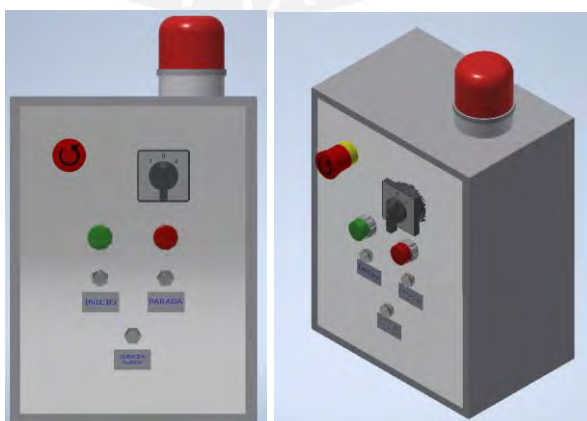


Figura 62: Tablero de control de la secadora

Nota: Elaboración propia

- **Plano eléctrico del tablero de control**

En la figura 63 a continuación, se muestra las conexiones eléctricas de los distintos elementos para el control del secador desde su tablero eléctrico. La alimentación proviene de la red eléctrica local para el calentador y del inversor de los paneles solares para el resto de los elementos. A la izquierda se tienen los elementos como pilotos, pulsadores y el sensor de temperatura conectados al PLC. Se muestran las conexiones de actuadores como el motor para giro del tambor, el ventilador y el calentador de resistencias a la derecha del plano.

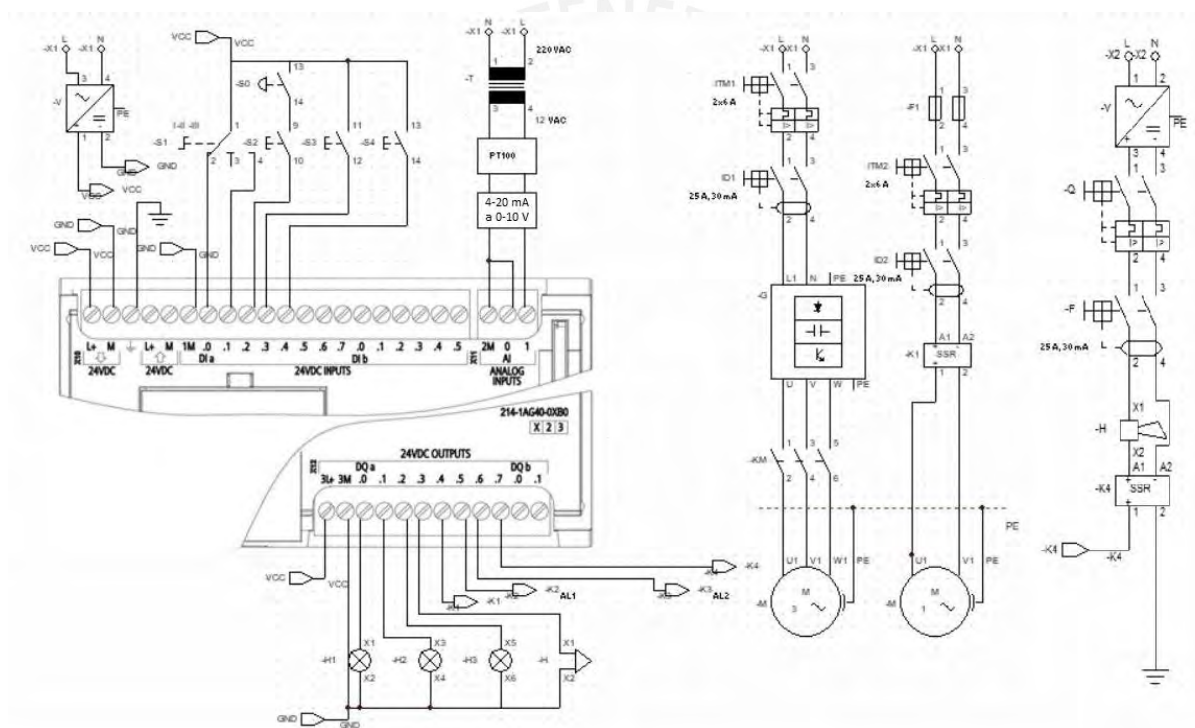


Figura 63: Plano eléctrico del tablero de control de la secadora

Nota: Elaboración propia

10.2 Cuadro de compatibilidad de puertos

Una vez escogidos los componentes del sistema eléctrico-electrónico, se debe especificar la función realizada por cada conexión de cada componente, el voltaje que pasa por esta conexión, el color de cables a emplear y el receptor y transmisor de la información. El motivo es verificar que las conexiones entre las distintas partes sean posibles sin tener problemas de compatibilidad entre componentes.

En la siguiente tabla 43, se pueden apreciar la respectiva nomenclatura de los componentes eléctricos y electrónicos del sistema.

Tabla 43

Tabla de nomenclatura

Leyenda	
PLC	PLC Siemens S7-1200
CR	Calentador de resistencias Vulcanic
VR	Variador de frecuencia Siemens G120
ST	Sensor de temperatura PT100 TS200
PR	Pulsador piloto rojo
PA	Pulsador piloto amarillo
PV	Pulsador piloto verde
AS	Alarma sonora
MR	Motorreductor
CMV	Contactador del ventilador
AL	Actuador lineal
CAL	Contactador de actuador lineal
CAS	Contacto de la alarma sonora
BE	Botón de emergencia
INV	Inversor Cargador

A continuación, se muestra la tabla 44 la lista de los componentes y sus pines de conexión respectivos.

Tabla 44

Conexiones de componentes eléctricos/electrónicos

Descripción	Conexiones	Función	Voltaje	Color	Receptor	Transmisor
Calentador de Resistencias	1	Control	24 V	Naranja	CR.C	PLC.DI0
Variador Siemens G120	7	Comunicación	24 V	Marrón	PLC.P	VF.P
		Alimentación	220 VAC	Rojo/Negro	MR.L	VF.1
		Alimentación		Rojo/Negro	MR.N	VF.2
		Tierra	0 V	Negro	MR.T, MV.T	VF.GND
		Alimentación	380 V	Gris	CMV.R	VF.4
		Alimentación	3AC	Gris	CMV.S	VF.5
		Alimentación		Gris	CMV.T	VF.6
Sensor PT100 TS200	3	Alimentación	24 V	Rojo	ST.VCC	PLC.VCC

Descripción	Conexiones	Función	Voltaje	Color	Receptor	Transmisor
Sensor PT100		Tierra	0 V	Negro	ST.GND	PLC.GND
TS200		Comunicación	0-10 V	Verde	ST.1	PLC.AI0
Actuador lineal Iz.	3	Control	24 V	Naranja	AL.C	PLC.DI4
		Alimentación	24 V	Rojo/Negro	AL.VCC	CAL.P
		Tierra	0 V	Negro	AL.GND	CAL.GND
Actuador lineal De.	3	Control	24 V	Naranja	AL.C	PLC.DI4
		Alimentación	24 V	Rojo/Negro	AL.VCC	CAL.P
		Tierra	0 V	Negro	AL.GND	CAL.GND
P. P. rojo	2	Control	24 V	Naranja	PR.1	PLC.DI1
		Tierra	0 V	Negro	PR.2	PLC.GND
P. P. amarillo	2	Control	24 V	Naranja	PA.1	PLC.DI2
		Tierra	0 V	Negro	PA.2	PLC.GND
P. P. verde	2	Control	24 V	Naranja	PV.1	PLC.DI3
		Tierra	0 V	Negro	PV.2	PLC.GND
Alarma sonora	2	Control	24 V	Azul	AS.1	CAS.L
		Alimentación	0 V	Negro	AS.2	CAS.N
XVBL1B4						
Selector de mando	3	Control		Negro	BE.2	SM.C
		Control	0V	-	-	SM.0
XB5AD21		Control		Negro	PLC.VC	SM.1
					C	
Botón de emergencia	2	Control	0V	Negro	SM.C	BE.2
		Control	220 V	Rojo	INV.N	BE.1

Capítulo IV

Evaluación Económica

Este capítulo contiene la estimación de los costos de los elementos de los subsistemas de la secadora automática y una comparación de la inversión para la implementación de este proyecto contra el costo habitual del secado artesanal de los granos de cacao.

11. Costos de fabricación

La estimación final de los costos del proyecto en este capítulo se hace realizando una división entre componentes eléctricos, componentes mecánicos, el sistema fotovoltaico y los costos aproximados de la mano de obra para la construcción de la máquina secadora.

11.1 Costos de componentes electrónicos

En la siguiente tabla 45 se listan los componentes seleccionados para el sistema de actuación, sensado y el sistema eléctrico-electrónico.

Tabla 45

Costos de componentes electrónicos

Producto	Proveedor	Precio Unitario (S/)	Cantidad	Precio Total (S/)
Siemens S7-1200	Siemens	1792	1	1792
Variador de frecuencia 1.5 HP con Profinet	Siemens	2290	1	2290
Sensor de temperatura	Siemens	820	1	820
Placa electrónica	JLC PCB	68	2	136
Motor trifásico 500 W	Siemens	748	1	748
Ventilador centrífugo	Sodeca	900	1	900
Calentador de resistencias	Vulcanic	3000	1	3000
Convertidor de corriente	Industriales Andes	24	1	24
Baliza	Schneider	73	1	73
Pulsador piloto	Siemens	51,3	3	154
Selector de mando	Schneider	48	1	48
Actuador lineal eléctrico	Bansbach	1422	2	2844
Carril DIN 2 m	Grangier	14	1	14
Interruptor termomagnético	Siemens	20	2	22
Total				S/ 12 865,00

11.2 Costos de elementos mecánicos

Para el cálculo del costo de fabricación de los elementos obtenidos por desbaste de material como el árbol de transmisión del tambor y el eje de pivote, se emplean las expresiones dadas por Tupia (2020). Para calcular el costo agregado por unidad se tiene:

$$S = t_e CO + \frac{Y}{q},$$

donde:

S: Costo agregado por unidad [\$/pieza];

CO: Costo horario de operación [\$/h];

t_e : Tiempo estándar [h/pieza];

Y: Costo por filo cortante [\$/filo];

q: piezas mecanizadas por filo [piezas/filo];

Se considera el uso de herramientas de cortes con plaquitas desechable de carburo cementado con la ecuación de Taylor característica de $v_c t_v^{0,25} = C = 200$, haciendo uso de fluido de corte. El costo P_t de dicha plaquita de $n_e = 2$ filos cortantes es de \$3,5. De este modo, el costo por filo de la herramienta se calcula con la expresión:

$$Y = \frac{P_t}{n_e} = \$1,75/\text{filo}.$$

Para conocer el tiempo de vida de esta herramienta de corte se debe conocer la velocidad de corte. Dado el volumen mínimo de producción de los elementos, se emplea la expresión para cálculo de la velocidad de corte para costo mínimo de producción, definida por:

$$v_c = C \left[\frac{n}{\left(t_a + \frac{Y}{CO} \right) (1 - n)} \right]^n,$$

donde:

v_c : velocidad de corte; m/min

C: Constante de Taylor; 200 m/min

n: exponente de Taylor; 0,25 (para carburo cementado)

t_a : tiempo de cambio de la herramienta por desgaste; 2 min

CO: Costo horario de operación; \$4/h,

de este modo, la velocidad de corte es:

$$v_c = 200 \left[\frac{0,25}{\left(2 + \frac{60 \times 1,75}{4} \right) (1 - 0,25)} \right]^{0,25} \approx 60 \text{ m/min}$$

Con el dato de la velocidad de corte y la constante de Taylor de la herramienta, el tiempo de vida de la herramienta de dos filos t_v resulta 60 min. Además, dado que el eje de transmisión tiene un largo de 0,23 metros, diámetro 30 mm y se le hacen 6 pasadas, el tiempo t_m de mecanizado por pieza será de 11 min. Con estos dos datos, la cantidad de piezas mecanizadas q por filo se calcula según:

$$q = \frac{t_v}{t_m} = \frac{60 \text{ min/filo}}{10 \text{ min/piezas}} = 6 \frac{\text{piezas}}{\text{filo}}.$$

Considerando el tiempo estándar como el 125% del tiempo de mecanizado, finalmente se obtiene el costo agregado por pieza.

$$S = 13,75 * 4 + \frac{1,74}{6} = \$55,3/\text{pieza}.$$

Para la elaboración de la estructura de soporte, se debe considerar los costos de soldadura entre perfiles. Los perfiles por utilizar son ASTM A500 40x50 mm. Las demás consideraciones para el cordón de soldadura son las presentados a continuación.

- Eficiencia de la deposición del electrodo revestido: 65%
- Densidad del electrodo; 7,8 g/cm³
- Costo de kg de electrodos; S/ 14,00
- Velocidad lineal de fusión; 22 cm/min
- FU: Factor de utilización de mano de obra; 0,6
- MO: Costo de mano de obra; S/25/hora
- Gastos generales: 20% GMO
- $K_{energia}$: Consumo de energía; 3,8 kW-h/kg
- Costo de energía: S/ 0,45/kW-h
- Volumen del cordón (1 m): 9 cm³/m

La masa de un metro de cordón, conociendo su volumen y densidad, se calcula:

$$m_{cord} = 9 * 7,8 = 70,2 \text{ g/m} = 0,07 \text{ kg/m}.$$

La masa requerida, considerando la eficiencia de deposición, es:

$$m_{req-cord} = 0,12 \text{ kg/m}.$$

El costo por electrodo para un metro del cordón requerido es:

$$C_{elec} = 14 * 0,12 = S/1,7 /m.$$

El segundo costo a considerar es el de la energía, calculada según la expresión:

$$C_{en} = m_{cord} C_{kw-h} K_{energia} = 0,07 * 0,45 * 3,8 = S/0,12 /m.$$

Para el cálculo del costo de operación, se considera el tiempo de fusión del cordón con la expresión:

$$t_{fusion} = \frac{V_{cord}}{Q_{depositado}} = \frac{9}{0,126 \text{ cm}^2 * 22 \frac{\text{cm}}{\text{min}}} = 3,4 \frac{\text{min}}{\text{m}}$$

Con el factor de utilización, se calcula el tiempo de operación a partir del de fusión:

$$t_{operación} = \frac{t_{fusion}}{FU} = 0,1 \text{ h/m}$$

El costo de operación se obtiene con la siguiente expresión:

$$C_{op} = (MO + C_{maq} + GGT)t_{operacion} = (20 + 1,5 + 1,5 * 1,2)0,1 = S/2,3 /m$$

El costo final de la soldadura para la construcción de la estructura de soporte suma los costos de operación, energía y electrodos:

$$C_{soldadura} = 2,3 + 0,12 + 1,7 = S/ 4,2 /m$$

Finalmente, en la tabla 46 a continuación, estos componentes torneados se añaden a la cotización de los componentes obtenidos por trabajos en chapa metálica de doblado, rolado y perforado y los demás elementos que componen el ensamble sin necesidad de cableado eléctrico.

Tabla 46

Costo de elementos mecánicos

Producto	Proveedor	Precio Unitario (S/)	Cantidad	Precio Total (S/)
Estructura de soporte con perfiles ASTM A500 40x50	Aceros Arequipa	1350	1	1350
Plancha AISI 304 1200x2400x3 mm	Aceros Arequipa	650	2	1 300
Plancha ASTM A36 1200x2400x2 mm	Aceros Arequipa	470	1	470
Plancha lana de roca 30 mm	Rockwell	350	1	350
Malla metálica AISI 304 0,5"X0.5"	Aceros Arequipa	165	1	165
Ducto metálico	Malvinas	120	1	120
Ducto trapezoidal	Malvinas	220	1	220
Tablero eléctrico	Malvinas	180	1	180
Tolva cónica	Malvinas	380	1	380
Pernería	Malvinas	-	-	120
Soporte de ventilador	Malvinas	40	1	40
Soporte de calentador	Malvinas	50	1	50
Rodamiento NUP 2205 ECP	SKF	108	2	216
Rotantes industriales de goma 80 kg	Sitasa	84	4	336

Producto	Proveedor	Precio Unitario (S/)	Cantidad	Precio Total (S/)
Rodamiento 61962	SKF	98	2	196
Placa para ruedas	Malvinas	30	4	120
Caja reductora	Transtecno	810	1	810
Placa de soporte	Malvinas	30	2	60
Rodillo de soporte	Malvinas	250	2	500
Tambor rotatorio	Malvinas	1 800	1	1 800
Eje de transmisión	Cálculo	230	1	230
Eje de pivote	Cálculo	90	2	180
Carcasa de cámara de secado	Malvinas	1 750	1	1 750
Tapa frontal de carcasa	Malvinas	200	1	200
Tapa trasera de carcasa	Malvinas	200	1	200
Tapa trasera de tambor	Malvinas	140	1	140
Levantador	Malvinas	20	16	320
Placa soporte de eje	Malvinas	100	1	100
Total				S/ 10 943,00

11.3 Costos de sistema fotovoltaico

La tabla 47 a continuación contiene los costos de los elementos para energizar los componentes eléctricos de la secadora con energía solar.

Tabla 47

Costo de elementos del sistema fotovoltaico

Producto	Proveedor	Precio Unitario (S/)	Cantidad	Precio Total (S/)
Panel solar 340 Wp	Autosolar	607,9	4	2 431,6
Inversor cargador	Autosolar	1567	1	1 567
Baterías	Autosolar	854,5	8	6 836
Soporte de panel	Autosolar	479	2	958
Total				S/ 11 792,60

11.4 Costos de mano de obra

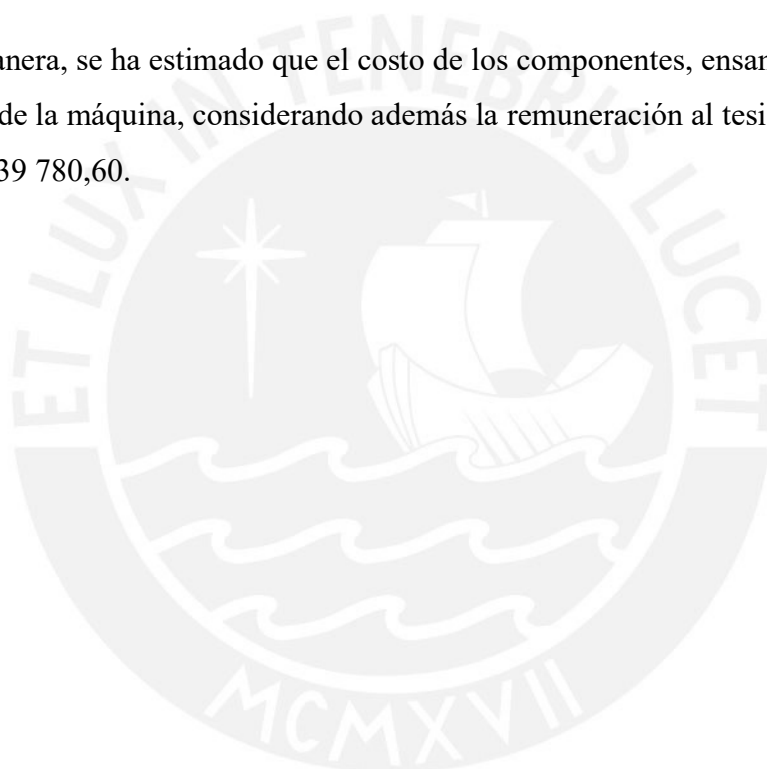
El costo de la mano de obra para ensamble, transporte e instalación son estimados en la tabla 48 a continuación con base en el tiempo, implementos y cantidad de personal necesarios para efectuar la tarea.

Tabla 48

Costo de mano de obra

Servicio	Precio Total (S/)
Ensamble de la máquina	2 500
Instalación de sistema fotovoltaico	1 500
Total	S/ 4 000,00

De esta manera, se ha estimado que el costo de los componentes, ensamble y puesta en operación de la máquina, considerando además la remuneración al tesista, resulta en un total de S/39 780,60.



Conclusiones

- ❖ El proyecto de la máquina secadora automática con capacidad para 60 kg fue desarrollado hasta culminar la etapa de diseño del sistema mecatrónico siguiendo los lineamientos de la metodología “*Design methodology for mechatronic systems*” por De Negri et al. (2021).
- ❖ Se realizó el diseño mecánico de la secadora, lo cual incluye el dimensionamiento de la cámara de secado según requisitos de diseño, la estructura de soporte y el mecanismo para el movimiento giratorio y la descarga de granos.
- ❖ Se completó el diseño del sistema de generación de aire caliente, para el cual se seleccionó una termocupla, el calentador de resistencias de 11 kW y una lámina termoaislante de recubrimiento necesarios para el calentamiento del aire y conservación de la energía calorífica en el sistema de secado.
- ❖ Para el sistema de control de temperatura del aire, se realizó el diseño de los circuitos de electrónica de potencia y se seleccionó un PLC Siemens S7-1200 CPU 1214 para el control de los elementos eléctricos de la secadora.
- ❖ Se culminó la evaluación de la inversión necesaria para el proyecto, que incluye el costo del desarrollo, fabricación e instalación de la secadora, la cual ofreció un presupuesto final estimado en S/39 780,60.

Recomendaciones

- ❖ Dado que el tiempo de secado de los granos a una humedad final de 8% fue calculado analíticamente y con parámetros de granos distintos al del cacao, la implementación del proyecto resulta fundamental para así poder comprobar los resultados en relación con el tiempo de operación, la humedad en base húmeda final y el mantenimiento de las cualidades organolépticas del grano.
- ❖ La estrategia de control puede ser modificada para contar con un controlador más efectivo en el mantenimiento de la temperatura de operación, la reducción de la energía consumida y el mayor aprovechamiento de las funcionalidades del PLC. Entre la literatura revisada, los controladores y PID difusos resaltan como opciones que mejoran el comportamiento del sistema en el lazo cerrado de control.



BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, J. (2012). *Electrónica de potencia I: Apuntes de clase*. Universidad de Jaén.
https://issuu.com/jaguilarpena/docs/electronica_potencia1_1/180
- Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anjum, P. G. A., & Kour, H. (2013). *Different drying methods: their applications and recent advances*. International Journal of food nutrition and safety, 4(1), 34-42.
https://www.researchgate.net/publication/275650176_Different_Drying_Methods_Their_Applications_and_Recent_Advances
- Baker, C. G. J. (1988). *THE DESIGN OF FLIGHTS IN CASCADING ROTARY DRYERS*. Drying Technology: An International Journal, 6(4), 631-653.
<http://dx.doi.org/10.1080/07373938808916402>
- Barbecho, A., Loja J. (2019). *Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17131>
- Barrantes, E. (s.f.) *Aspectos fluido-mecánicos de la convección*. Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Buenaer, J., Olaya, D., Trujillo, C. (1991). *Análisis y diseño de una máquina y/o equipo necesario para el manejo de granos*. Universidad Autónoma de Occidente.
<https://red.uao.edu.co/handle/10614/3572>
- CAOBISCO/ECA/FCC. (2015). *Cacao en Grano: Requisitos de la Calidad de la Industria del Chocolate y del Cacao*.
https://www.cocoaquality.eu/data/Cacao%20en%20Grano%20Requisitos%20de%20Calidad%20de%20la%20Industria%20Apr%202016_es.pdf
- Çengel, Y., Boles, M. (2015). *Termodinámica (8va. Ed.)*, 948-963. Editorial McGraw-Hill.
- Chang, J., Wang, D., & Li, T. (2009). *The Electric Heating Furnace Temperature Control Based on SPID*. Fuzzy Information and Engineering, 2, 1673–1679.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03664-4_177
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.(2019). *Esquemas y mapas conceptuales de Procesos Hidrológicos: Gráfico psicrométrico de aire-agua a altas temperaturas*.
<https://www.docsity.com/es/carta-psicrometrica-a-altas-temperaturas/5849098/>

- Cueva, O., Saquina, L., Orna, J., Chuquín, N. (2018). *Diseño y construcción de una secadora automática para cacao a base de aire caliente tipo rotatorio para una capacidad de 500 kg* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. DSpace.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8079>
- Duan, Yh. (2010). *The Design of Predictive Fuzzy-PID Controller in Temperature Control System of Electrical Heating Furnace*. Notas de Seminario en Computer Science, 6329.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-15597-0_29
- De Negri, F., Muñoz, K., Vigolo, V. (2021). *Design Methodology for Mechatronic Systems. An approach using function/means tree and channel/agency net*.
<http://laship.ufsc.br/site/ensino/software/mechatronic-design-metodology-digital-ebook>
- Flores, D. (2020). *Tiristores y Triacs II parte* [Diapositivas de PowerPoint]. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Fierro, M. (1990). *Diseño Térmico de un Secador tipo Plataforma* [Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico]. Escuela Politécnica Superior del Litoral. FIMCP. Dspace.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4306>
- García, L. (2015). *Catálogo de cultivares de cacao del Perú*. Ministerio de Agricultura.
https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/cultivares_cacao.pdf
- Ghosh, B., Cunha, J. (1975). *Effect of season on sun drying of cocoa beans in Brazil*. Turrialba, 25(4), 396-403.
- Gilces, H., & Sanmartín, F. (2013). *ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE PROCESO DE SECADO DE CACAO Y DISEÑO DE PROTOTIPO DE UNA UNIDAD SECADORA TIPO PLATAFORMA*. [Tesis de grado, Universidad Estatal de Milagro]. Dspace.
<http://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/473>
- Gutierrez, J., Sanz, J., Oliveros, C., Orozco, C. (2012). *Ventiladores para secadores de café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos*. CENICAFÉ.
- Instituto Nacional de Calidad. (2017). *CACAO Y CHOCOLATE. Buenas prácticas para la cosecha y beneficio* [NTP 208.040:2017].
- Jinap, S., Thien, J., Yap, T. (1994) *Effect of drying on acidity and volatile fatty acids content of cocoa beans*. J. Sci. Food Agriculture, 65, 67-75.

- Li, S., Zhao, C., Chen, D., Zheng, J., Zheng, J. (2018). Green Coffee bean drying device [European Patent CN217604562U] European Patent Office.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DCN217604562U>
- Moreno, D. (s.f.) *Operaciones de separación por transferencia de masa: Secado*. [Diapositiva PDF] Repositorio Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones.
https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/170633/mod_resource/content/1/Secado.pdf#:~:text=Humedad%20libre%20o%20desligada%3A%20Es,libre%20se%20comportar%3%A1%20como%20h%C3%BAmedo.
- Nogales, J., Graziani de Fariñas, L., Ortiz de Bertorelli, L. (2006). *Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera*. *Agronomía Tropical*, 56(1), 5-20.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000100001&lng=es&tlng=es.
- Oliveros-Tascón, C., Roa-Mejía, G. (1985) *Coefficiente de fricción, ángulo de reposo y densidades aparentes de granos de café Coffea arabica Variedad Caturra*. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Repositorio digital.
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/1050/1/arc036%2801%2922-38.pdf>
- Paredes, A. (2017). *Diseño mecánico de tolvas industriales, 3ra. Parte*.
<http://mecanotecnia.blogspot.com/2017/04/disenio-mecanico-de-tolvas-industriales.html>
- Parra, P. (2017). *Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente* [Tesis doctoral en Ingeniería con Mención en Automatización, Control y Optimización de Procesos, Universidad de Piura] Repositorio Institucional PIRHUA.
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3488>
- Rodríguez, J. (2019). *Resistencia de materiales 2*. Pontificia Universidad Católica del Perú
- Siemens (2014) *SIMATIC: S7-Controlador programable S7-1200. Manual del Sistema*.
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/622/91696622/att_42774/v1/s71200_sys_tem_manual_es-ES_es-ES.pdf
- Alonso, J. (2015). *Manual de cálculo de instalación fotovoltaica aislada con baterías*. Sunfields Europe.
<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-sistema-fotovoltaico-aislado/>

Treybal, R. (1980). *Operaciones de transferencia de masa (2da. Ed.)*. Editorial McGraw-Hill.

Vigolo, V., De Negri, V., Muñoz, K. (2020) *Mechatronic Design Development Tool*. Repositorio de LASHIP - Hydraulics and Pneumatics
<https://laship.ufsc.br/site/en/ensino/software>

Zhang, R., Xue, A., Gao, F. (2014). *Temperature Control of Industrial Coke Furnace Using Novel State Space Model Predictive Control*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2084–2092.
<https://doi.org/10.1109/tii.2014.2350452>



Anexo A

En la figura A1 se muestra la matriz morfológica correspondiente al nivel 2 del árbol de funciones de la máquina secadora automática.






















Funcions	Working principle 1	Working principle 2	Working principle 3	Working principle 4	Working principle 5
Alimentar el grano a la secadora	 Carga manual	 Carga asistida			
Calentar el aire deshumidificador	 Resistencias eléctricas	 Gases de combustión	 Radiación solar y Resistencias eléctricas	 Radiación solar y gases de combustión	
Movilizar el aire deshumidificador por el	 Circulación tangente	 Lecho fluidizado	 Circulación perpendicular al lecho		
Uniformizar el grano	 Movimiento rotatorio horizontal	 Brazo agitador en silo circular	 Esparcimiento en bandeja	 Esparcimiento en plataforma	 Vibración de plataforma
Interactuar con el operador	 Sistema de control local	 Sistema de control remoto			
Descargar el grano secado	 Descarga manual	 Descarga automática			
Energizar el sistema	 Energía eléctrica	 Energía solar	 Energía fósil		

Figura A1: Matriz morfológica del nivel 2

En la figura A2 a continuación se presentan las soluciones propuestas, en las cuales se combinan los distintos medios de la matriz morfológica de la figura A1.























































































































	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Posible soluciones	 Carga asistida	 Carga manual	 Carga manual	 Carga manual	 Carga manual
	 Calentamiento por radiación solar y resistencias eléctricas	 Calentamiento por resistencias eléctricas	 Calentamiento por gases de combustión	 Calentamiento por radiación solar y gases de combustión	 Calentamiento por gases de combustión
	 Circulación perpendicular al lecho	 Circulación perpendicular al lecho	 Circulación perpendicular al lecho	 Circulación tangente	 Circulación tangente
	 Esparcimiento en plataforma	 Movimiento rotatorio horizontal	 Brazo agitador en silo circular	 Movimiento rotatorio horizontal	 Esparcimiento en bandeja
	 Sistema de control local	 Sistema de control local	 Sistema de control local	 Sistema de control local	 Sistema de control remoto
	 Descarga manual	 Descarga automática	 Descarga automática	 Descarga manual	 Descarga manual
	 Energía eléctrica	 Energía solar	 Energía eléctrica	 Energía eléctrica	 Energía fósil

Figura A2: Cuadro de posibles soluciones del nivel 2

Nota: Elaboración propia

A la izquierda de la figura A3 a continuación se muestra la matriz morfológica correspondiente al nivel 3 del árbol de funciones; a la derecha, las soluciones propuestas resultante de la combinación de los medios operacionales considerados.

Functions	Working principle 1	Working principle 2	Working principle 3	Working principle 4	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Alimentar manualmente la secadora	 Tolva de base rectangular	 Tolva cónica	 Carga directa en cámara de secado		 Carga directa en cámara de secado	 Tolva cónica	 Tolva cónica
Generar calor con resistencias eléctricas	 Resistencias tubulares lisas	 Resistencias aleteadas	 Resistencias tubulares flexibles		 Resistencias aleteadas	 Resistencias aleteadas	 Resistencias tubulares lisas
Captar energía solar	 Panel monocristalino	 Panel policristalino	 Panel de capa fina		 Panel policristalino	 Panel monocristalino	 Panel monocristalino
Alimentar motor de ventilador	 Convertidor estático de fase	 Variador de frecuencia			 Variador de frecuencia	 Variador de frecuencia	 Variador de frecuencia
Generar flujo de aire	 Ventilador centrífugo radial	 Ventilador de palas curvadas hacia adelante	 Ventilador de palas curvadas hacia atrás		 Ventilador centrífugo de palas curvadas hacia adelante	 Ventilador centrífugo de palas curvadas hacia adelante	 Ventilador centrífugo radial
Conducir el aire hacia la cámara	 Conducto de acero inoxidable	 Conducto de acero inoxidable con aislamiento térmico			 Conducto de acero inoxidable con aislamiento térmico	 Conducto de acero inoxidable con aislamiento térmico	 Conducto de acero inoxidable con aislamiento térmico
Contener granos de cacao	 Cámara agujereada de acero inoxidable	 Cámara agujereada de acero galvanizado	 Cámara de acero galvanizado sin agujeros		 Cámara de acero galvanizado sin agujeros	 Cámara agujereada de acero inoxidable	 Cámara agujereada de acero inoxidable
Generar movimiento de rotación del tambor	 Motor de inducción monofásico	 Motor de inducción trifásico	 Motor universal		 Motor de inducción trifásico	 Motor de inducción monofásico	 Motor de inducción monofásico
Llevar potencia del motor al eje del	 Correa de transmisión	 Cadena de rodillos	 Caja reductora de engranajes		 Correa de transmisión	 Caja reductora de engranajes	 Correa de transmisión
Recepción arseñales de entrada	 Pulsadores piloto	 Pantalla HMI			 Pantalla HMI	 Pulsadores piloto	 Pulsadores piloto
Sensar la temperatura del aire caliente	 Termómetro de resistencia	 Termistor	 Termocupla	 Sensor higrométrico	 Sensor higrométrico	 Termómetro de resistencia	 Termómetro de resistencia
Alertar al usuario por alguna emergencia	 Luces piloto	 Alarma sonora	 Reporte remoto a centro de seguridad	 Luz piloto y alarma sonora	 Luz piloto y alarma sonora	 Luz piloto y alarma sonora	 Alarma sonora
Gestionar sistema de control	 PLC	 Microcontrolador	 Sistema embebido		 Sistema embebido	 PLC	 PLC
Descargar automáticamente el grano	 Actuador neumático	 Actuador hidráulico	 Actuador eléctrico		 Descarga manual de granos	 Actuador eléctrico	 Actuador eléctrico

Possible solutions

Figura A3: Matriz morfológica del nivel 3 y soluciones propuestas

Nota: Elaboración propia