

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Mecatrónico*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**"DISEÑO DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA  
EL PROCESO DE SECADO DE CACAO"**

**AUTORES:**

MARCOS DANIEL TOROCHE NOVILLO  
FRANCISCO XAVIER VILLA PULLA

**TUTOR:**

ING. MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS, MSc.

CUENCA – ECUADOR

2021

# CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

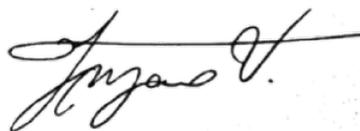
Nosotros, Marcos Daniel Toroche Novillo con documento de identificación N° 0104608062 y Francisco Xavier Villa Pulla con documento de identificación N° 0107327447, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “**DISEÑO DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE SECADO DE CACAO**”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.



**Marcos Daniel Toroche Novillo**  
C.I 0104608062



**Francisco Xavier Villa Pulla**  
C.I 0107327447

# CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**DISEÑO DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE SECADO DE CACAO**”, realizado por Marcos Daniel Toroche Novillo y Francisco Xavier Villa Pulla, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.



Marco Esteban Amaya Pinos

C.I. 0102263480

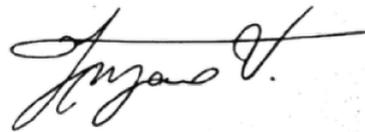
# DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Marcos Daniel Toroche Novillo con documento de identificación N° 0104608062 y Francisco Xavier Villa Pulla con documento de identificación N° 0107327447, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE SECADO DE CACAO”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre de 2021.



Marcos Daniel Toroche Novillo  
C.I 0104608062



Francisco Xavier Villa Pulla  
C.I 0107327447

# Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a:

A mis padres Alfonso y Rosa, por ser mi mayor motivo de alegría y por su apoyo incondicional que me brindaron durante toda mi formación académica.

A mi hermana Adriana, por ser la persona que siempre me hace sonreír hasta en los momentos más complicados de mi vida.

A mi tío Manuel (+), por ser ejemplo a seguir, del cual aprendí muchos valores y agradezco hoy en día, siendo el principal motivo para la culminación de mis estudios.

## **Francisco**

En primer lugar, doy gracias a Dios por haberme dado la fuerza necesaria para sobrellevar cada uno de los obstáculos que han ido surgiendo durante toda esta trayectoria.

Doy gracias a mi familia y mi pareja por haber sido un apoyo, por haberme dado los consejos necesarios y la experiencia de haber aprendido con cada uno de ellos para haber logrado culminar mi carrera universitaria con grandes resultados y con ganas de seguir avanzando para lograr mejores cosas en la vida.

## **Daniel**

# Agradecimientos

A nuestro director de tesis el Ing. Marco Amaya por su bondadosa apertura y apoyo en la realización de este proyecto técnico.

Al Ing. Eugenio Cárdenas por su gentileza y nuestros agradecimientos por colaborar en este proyecto.

Nuestra especial gratitud a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica Salesiana por haber impartido sus conocimientos académico, científico y ético.

**Francisco y Daniel**

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Índice

Cesión de Derechos de Autor	I
Certificación	II
Declaratoria de Responsabilidad	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XV
Abstract	XVI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema</b>	<b>2</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	2
2.2. Importancia y alcances . . . . .	2
2.3. Delimitación . . . . .	3
2.3.1. Delimitación Espacial . . . . .	3
2.3.2. Delimitación Temporal . . . . .	3
2.4. Problema General. . . . .	3
2.5. Problemas Específicos. . . . .	3
<b>3. Objetivos</b>	<b>4</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	4
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
<b>4. Hipótesis</b>	<b>4</b>
4.1. Hipótesis General . . . . .	4
4.2. Hipótesis Específicas . . . . .	4
<b>5. Matriz de Operacionalización de Variables</b>	<b>5</b>
<b>6. Matriz de Consistencia Lógica</b>	<b>6</b>

<b>7. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
7.1. El cacao . . . . .	7
7.2. Tipos de cacao . . . . .	7
7.2.1. Criollo. . . . .	8
7.2.2. Forastero. . . . .	8
7.2.3. Trinitario. . . . .	8
7.2.4. Nacional. . . . .	8
7.3. Proceso de transformación del tratamiento del fruto. . . . .	8
7.3.1. Cosecha. . . . .	8
7.3.2. Fermentación. . . . .	9
7.3.3. Secado. . . . .	10
7.4. Tipos de secado. . . . .	10
7.4.1. Secado natural. . . . .	10
7.4.2. Secado artificial. . . . .	11
7.5. Cinética del secado . . . . .	14
7.5.1. Gráfica de la curva de velocidad de secado . . . . .	15
7.5.2. Secador continuo a contracorriente . . . . .	15
<b>8. Marco metodológico</b>	<b>17</b>
8.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño de un equipo auto- matizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	17
8.1.1. Parámetros del cacao . . . . .	17
8.1.2. Propuestas de diseño para el secador de cacao . . . . .	17
8.1.3. Información antropométrica del operario . . . . .	21
8.1.4. Características de la máquina a diseñar . . . . .	22
8.1.5. Elección de la Banda Transportadora . . . . .	22
8.2. Propuesta del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	23
8.2.1. Dimensionamiento de la cámara de secado . . . . .	23
8.2.2. Dimensionamiento de la banda transportadora . . . . .	37
8.2.3. Dimensionamiento del aislante para la cámara de secado . . . . .	51
8.2.4. Dimensionamiento del aislante para conductos . . . . .	54
8.2.5. Dimensionamiento del motor-reductor . . . . .	56
8.2.6. Cálculo flujo volumétrico . . . . .	57
8.2.7. Cálculo de la tubería estructural cuadrada (ASTM A 36) . . . . .	59

8.2.8. Velocidad de secado . . . . .	61
8.2.9. Modelo Matemático del Controlador . . . . .	63
8.3. Evaluación del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	66
8.3.1. Evaluación del sistema mecánico. . . . .	66
8.3.2. Evaluación del sistema de control de temperatura. . . . .	68
8.4. Análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	78
<b>9. Resultados</b>	<b>81</b>
9.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	81
9.2. Propuesta del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	82
9.3. Evaluación del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	83
9.4. Análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao . . . . .	85
<b>10. Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>86</b>
<b>Referencias</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>90</b>
<b>Anexo A: Requisitos de diseño - Gráfica de humedad para mezclas de aire y vapor de agua.</b>	<b>91</b>
<b>Anexo B: Selección de rodillo</b>	<b>92</b>
<b>Anexo C: Selección de chumacera</b>	<b>93</b>
<b>Anexo D: Ecuaciones simplificadas para convección desde diversas superficies.</b>	<b>94</b>
<b>Anexo E: Selección de motor-reductor</b>	<b>95</b>

Anexo F: Selección del blower.	96
Anexo G: Requisitos de diseño - Flujo Volumétrico.	97
Anexo H: Selección de calentadores de ducto	98
Anexo I: Catálogo de tubo estructural cuadrado	99
Anexo J: Factores de carga para miembros $Kl/r$ Acero A-36	100

## Lista de Tablas

1.	Operacionalización de Variables para el proceso de secado de cacao. . . . .	5
2.	Características físicas de las semillas de cacao. . . . .	17
3.	Tabla de ponderación del proceso de secado. . . . .	20
4.	Medidas antropométricas de la población ecuatoriana. . . . .	22
5.	Características físicas de la máquina. . . . .	22
6.	Características de los componentes del equipo de secado. . . . .	22
7.	Valores considerados en el proceso de secado. . . . .	24
8.	Coefficiente de resistencias fijas. . . . .	38
9.	Coefficiente de las resistencias pasivas debidas a la temperatura. . . . .	38
10.	Coefficiente de rozamiento interior $f$ del material y de los elementos giratorios. . . . .	39
11.	Peso del núcleo de la correa ( $q_{bn}$ ). . . . .	40
12.	Peso de las partes giratorias de los rodillos de las estaciones (sup/inf). . . . .	41
13.	Paso máximo aconsejable para las estaciones. . . . .	42
14.	Valores de factor de abrazamiento $Cw$ según ángulo. . . . .	45
15.	Diámetros mínimos recomendados para los tambores. . . . .	46
16.	Selección de chumaceras. . . . .	51
17.	Variables que intervienen en el dimensionamiento del aislante. . . . .	51
18.	Valores establecidos para el cálculo del aislante del ducto. . . . .	54
19.	Sumatoria de pesos. . . . .	59
20.	Factores de carga para miembros $Kl/r$ . . . . .	60
21.	Parámetros del sistema. . . . .	66
22.	Costos de la cámara de secado. . . . .	78
23.	Costos de la estructura del equipo de secado. . . . .	78
24.	Costos de sistemas de transmisión de movimiento. . . . .	78
25.	Costos de sistemas de calentamiento de aire. . . . .	79
26.	Costo de sistemas de control. . . . .	79
27.	Costo de diseño. . . . .	79
28.	Costos totales del equipo de secado. . . . .	80
29.	Precio de máquinas existentes en el mercado. . . . .	80
30.	Resultados de los cálculos del diseño del secador tipo túnel. . . . .	82
31.	Resultados de los cálculos del espesor de aislantes. . . . .	83
32.	Resultados de los diferentes componentes del equipo. . . . .	83
33.	Valores obtenidos de la simulación. . . . .	84

34.	Valores obtenidos de la simulación. . . . .	84
35.	Constates de control. . . . .	84
36.	Parámetros de control. . . . .	85

## Lista de Figuras

1.	Variedades del cacao. . . . .	7
2.	Cosecha del cacao. . . . .	9
3.	Fermentación del cacao. . . . .	9
4.	Secado natural del cacao. . . . .	11
5.	Esquema de secador de horno. . . . .	12
6.	Esquema de secador de armario. . . . .	12
7.	Esquema de secador de túnel. . . . .	13
8.	Esquema de secador de rodillos. . . . .	14
9.	Esquema de secador de lecho fluidizado. . . . .	14
10.	Curva de velocidad de secado. . . . .	15
11.	Esquema del secador continuo a contracorriente. . . . .	16
12.	Propuesta 01 - Esquema de secador por infrarrojos y ondas electromagnéticas. . . . .	18
13.	Propuesta 02 - Esquema de secador por gas y resistencias eléctricas industriales. . . . .	18
14.	Propuesta 03 - Esquema de secador continuo tipo túnel a contracorriente por medio de resistencias eléctricas industriales. . . . .	19
15.	Dimensiones antropométricas relevantes para el diseño de la máquina. . . . .	21
16.	Proceso de flujo para un secador continuo a contracorriente. . . . .	23
17.	Temperaturas del túnel de secado. . . . .	28
18.	Diferencias de temperaturas en cada zona. . . . .	31
19.	Tensiones de la banda. . . . .	44
20.	Diagrama de cuerpo libre. . . . .	47
21.	Escala para el cálculo de la vida nominal básica. . . . .	50
22.	Esquema de temperaturas. . . . .	52
23.	Representación esquemática del conducto. . . . .	54
24.	Esquema del conducto. . . . .	58
25.	Diagrama de cuerpo libre del tubo estructural cuadrado. . . . .	59
26.	Representación esquemática de la cámara de secado. . . . .	63
27.	Simulación CFX del flujo del aire . . . . .	67
28.	Análisis térmico de la cámara de secado . . . . .	67
29.	Análisis estructural . . . . .	68
30.	Respuesta a una entrada escalón unitario - continuo ( $x(t)$ vs tiempo). . . . .	69
31.	Respuesta a lazo abierto discretizada ( $x[n]$ vs tiempo). . . . .	70
32.	Diagrama de bloques del sistema. . . . .	70

33.	Respuesta del sistema con acción de control. . . . .	71
34.	Variable controlada ante la señal de referencia. . . . .	72
35.	Diagrama de bloques del sistema frente a una perturbación. . . . .	72
36.	Variable controlada frente a una perturbación. . . . .	73
37.	Control de motores. Banda transportadora(izquierda), Blower(Derecha). . . . .	74
38.	Inicialización del control de las resistencias eléctricas industriales. . . . .	75
39.	Conversión de analógico a digital. . . . .	76
40.	Ingreso de datos del PI diseñado. . . . .	77
41.	Secador continuo tipo túnel a contracorriente. . . . .	81
42.	Banda transportadora recubierta de teflón. . . . .	81

## Resumen

**E**l proyecto técnico presentado, ha permitido identificar que en el Ecuador el proceso de secado de cacao, en su mayoría, sigue siendo artesanal, esto es colocar los granos sobre el suelo, de manera que se sequen al ambiente. Este tipo de actividad trae el riesgo de que se adhieran al grano bacterias que hagan perder, ciertas propiedades organolépticas y por consiguiente incidan en la calidad del producto. Por esta razón, se propone el diseño de una máquina automatizada para el proceso de deshidratación del cacao, la misma que mantenga todas sus características organolépticas.

El proyecto inicia con la distinción de los diferentes métodos que existen para el secado del grano de cacao con el propósito de constatar cuál es el mejor y destacar los puntos más convenientes de cada técnica. Así mismo, se controla la temperatura interna del equipo de secado el cual debe estar a 60°C, temperatura que es establecida según Anecacao para garantizar la calidad de los granos de cacao.

La técnica de recolección de datos fue de tipo exploratorio, descriptivo e investigativo con las cuales se determinó las características físicas y químicas del cacao. Para obtener la condición deseada del cacao se usaron técnicas validadas por la norma INEN 0176.

El proyecto concluye con la evaluación de los resultados con la finalidad de comprobar su correcto funcionamiento y el cumplimiento del objetivo principal que es el secado libre de impurezas. Se realiza también un análisis de costos para verificar la rentabilidad del equipo desarrollado.

**Palabras clave:** Propiedades organolépticas, Automatizado, Humedad, Secado.

## Abstract

The technical project presented has made it possible to identify that in Ecuador the process of cocoa the process of drying cocoa, for the most part, is still handmade, that is: placing the beans on the ground, so that they dry in the environment. This type of activity entails the risk of bacteria adhering to the bean, causing it to lose bacteria may adhere to the beans, causing them to lose certain organoleptic properties and consequently affect the quality of the product. For this reason, the design of an automated machine for the cocoa dehydration process is proposed dehydration of cocoa, the same that maintains all its organoleptic characteristics.

The project begins with the distinction of the different methods that exist for the drying of cocoa beans to the different methods that exist for drying cocoa beans to determine which is the which is the best and to highlight the most convenient points of each technique. The internal temperature of the drying equipment is also controlled which must be at 60°C, a temperature established by Anecacao to guarantee the quality of the cocoa beans.

The data collection technique was exploratory, descriptive, and investigative which were used to determine the physical and chemical characteristics of the cocoa. To obtain the desired condition of the cocoa techniques validated by INEN 0176 were used to obtain the desired condition of the cocoa.

The project concludes with the evaluation of the results with the purpose of to verify its correct operation and the fulfillment of the main objective, which is the main objective of drying free of impurities. A cost analysis is also cost analysis is also carried out to verify the profitability of the developed equipment.

**Keywords:** Organoleptic properties, Automated, Humidity, Drying.

# 1. Introducción

**E**l proyecto técnico presentado surge de la necesidad de mejorar el proceso de secado del cacao ecuatoriano, el cual es una de las fuentes económicas que mayor ingreso genera hoy en día en el país. El proceso de secado del cacao en el país se realiza de manera artesanal, lo cual no permite un óptimo aprovechamiento de sus bondades nutritivas, dado que, al estar expuesto el producto al aire libre, este es vulnerable a ciertos agentes dañinos como: insectos, bacterias, animales domésticos, entre otros, los mismos que provocan el deterioro del producto y la consecuente pérdida de su calidad, afectando la economía de sus productores en términos de volúmenes y niveles de comercialización. (Espinoza y Yange, 2012).

El desarrollo y modernización de los métodos de secado de cacao han permitido implementar aplicaciones electrónicas que favorecen a mejorar el proceso de secado y a obtener un grano de excelente calidad (Espinoza y Yange, 2012), así mismo, estas aplicaciones permite disminuir el uso de combustibles, debido a que el funcionamiento del equipo propuesto en este proyecto consta de un sistema de calentamiento por medio de energía eléctrica, lo cual permitirá un control con mayor precisión del tiempo de secado del producto y, a su vez, ayudando a mantener sus propiedades organolépticas que son de vital importancia para garantizar la calidad del cacao.

Por otra parte, se hace uso de la información de libros sobre ingeniería de secado, tesis de grado alusivos al secado de distintos granos y frutos, como también de artículos científicos acerca de tecnologías de secado, de tal manera que se logra realizar una apropiada modelación de la etapa de deshidratación del cacao.

En la investigación del secado del cacao, se habla acerca de la clasificación del cacao como también del proceso de transformación del tratamiento del fruto para luego describir los diferentes tipos de sistemas que existen para realizar el secado, posteriormente se hace uso de la teoría de la cinética de secado para realizar los respectivos cálculos del equipo.

Adicionalmente, se realiza las respectivas evaluaciones del diseño realizado, mediante elementos finitos. Así mismo, se lleva a cabo un análisis de costos y finalmente se complementa, este trabajo, con las conclusiones y recomendaciones que proporcionaran nuevas ideas para la aplicación de futuros trabajos.

## **2. Problema**

### **2.1. Antecedentes**

En el Ecuador la producción de cacao es una de las actividades de mayor ingreso económico, el cual debe pasar por una etapa de secado para poder ser procesado. Los métodos utilizados para el proceso de secado de cacao son netamente artesanales, por lo que al estar expuesto el grano de cacao directamente al medio ambiente y a la superficie del suelo, proporciona que se adhieran al grano insectos y bacterias del entorno, obteniendo como resultado una menor calidad al término del proceso (Manjarrez, 2020).

Así mismo, en la actualidad existe una gran variedad de máquinas para el proceso de secado de productos agrícolas, donde los avances tecnológicos han permitido desarrollar maquinaria a gran escala para el sector agro, por lo que las grandes industrias realizan el proceso de secado de cacao con máquinas de gran capacidad permitiendo secar elevadas cantidades, pero dichas máquinas tienen un alto costo económico siendo no factible para los pequeños y medianos productores, dado que no se adapta a las necesidades de estos, por lo que se ven obligados a realizar el secado del producto al ambiente dependiendo de las condiciones climáticas (Guailas y Juca, 2020).

Por otro lado, estas máquinas que son diseñadas para el secado de productos agrícolas no tienen el respectivo cuidado referente a la contaminación del grano, debido a que los gases combustionados del combustible le van quitando propiedades organolépticas al producto, causando pérdidas a los productores (Guailas y Juca, 2020).

### **2.2. Importancia y alcances**

El estudio realizado contribuirá en el diseño de una secadora que preserve las características del cacao en grano durante el proceso de secado y que disminuya los tiempos de producción, garantizando un mayor control de los parámetros de esta etapa y obteniendo un producto que cumpla con los parámetros de calidad requeridos, logrando así un desarrollo eficiente en la producción. Hoy en día, la automatización es el proceso rentable y seguro, por lo que es aplicado en las diversas industrias conforme a la necesidad, viabilidad, tecnología y valor económico. Al desarrollar un proceso óptimo de secado, en el que se conseguirá reducir el tiempo del mismo, se alcanzará adquirir un mayor control en la humedad de la materia prima, el cual debe tener un valor inferior al 8%; de esta manera se economiza recursos puesto que

se reduce la logística del cuidado del grano en las grandes extensiones de tendales que son inevitables para el habitual secado al sol, permitiendo conseguir un producto que cumpla con los requerimientos apropiados, representando un mayor rendimiento que beneficiará al productor (Miguel y colaboradores, 2013).

## **2.3. Delimitación**

### **2.3.1. Delimitación Espacial**

El equipo diseñado será desarrollado para la zona costera del Ecuador con especial énfasis en el sector agro, debido a la necesidad de los productores de obtener un producto con altos niveles de estándares de calidad.

### **2.3.2. Delimitación Temporal**

El equipo está planeado para ser diseñado en seis meses, tiempo en el que realizará distintos diseños y ajustes para seleccionar el diseño óptimo para el proceso de secado de cacao.

## **2.4. Problema General.**

- ¿Es posible diseñar un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao?

## **2.5. Problemas Específicos.**

- ¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao?
- ¿Es posible proponer el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao?
- ¿Es factible evaluar el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao?
- ¿Es posible realizar un análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao?

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

- Diseñar un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Establecer los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Proponer el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Evaluar el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Realizar un análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.

### **4. Hipótesis**

#### **4.1. Hipótesis General**

- El diseñar un equipo automatizado mejorará el proceso de secado de cacao.

#### **4.2. Hipótesis Específicas**

- Se establecerá los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Se propondrá el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Se evaluará el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.
- Se realizará un análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao.

## 5. Matriz de Operacionalización de Variables

**Tabla 1:** Operacionalización de Variables para el proceso de secado de cacao.

Variable Independiente: Diseño				
Consideraciones de Diseño	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición
Peso del cacao	<b>Definición conceptual:</b> Magnitud que mide la fuerza con la que la gravedad presiona o atrae un cuerpo hacia la tierra (Real, 2020).	Peso	Kg	Balanza
	<b>Definición operacional:</b> Magnitud de medida que indica el peso del cacao por cada ciclo de operación.			
Dimensiones del operario	<b>Definición conceptual:</b> Cada una de las magnitudes que fijan la posición de un punto en un espacio. Una superficie tiene dos dimensiones: el largo y el ancho (Real, 2020).	Altura	m	Flexómetro
	<b>Definición operacional:</b> Las dimensiones del operario, permite tener una noción básica del dimensionamiento de la máquina con la finalidad ergonómica y de fácil manejo por parte del operario.			
Parámetros de Secado	<b>Definición conceptual:</b> Es un indicativo bien marcado para lograr evaluar o valorar una situación particular (Real, 2020).	Humedad	%HR	Higrómetro
	<b>Definición operacional:</b> Los parámetros de secado son los criterios de diseño para el control de las temperaturas del funcionamiento de la máquina.	Temperatura	°C	Termocupla
Dimensiones de la banda transportadora	<b>Definición conceptual:</b> Cada una de las magnitudes que fijan la posición de un punto en un espacio. Una superficie tiene dos dimensiones: el largo y el ancho (Real, 2020).	Longitud	m	Flexómetro
	<b>Definición operacional:</b> Es un parámetro que ayudará a determinar las dimensiones principales y la capacidad de producción de la máquina.	Ancho, Espesor		
Dimensiones de la cámara de secado	<b>Definición conceptual:</b> Cada una de las magnitudes que fijan la posición de un punto en un espacio. Una superficie tiene dos dimensiones: el largo y el ancho (Real, 2020).	Longitud	m	Flexómetro
	<b>Definición operacional:</b> Las dimensiones de la cámara de secado permite obtener las temperaturas adecuadas para efectuar el secado de la materia prima.	Ancho, Espesor		
Dimensiones de los conductos de aire	<b>Definición conceptual:</b> Cada una de las magnitudes que fijan la posición de un punto en un espacio. Una superficie tiene dos dimensiones: el largo y el ancho (Real, 2020).	Radio	m	Flexómetro
	<b>Definición operacional:</b> Dimensiones de los conductos para la distribución del flujo de aire.	Longitud		

**Fuente:** Autor



## 7. Marco Teórico

### 7.1. El cacao

El cacao tiene su origen entre los países de México, Guatemala y Honduras, se sabe que cuando los españoles desembarcaron en la zona de Mesoamérica los nativos ya demostraban un dominio sobre esta especie, incluso que había sido utilizada en la región por más de cinco mil años. Los árboles de cacao de tamaño medio alcanzan a medir entre 5 y 8 metros, los más grandes llegan a alturas de 20 metros en condiciones más favorables (Anacafe, 2004). Todas las especies crecen en las zonas de bosques tropicales lluviosos y los países donde más diversidad existe son Brasil, Perú, Ecuador, Venezuela y Colombia (Caballero, 2015). El fruto tiene características variables según el tipo, generalmente tienen forma de baya o forma elíptica, de unos 30 cm de largo y 10 cm de diámetro, pueden ser de color rojo, amarillo o café (Anacafe, 2004).

### 7.2. Tipos de cacao

Según la Organización Nacional del Cacao existen alrededor de 22 especies, pero existen tres clasificaciones de las cuales se desprenden las demás:



**Figura 1:** Variedades del cacao.

**Fuente:** Anacafe (2004).

### **7.2.1. Criollo.**

Este cacao, de muy buena calidad, tiene la pared más delgada que el resto y posee un color rojizo. Tiene un menor rendimiento y es más propenso a las plagas. El 5-10 % de la producción mundial de cacao es de esta categoría (Caballero, 2015).

### **7.2.2. Forastero.**

Esta variedad posee un color verde, su pared es gruesa, tiene las semillas con forma redondeada y un poco aplanadas. Tiene mayor rendimiento y es más resistente a enfermedades fungosas. Casi el 80 % de la producción mundial de cacao pertenece a esta variedad (Caballero, 2015).

### **7.2.3. Trinitario.**

Esta variedad se origina de una mezcla entre las dos variedades anteriores. En lo que respecta a su morfología es polimorfo, lo que hace más difícil su clasificación en base a sus características, incluso algunas de sus variedades tienen mayor rendimiento y calidad que el forastero. El 10-15 % de la producción mundial del cacao es Trinitario (Caballero, 2015).

### **7.2.4. Nacional.**

Es una variedad rara de cacao que encontramos en Ecuador y Perú. En este grupo podemos encontrar al cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN51) y el cacao fino de aroma o cacao Arriba (Caballero, 2015).

## **7.3. Proceso de transformación del tratamiento del fruto.**

### **7.3.1. Cosecha.**

Los árboles de cacao florecen dos veces al año, alrededor de un año y medio después de haber sido sembrados. Para proceder con la cosecha se diferencia un cambio de color entre los frutos, este cambio varía entre las diferentes especies. La cosecha debe hacerse a tiempo, debido a que este cambio de color tiene un corto tiempo y se puede llegar a perder los frutos que hayan alcanzado su madurez. Después de 10 días de haber sido recogidos y analizados para corroborar que cumplan las normas necesarias, los frutos sanos son abiertos para extraer las semillas (Anacafe, 2004; Guailas y Juca, 2020).



**Figura 2:** Cosecha del cacao.

**Fuente:** Guailas (2020).

### 7.3.2. Fermentación.

En este proceso se aíslan las semillas, suele realizarse en un recipiente de madera con pequeños agujeros por los que puede circular el aire entre ellas, de esta forma se conserva el calor, el cual puede alcanzar hasta los 50°C que ayuda a eliminar el embrión que se produce dentro de las semillas. Este proceso debe durar máximo 3 días para los cacaos criollos y 8 días para los forasteros. Todo este proceso da lugar a cambios químicos de la semilla para darle su aroma y sabor característicos (Anacafe, 2004; Guailas y Juca, 2020).



**Figura 3:** Fermentación del cacao.

**Fuente:** Anacafe (2004).

### **7.3.3. Secado.**

El secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material, casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. Se usa también como técnica de reservación de materiales biológicos en especial con los alimentos (Geankoplis, 1998).

Después de la fermentación y de haber lavado los granos se procede al secado; estos quedan con una humedad del 60 %, donde este porcentaje debe reducirse a un valor de entre el 7 al 8 % según la norma ecuatoriana INEN 0176. El secado debe realizarse de manera lenta y moderada, dado que si es demasiado rápido las reacciones químicas dejan al cacao con un sabor amargo, en cambio, si el secado se hace muy lento se puede generar moho. La temperatura de secado no debe superar los 65°C (Guaillas y Juca, 2020).

Existen dos tipos de secado, el primero es el secado natural que se realiza con la temperatura ambiente, los granos de cacao se suelen colocar en lo alto de esferas de bambú o sobre plataformas de hormigón; el segundo tipo es el secado artificial usando combustible (Anacafe, 2004).

## **7.4. Tipos de secado.**

### **7.4.1. Secado natural.**

Este depende de las condiciones atmosféricas del lugar, puede durar alrededor de una semana. El grano debe revolverse o voltearse de vez en cuando para intentar lograr un secado uniforme. Las desventajas de trabajar de esta manera son la posibilidad de que se generen plagas en las semillas, ataques de roedores, aves, insectos y de las condiciones climáticas no óptimas (Siguencia, 2013).



**Figura 4:** Secado natural del cacao.

**Fuente:** Sigüencia (2013).

#### **7.4.2. Secado artificial.**

El secado artificial se realiza generando calor de una fuente externa, como en hornos o estufas a partir de carburantes como el gas natural (Parra, 2013). Dentro del secado artificial existen varios métodos para lograr el secado deseado, estos pueden ser:

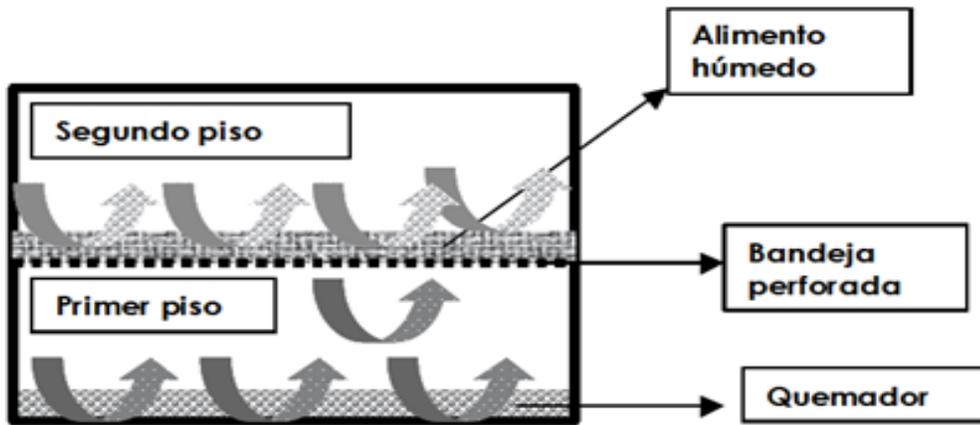
##### **7.4.2.1 Secadores indirectos o por conducción.**

Este tipo de secadores suministra calor a través de las paredes que contiene el sólido, es decir, sin entrar en contacto directo con el sólido a secar (Parra, 2013).

##### **7.4.2.2 Secadores directos o por convección.**

Son aquellos secadores donde el aire caliente usado entra en contacto con el sólido que se pretende secar (Parra, 2013). Los tipos de secadores directos son:

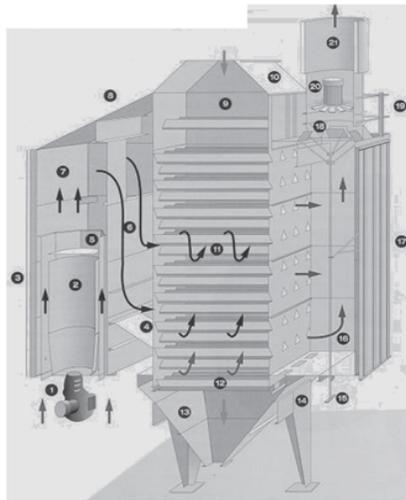
- **Secadores de horno o estufa:** Es el más sencillo de los secadores, consta de dos pisos, en el piso de abajo está el quemador, en el de arriba el sólido húmedo que se pretende secar, la bandeja que separa los dos pisos tiene perforaciones de tal forma que se facilite el contacto entre el aire caliente y estos sólidos (Maupoey, 2016).



**Figura 5:** Esquema de secador de horno.

**Fuente:** Maupoey (2016).

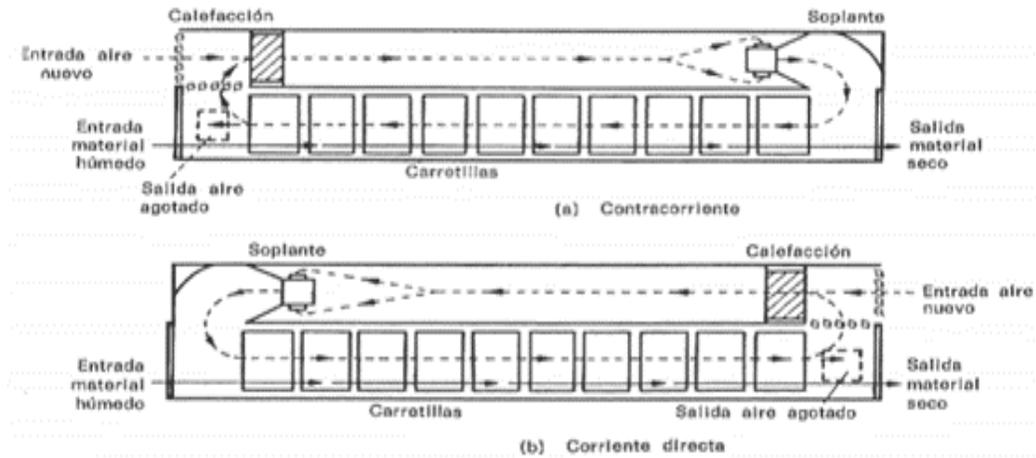
- **Secadores de bandeja o de armario:** Es una cámara rectangular en posición vertical con bandejas de poca profundidad, el aire caliente circula entre estas bandejas. Si es posible se pueden perforar las bandejas para aumentar la circulación del aire caliente sobre los sólidos. Operar con esta máquina es costoso por la ejecución de carga y descarga, puesto que es difícil realizar esto por un operario (Maupoey, 2016).



**Figura 6:** Esquema de secador de armario.

**Fuente:** Caballero (2015).

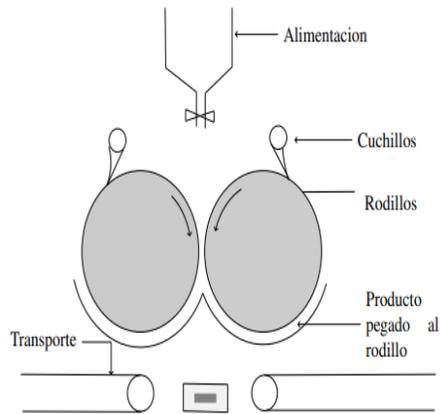
- **Secador de túnel:** En este tipo de secador el producto avanza en un túnel donde se apila el sólido húmedo. De tal forma que, cuando el producto nuevo entra en el túnel al otro lado sale el producto seco (Maupoey, 2016).



**Figura 7:** Esquema de secador de túnel.

**Fuente:** Geankoplis - Procesos de transporte y operaciones unitarias (1998).

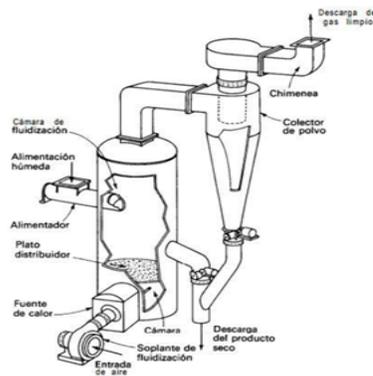
- **Secador de tambor o de rodillos:** Este proceso se realiza para material en forma de pasta, debido a que la superficie del rodillo se calienta mediante vapor, el material húmedo se adhiere a esta superficie donde se seca para finalmente ser retirado mediante cuchillas para otros procesos (Caballero, 2015; Sigüencia, 2013) .



**Figura 8:** Esquema de secador de rodillos.

**Fuente:** Oumarou (2014).

- Secador de lecho fluidizado:** Con este secador se fluidiza el sólido, es decir, mediante un proceso se elevan las partículas del sólido húmedo haciendo que este se comporte como un líquido y realizando otros procesos dentro del secador se disminuye la humedad del sólido, para finalmente pasar por una cámara donde se fluidiza con gas frío para enfriar el producto seco (Caballero, 2015).



**Figura 9:** Esquema de secador de lecho fluidizado.

**Fuente:** Caballero (2015).

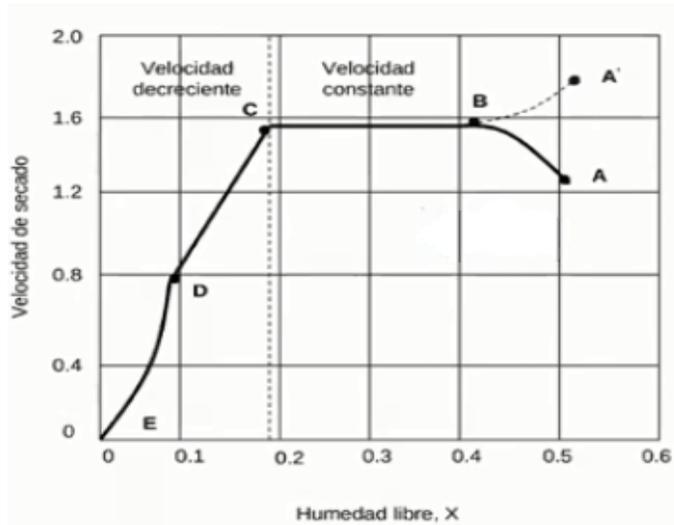
## 7.5. Cinética del secado

Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y exactamente por el cociente diferencial  $(-dX/d\theta)$  operando en

condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo (Ocon y Tojo, 1970).

### 7.5.1. Gráfica de la curva de velocidad de secado

En la figura 10 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido de humedad libre corresponde al punto A, al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Entre los puntos B y C la curva es recta, por lo que la velocidad es constante durante este período. En el punto C, la velocidad de secado comienza a disminuir en el período de velocidad decreciente, de manera que en el punto D la velocidad de secado disminuye con mayor rapidez hasta que llega al punto E (Geankoplis, 1998).



**Figura 10:** Curva de velocidad de secado.

**Fuente:** Geankoplis - Procesos de transporte y operaciones unitarias (1998).

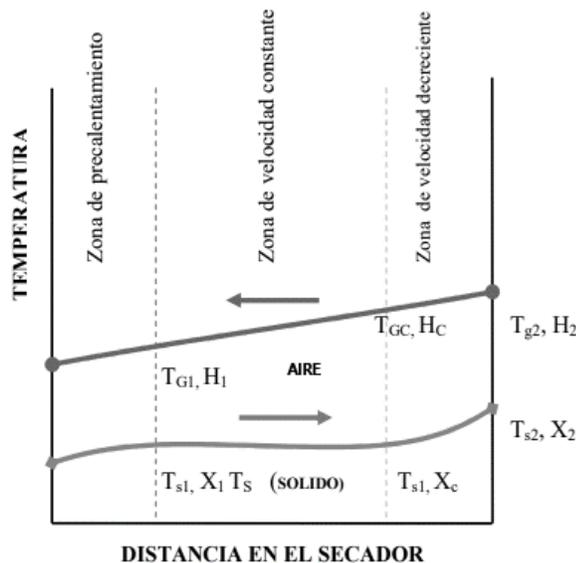
### 7.5.2. Secador continuo a contracorriente

El secado continuo representa ciertas ventajas sobre el secado por lotes. En un secado continuo, el sólido se desplaza por el secador en contacto con una corriente de gas

paralela o a contracorriente del sólido. En la operación adiabática a contracorriente, el gas caliente de entrada tiene contacto con el sólido que ya sale seco, mientras que en la operación adiabática en paralelo, el gas caliente de entrada se pone en contacto con el sólido húmedo (Geankoplis, 1998).

En la figura 11 se observa las diferentes zonas de un secador a contracorriente, donde según Geankoplis se tiene que:

- **Zona de precalentamiento:** El sólido se calienta hasta la temperatura de bulbo húmedo o de saturación adiabática. En esta zona se produce poca evaporación y casi siempre se pasa por alto cuando se trata de un secado a temperaturas bajas.
- **Zona I, velocidad constante:** Se evaporan la humedad sin combinar y la superficial, mientras la temperatura del sólido permanece esencialmente invariable y equivale a la temperatura de saturación adiabática, cuando el calor se transfiere por convección.
- **Zona II, velocidad decreciente:** Se evaporan la humedad superficial no saturada y la saturada, y la humedad combinada, mientras el sólido se seca hasta el valor final  $X_2$ .



**Figura 11:** Esquema del secador continuo a contracorriente.

**Fuente:** Geankoplis - Procesos de transporte y operaciones unitarias (1998).

## 8. Marco metodológico

### 8.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

#### 8.1.1. Parámetros del cacao

Para el secado de cacao se tomó en cuenta las características físicas mostrados en la tabla 2.

**Tabla 2:** Características físicas de las semillas de cacao.

Característica física	Valor	Unidad
Largo	23.74±1.97	cm
Ancho	13.66±1.21	cm
Espesor	8.77±1.29	cm
Peso de 100 semillas	147.75±3.91	g
Densidad	775	kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	3.715392	kJ/kg°C

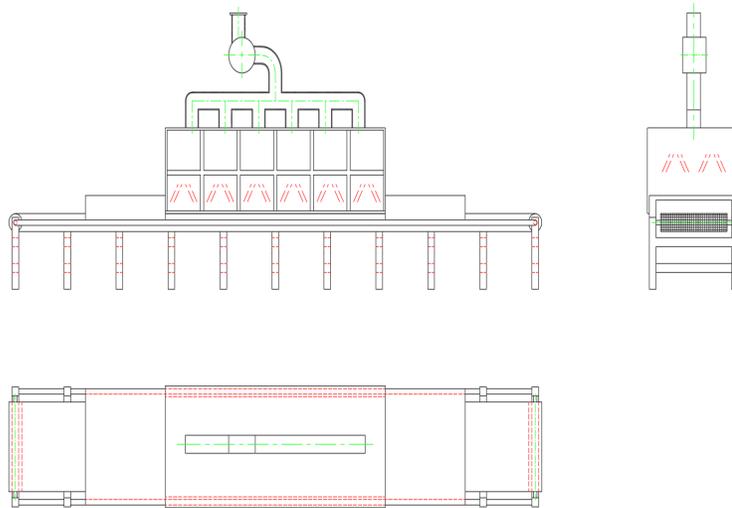
**Fuente:** Vargas - Tratamientos previos al proceso de tostado de semillas de cacao.

Además según la norma INEN 0176 establece que el cacao debe tener un contenido de humedad igual al 7.0 % y en caso de emplearse un secado artificial el equipo deberá ser calibrado para que el calor se mantenga entre 50 y 60°C (Anecacao, 2016) para disminuir el porcentaje de humedad que viene siendo del 55 % (Saavedra, 2012).

#### 8.1.2. Propuestas de diseño para el secador de cacao

En este apartado se obtuvo una evaluación ponderada de los diferentes diseños propuestos para poder realizar la selección más adecuada, entre estos diferentes medios de calentamiento se ha evaluado con las siguientes: resistencias eléctricas industriales, gas, infrarrojo y ondas electromagnéticas, de la tal manera que se pueda tener una visión mucho más amplia y clara.

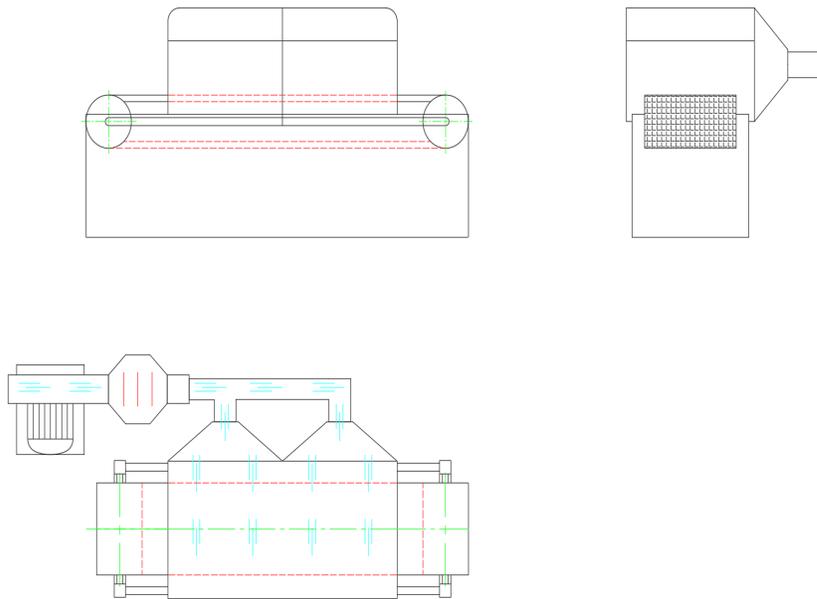
Seguidamente, se muestra los diseños preliminares efectuados, en la figura 12 se observa el primer diseño propuesto en donde su funcionamiento se fundamenta en un sistema de infrarrojos. De igual modo, este diseño puede ser adaptado mediante otro medio de calentamiento como ondas electromagnéticas.



**Figura 12:** Propuesta 01 - Esquema de secador por infrarrojos y ondas electromagnéticas.

**Fuente:** Autores.

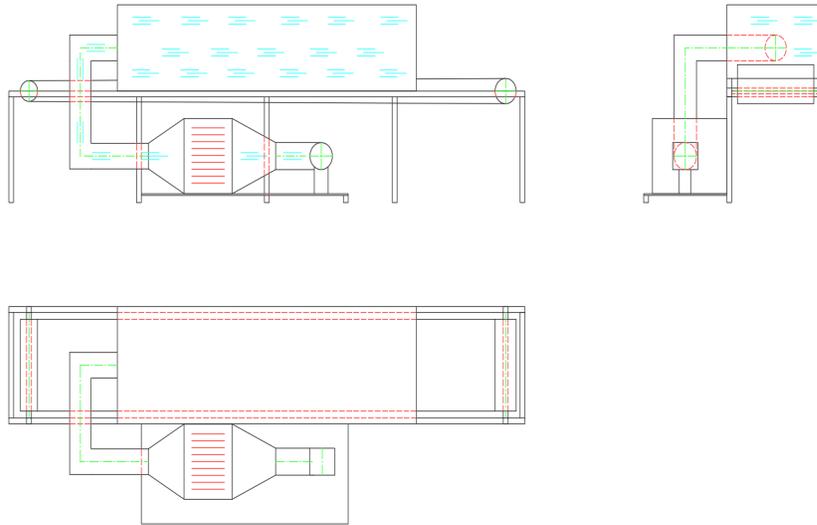
La figura 13, indica la segunda propuesta de diseño, el cual utiliza como medio de calentamiento resistencias eléctricas industriales para calentar el aire. Así mismo, este diseño puede emplear otro medio de calentamiento que es mediante el uso de gas (GLP).



**Figura 13:** Propuesta 02 - Esquema de secador por gas y resistencias eléctricas industriales.

**Fuente:** Autores.

La figura 14, muestra la tercera propuesta de diseño, el cual es un secador tipo túnel a contracorriente empleando como medio de calentamiento las resistencias eléctricas industriales.



**Figura 14:** Propuesta 03 - Esquema de secador continuo tipo túnel a contracorriente por medio de resistencias eléctricas industriales.

**Fuente:** Autores.

Conforme a la tabla 3 se llega a concluir que la opción más viable es mediante el empleo de resistencias eléctricas industriales, dado que tiene una mayor evaluación con respecto a los demás y siendo viable para el diseño en general.

A continuación, en la tabla 3 se muestra la evaluación de ponderación realizada.

Donde,

\*Se planteó los criterios de selección con una cierta valoración/importancia en una escala de 0 a 1, siendo 0 el de menor importancia y 1 el de mayor importancia.

\* En cada diseño se realiza la respectiva calificación en una escala de 1 a 5 siendo: 1. Muy Mala, 2. Mala, 3. Normal, 4. Buena, 5. Muy Buena

\* Para obtener la evaluación ponderada se multiplica la importancia por la calificación.

**Tabla 3:** Tabla de ponderación del proceso de secado.

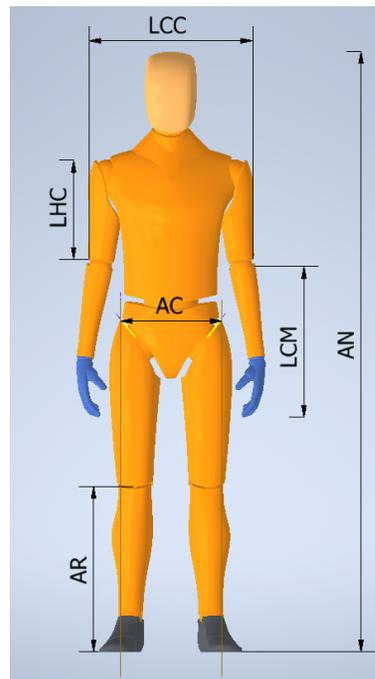
Criterios de Selección	Importancia (Peso)	Resistencias Eléctricas Industriales		Gas		Infrarrojo		Ondas Electromagnéticas	
		Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3		Diseño 4	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Medio de Calentamiento	1	4	4	4	4	5	5	4	4
Costo de Fabricación	0.9	4	3.6	5	4.5	1	0.9	1	0.9
Tamaño	0.6	3	1.8	3	1.8	3	1.8	3	1.8
Forma de Control	1	4	4	4	4	2	2	2	2
Mantenimiento	0.9	4	3.6	2	1.8	5	4.5	3	2.7
Seguridad	1	4	4	4	4	4	4	4	4
Transporte de Material	0.8	5	4	5	4	5	4	5	4
Tiempo de Secado	1	3	3	3	3	4	4	4	4
Facilidad de sacar el producto del horno	0.8	5	4	5	4	5	4	5	4
<b>Valoración Total</b>		36	<b>32</b>	35	<b>31.1</b>	34	<b>30.2</b>	31	<b>27.4</b>

**Fuente:** Autores.

Finalmente, de acuerdo a la tabla 3 y a las propuestas de diseño se vio óptimo realizar un secador continuo tipo túnel, donde el flujo de aire sea a contracorriente y así obtener un secado uniforme empleando las resistencias eléctricas industriales como medio de calentamiento.

### 8.1.3. Información antropométrica del operario

Para el diseño del equipo de secado se ha tomado en cuenta la posición ergonómica del operario con el objetivo de conseguir una productividad óptima, figura 15, las medidas antropométricas obtenidas ayudarán al dimensionamiento de la máquina.



**Figura 15:** Dimensiones antropométricas relevantes para el diseño de la máquina.

**Fuente:** Autores.

**Tabla 4:** Medidas antropométricas de la población ecuatoriana.

Medidas antropométricas (Desviación Estándar)	Mestizos		Indígenas		Afroecuatorianos	
	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre
Altura normal (AN)	159.2(6.000)	172.4(6.162)	155.3(6.209)	163.3(8.313)	165.9(6.086)	177.6(5.223)
Altura rodilla (AR)	48.5(3.088)	523.9(3.015)	48.32(4.777)	52.08(3.591)	50.73(2.947)	58.69(2.468)
Longitud hombro-codo (LHC)	34.65(2.747)	36.32(1.700)	32.98(2.338)	37.1(3.464)	34.08(2.650)	38.99(2.587)
Longitud codo a codo (LCC)	40.00(4.033)	44.7(4.062)	45.6(3.067)	44.84(6.277)	38.83(3.457)	49.85(2.135)
Longitud codo-mano (LCM)	41.6(3.0660)	46.08(2.385)	39.84(3.037)	45.0(3.229)	43.83(2.316)	47.76(2.801)
Ancho de las caderas (AC)	35.63(2.631)	35.62(2.506)	39.12(3.201)	37.89(3.015)	36.06(2.572)	40.63(1.888)

**Fuente:** Barrera (2013).

#### 8.1.4. Características de la máquina a diseñar

Para el dimensionamiento de la máquina se tomó los siguientes datos mostrados en la tabla 5:

**Tabla 5:** Características físicas de la máquina.

Características físicas	Valores	Unidades
Largo	5,400	<i>mm</i>
Ancho	1,020	<i>mm</i>
Altura	1,873	<i>mm</i>
Capacidad de producción	0.148	<i>kg/h</i>

**Fuente:** Autores.

Para los demás componentes se planteó los siguientes datos, tabla 6:

**Tabla 6:** Características de los componentes del equipo de secado.

Elementos	Características físicas	Valores	Unidades
Motor-reductor	Velocidad de salida	1	<i>m/s</i>
Banda transportadora	Largo	5,000	<i>mm</i>
	Ancho	800	<i>mm</i>
Resistencias eléctricas industriales	Temperatura	100	<i>°C</i>
Conductos	Diámetro	8	<i>in</i>

**Fuente:** Autores.

#### 8.1.5. Elección de la Banda Transportadora

En la elección de la banda se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de material.

- Peso del material a transportar.
- Condiciones de trabajo.

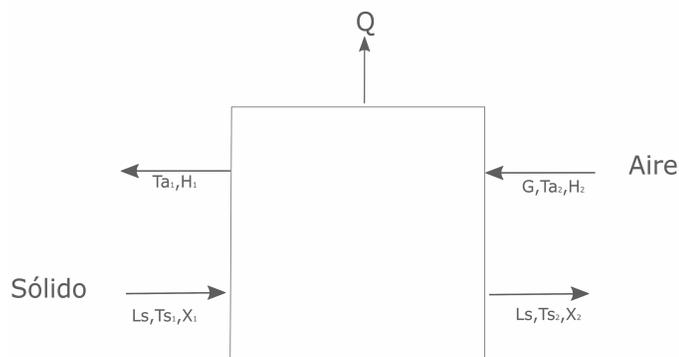
Según los aspectos mencionados anteriormente, el tipo de material a transportar son los granos de cacao, considerando el peso de cien semillas que es  $147.75\text{ g}$ . En cuanto a las condiciones de trabajo el único factor crítico al que va a estar expuesto la banda es la temperatura a la que se debe secar el cacao ( $60^{\circ}\text{C}$ ), se tiene otros factores que en este caso no son muy relevantes como agentes químicos, luz del sol, entre otros aspectos.

Una vez detallado los requerimientos que se necesita, se plantea utilizar una banda transportadora de malla recubierta de teflón dado que, son muy utilizadas en hornos, procesos de secado y sobre todo soportan elevadas temperaturas siendo adecuada para el proceso de secado de cacao.

## 8.2. Propuesta del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

### 8.2.1. Dimensionamiento de la cámara de secado

En la figura 16 se indica el proceso de flujo para el secador continuo a contracorriente y para determinar las variables que intervienen en dicho proceso es necesario conocer los datos mostrados en la tabla 7.



**Figura 16:** Proceso de flujo para un secador continuo a contracorriente.

**Fuente:** Autores.

**Tabla 7:** Valores considerados en el proceso de secado.

Descripción	Abr.	Valores	Unidad
Capacidad de producción	$L_s$	0.148	$kg/h$
Humedad del sólido a la entrada	$x_1$	0.55	$\%HR$
Humedad del sólido a la salida	$x_2$	0.07	$\%HR$
Humedad del aire a la entrada	$Y_2$	0.019	$Kg\ de\ H_2O/Kg\ de\ aire\ seco$
Temperatura del sólido a la entrada	$T_{s1}$	29	$^{\circ}C$
Temperatura del sólido a la salida	$T_{s2}$	60	$^{\circ}C$
Temperatura del aire a la entrada	$T_{a2}$	100	$^{\circ}C$
Temperatura del aire a la salida	$T_{a1}$	50	$^{\circ}C$
Calor específico del cacao	$C_{ps}$	0.888	$kcal/kg^{\circ}C$
Calor específico del aire	$c$	0.24	$kcal/kg^{\circ}C$

**Fuente:** Autores.

Para la humedad del aire a la entrada ( $Y_2$ ) ver el anexo A, en cuanto a las temperaturas se basó en otras investigaciones realizadas por Saavedra y Rosero.

### 8.2.1.1 Balance de materia con respecto a la humedad.

Para el respectivo balance de materia y energía se utiliza la ecuación 1.

$$GH_2 + L_sX_1 = GY_1 + L_sX_2 \quad (1)$$

siendo,

$G$ = Caudal del aire ( $kg\ de\ aire\ seco / h$ )

$H_2$ = Entalpía del sólido a la salida ( $Kcal/kg$ )

$L_s$ = Capacidad de producción ( $Kg/h$ )

$X_1$ = Humedad del sólido a la entrada

$Y_1$ = Humedad del aire a la salida ( $Kg\ de\ H_2O / Kg\ de\ aire\ seco$ )

$X_2$ = Humedad del sólido a la salida

$$G(0.019) + (0.0296)(0.55) = GY_1 + (0.0296)(0.07)$$

$$GY_1 = 0.019G + 0.014$$

### 8.2.1.2 Cálculo de las entalpías del sólido (cacao).

Para el cálculo de las entalpías se utiliza la ecuación 2 y 3.

$$H_{1(\text{sólido/entrada})} = (Cps + X_1)(Ts_1) \quad (2)$$

siendo,

$H_{1(\text{sólido/entrada})}$  = Entalpía del sólido a la entrada (*Kcal/kg*)

$Cps$  = Calor específico del cacao (*Kcal/kg°C*)

$X_1$  = Humedad del sólido a la entrada

$Ts_1$  = Temperatura del sólido a la entrada (*°C*)

$$H_{1(\text{sólido/entrada})} = (0.888 + 0.55)(29)$$

$$H_{1(\text{sólido/entrada})} = 41.702 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$H_{2(\text{sólido/salida})} = (Cps + X_2)(Ts_2) \quad (3)$$

siendo,

$H_{2(\text{sólido/salida})}$  = Entalpía del sólido a la salida (*Kcal/kg*)

$Cps$  = Calor específico del cacao (*Kcal/kg°C*)

$X_2$  = Humedad del sólido a la salida

$Ts_2$  = Temperatura del sólido a la salida (*°C*)

$$H_{2(\text{sólido/salida})} = (0.888 + 0.07)(60)$$

$$H_{2(\text{sólido/salida})} = 57,48 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

### 8.2.1.3 Cálculo de las entalpías del aire.

Se establece las entalpías del aire usando la ecuación 4 y 5.

$$H_{2(\text{aire/entrada})} = (0.24 + 0.46Y_2)(Ta_2) + 597.2Y_2 \quad (4)$$

siendo,

$H_{2(\text{aire/entrada})}$  = Entalpía del aire a la entrada (*Kcal/kg*)

$Y_2$  = Humedad del aire a la entrada (*Kg de H<sub>2</sub>O / Kg de aire seco*)

$T_{a_2}$  = Temperatura del aire a la entrada ( $^{\circ}C$ )

$$H_{2(\text{aire/entrada})} = [(0.24 + 0.46(0.019)] (100) + 597.2(0.019)$$

$$H_{2(\text{aire/entrada})} = 36.221 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$H_{1(\text{aire/salida})} = (0.24 + 0.46Y_1)(T_{a_1}) + 597.2Y_1 \quad (5)$$

siendo,

$H_{1(\text{aire/salida})}$  = Entalpía del aire a la salida ( $Kcal/kg$ )

$Y_1$  = Humedad del aire a la salida ( $Kg$  de  $H_2O$  /  $Kg$  de aire seco)

$T_{a_1}$  = Temperatura del aire a la salida ( $^{\circ}C$ )

$$H_{1(\text{aire/salida})} = [(0.24 + 0.46Y_1)] (50) + 597.2Y_1$$

$$H_{1(\text{aire/salida})} = 12 + 620.2Y_1$$

#### 8.2.1.4 Balance de calor.

Una vez obtenido las entalpías del aire y del sólido se realiza el respectivo balance de calor, considerando al sistema como adiabático, por lo que  $q = 0$ .

$$\begin{aligned} H_{1(\text{entalpía/sólido/entrada})} \times L_s + H_{2(\text{entalpía/aire/entrada})}G &= \\ = H_{2(\text{entalpía/sólido/salida})} \times L_s + H_{1(\text{entalpía/aire/salida})} \times G + q & \quad (6) \end{aligned}$$

siendo,

$H_{1(\text{entalpía/sólido/entrada})}$  = Entalpía del sólido a la entrada ( $Kcal/kg$ )

$L_s$  = Capacidad de producción ( $Kg/h$ )

$H_{2(\text{entalpía/aire/entrada})}$  = Entalpía del aire a la entrada ( $Kcal/kg$ )

$G$  = Caudal del aire ( $kg$  de aire seco /  $h$ )

$H_{2(\text{entalpía/sólido/salida})}$  = Entalpía del sólido a la salida ( $Kcal/kg$ )

$H_{1(\text{entalpía/aire/salida})}$  = Entalpía del aire a la salida ( $Kcal/kg$ )

$q$  = Cantidad de calor perdido ( $Kcal/h$ )

$$41.702(0.0296) + 36.221G = 57.48(0.0296) + (12 + 620.2Y_1)G$$

$$1.234 + 36.221G = 1.701 + 12G + 620.2GY_1$$

$$G = 0.736 \frac{Kg(aire - seco)}{h}$$

### 8.2.1.5 Cálculo de la humedad de salida del aire.

Reemplazando el valor obtenido en la ecuación 6 se obtendrá la humedad del aire en la salida.

$$Y_1 = \frac{0.019(0.736) + 0.014}{0.736}$$

$$Y_1 = 0.038 \frac{Kg \times H_2O}{Kg}$$

### 8.2.1.6 Cálculo de la entalpía del aire a la salida.

Sustituyendo la humedad del aire se obtiene la entalpía del aire a la salida.

$$H_{1(aire/salida)} = 12 + 620.2(0.038)$$

$$H_{1(aire/salida)} = 35.568 \frac{kcal}{kg}$$

### 8.2.1.7 Cálculo de la cantidad de calor perdido.

Para establecer la cantidad de calor perdido se tiene el 20% de la entalpía total del aire, sustituyendo los valores calculados anteriormente en la ecuación 7 se obtiene:

$$q = G \times F \times H_{2(entalpía/aire/entrada)} \quad (7)$$

siendo,

$q$ = Cantidad de calor perdido ( $Kcal/h$ )

$G$ = Caudal del aire ( $(kg \text{ de aire seco}) / h$ )

$F$ = Pérdidas de calor de la entalpía total del aire

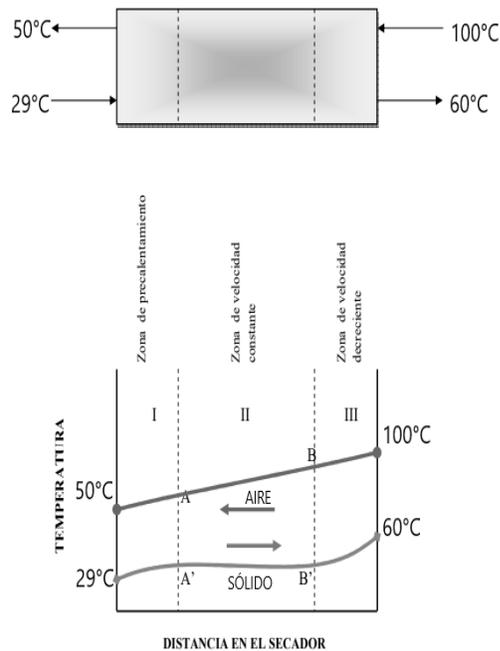
$H_2(\text{entalpía/aire/entrada}) = \text{Entalpía del aire a la entrada (Kcal/kg)}$

$$q = 0.736 \times 0.2 \times 36.221$$

$$q = 5.332 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

### 8.2.1.8 Cálculo de las entalpías en la zona II.

Para la realización del cálculo de las entalpías de esta zona primero se identifica a través de la figura 17 las tres zonas del secador continuo tipo túnel.



**Figura 17:** Temperaturas del túnel de secado.

**Fuente:** Córdova (2009).

Posteriormente, se impone que toda la evaporación del agua se efectúa en esta zona, por lo que se empleará el valor de 45°C, dado que será más fácil llegar a los 60°C.

Con los datos antes calculados y con las ecuaciones 8 y 9 se procede a definir las entalpías de esta zona.

$$H_{A'} = (Cps + X_1)T_{interfase} \quad (8)$$

siendo,

$H_{A'}$  = Entalpía de la zona II a la entrada ( $Kcal/kg$ )

$Cps$  = Calor específico del cacao ( $Kcal/kg^{\circ}C$ )

$X_1$  = Humedad del sólido a la entrada

$T_{interfase}$  = Temperatura interfase ( $^{\circ}C$ )

$$H_{A'} = (0.888 + 0.55)45$$

$$H_{A'} = 64.71 \frac{kcal}{kg}$$

$$H_{B'} = (Cps + X_2)T_{interfase} \quad (9)$$

siendo,

$H_{B'}$  = Entalpía de la zona II a la salida ( $Kcal/kg$ )

$Cps$  = Calor específico del cacao ( $Kcal/kg^{\circ}C$ )

$X_2$  = Humedad del sólido a la salida

$T_{interfase}$  = Temperatura interfase ( $^{\circ}C$ )

$$H_{B'} = (0.888 + 0.07)45$$

$$H_{B'} = 43.11 \frac{kcal}{kg}$$

### 8.2.1.9 Cálculo del número de elementos de transmisión

El cálculo del número de elementos de transmisión ha de efectuarse separadamente para cada zona, por lo que vamos a suponer que en las zonas I y III las pérdidas totales de calor son del 10 %, mientras que en la zona II son del 40 %. La zona III será la más corta, dado que la diferencia de temperaturas es la más elevada, metodología que es usada por (Ocon y Tojo, 1970).

#### 8.2.1.9.1 Cálculo del número de elementos de transmisión en la Zona III

Se procede a identificar la zona III del secador mediante la figura 17, para posteriormente determinar el calor cedido por el aire mediante la ecuación 10.

$$G \times C \times (T_{a_2} - T_B) = G \times c \times (T_1 - T_B) \quad (10)$$

siendo,

$G$  = Caudal del aire ((*kg de aire seco*) / *h*)

$c$  = Calor específico del aire (*kcal / kg°C*)

$T_{a_2}$  = Temperatura del aire a la entrada (*°C*)

$T_{s_1}$  = Temperatura del sólido a la entrada (*°C*)

$T_B$  = Temperatura de salida de la zona III (*°C*)

$$0.736 \times 0.24 \times (100 - T_B) = G \times c \times (T_1 - T_B)$$

Se establece el calor absorbido por el sólido con la ecuación 11.

$$C_a = L_s \times (H_2 - H_{B'}) \quad (11)$$

siendo,

$C_a$  = Calor absorbido por el sólido (*kcal/h*)

$L_s$  = Capacidad de producción (*Kg/h*)

$H_{2(entalpía/sólido/salida)}$  = Entalpía del sólido a la salida (*Kcal/kg*)

$H_{B'}$  = Entalpía de la zona II a la salida (*Kcal/kg*)

$$C_a = 0.0296(57.48 - 43.11)$$

$$C_a = 0.425 \frac{kcal}{h}$$

Se procede a determinar el calor perdido al exterior:

$$\% \times q = 0.1 \times 5.332$$

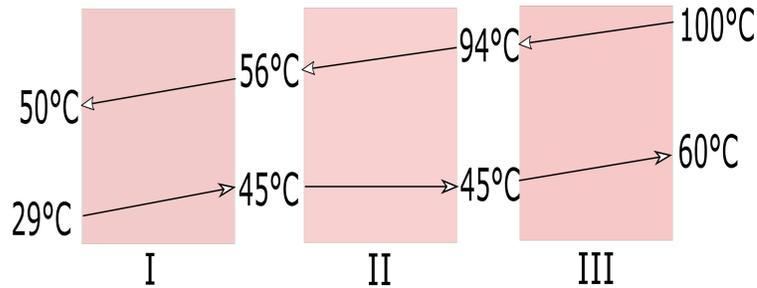
$$\% \times q = 0.533 \frac{kcal}{h}$$

Ahora con los resultados obtenidos, se obtiene la temperatura de salida de esta zona:

$$0.736 \times 0.24 \times (100 - T_B) = 0.425 + 0.533$$

$$T_B = 94.577 \text{ } ^\circ C$$

La diferencia media de temperaturas entre el aire y el sólido para esta zona será:



**Figura 18:** Diferencias de temperaturas en cada zona.

**Fuente:** Autores.

$$(\Delta T)_{log} = \frac{40 + 49.577}{2}$$

$$(\Delta T)_{log} = 44.789 \text{ } ^\circ C$$

Si no hubiera pérdidas al exterior, la temperatura de salida del aire de esta zona sería:

$$G \times c \times (T_{a_2} - T_{B'}) = 0.425 \tag{12}$$

siendo,

G= Caudal del aire ((kg de aire seco) / h)

c= Calor específico del aire (kcal / kg $^\circ C$ )

$T_{a_2}$ = Temperatura del aire a la entrada ( $^\circ C$ )

$T_B$ = Temperatura del salida de la zona III ( $^\circ C$ )

$$0.736 \times 0.24 \times (100 - T_{B'}) = 0.425$$

$$T_{B'} = 97.594 \text{ } ^\circ C$$

Por consiguiente,

$$\Delta T' = T_{a_2} - T_{B'}$$

$$\Delta T' = 100 - 97.594$$

$$\Delta T' = 2.406 \text{ } ^\circ C$$

Finalmente, para el cálculo del número de elementos de transmisión para esta zona se emplea la ecuación 13.

$$(N_{OT})_{III} = \frac{\Delta T'}{(\Delta T)_{log}} \quad (13)$$

siendo,

$(N_{OT})_{III}$  = Número de elemento de transmisión para la zona III

$\Delta T'$  = Diferencia de temperaturas entre el aire a la entrada y la salida de la zona III ( $^\circ C$ )

$(\Delta T)_{log}$  = Diferencia media de temperaturas entre el aire y el sólido de la zona III ( $^\circ C$ )

$$(N_{OT})_{III} = 0.054$$

### 8.2.1.9.2 Cálculo del número de elementos de transmisión en la Zona I

Por balance de entalpías se calcula la temperatura de entrada empleando la ecuación 14.

$$G \times c \times (T_A - T_{a1}) = L_s(H_{A'} - H_1) + \% \times q \quad (14)$$

siendo,

$G$  = Caudal del aire ((kg de aire seco) / h)

$c$  = Calor específico del aire (kcal / kg $^\circ C$ )

$T_A$  = Temperatura de entrada de la zona I ( $^\circ C$ )

$T_{a1}$  = Temperatura del aire a la salida ( $^\circ C$ )

$L_s$  = Capacidad de producción (Kg/h)

$H_{A'}$  = Entalpía de la zona II a la entrada (Kcal/kg)

$H_{1(sólido/entrada)}$  = Entalpía del sólido a la entrada (Kcal/kg)

$\% \times q$  = Calor perdido al exterior

$$0.736 \times 0.24 \times (T_A - 50) = 0.0296(64.71 - 41.702) + 0.533$$

$$T_A = 56.873 \text{ } ^\circ C$$

Se calcula la diferencia media de temperaturas entre el aire y el sólido para esta zona.

$$(\Delta T)_{log} = \frac{11.873 + 45}{2}$$

$$(\Delta T)_{log} = 28.437 \text{ } ^\circ C$$

Si no hubiera pérdidas al exterior se calcula la temperatura de entrada por medio de la ecuación 15.

$$G \times C \times (T_A - T_{a1}) = L_s(H_{A'} - H_1) \quad (15)$$

siendo,

$G$ = Caudal del aire ((kg de aire seco) / h)

$c$ = Calor específico del aire (kcal / kg $^\circ C$ )

$T_A$ = Temperatura de entrada de la zona I ( $^\circ C$ )

$T_{a1}$ = Temperatura del aire a la salida ( $^\circ C$ )

$L_s$ = Capacidad de producción (Kg/h)

$H_{A'}$ = Entalpía de la zona II a la entrada (Kcal/kg)

$H_{1(sólido/entrada)}$ = Entalpía del sólido a la entrada (Kcal/kg)

$$0.736 \times 0.24 \times (T_A - 50) = 0.0296(64.71 - 41.702)$$

$$T_{A'} = 53.856 \text{ } ^\circ C$$

Por consiguiente,

$$\Delta T' = T_{A'} - T_{a1}$$

$$\Delta T' = 53.856 - 50$$

$$\Delta T' = 3.856 \text{ } ^\circ C$$

Por lo que, el número de elementos de transmisión para esta zona se calcula con la ecuación 16.

$$(N_{OT})_I = \frac{\Delta T'}{(\Delta T)_{log}} \quad (16)$$

siendo,

$(N_{OT})_I$  = Número de elemento de transmisión para la zona I

$\Delta T'$  = Diferencia de temperaturas entre el aire a la entrada y la salida de la zona I ( $^{\circ}C$ )

$(\Delta T)_{log}$  = Diferencia media de temperaturas entre el aire y el sólido de la zona I ( $^{\circ}C$ )

$$(N_{OT})_I = 0.136$$

### 8.2.1.9.3 Cálculo del número de elementos de transmisión en la Zona II

En esta zona la disminución de la temperatura del aire se calcula con la ecuación 17.

$$\Delta T = T_B - T_A \quad (17)$$

siendo,

$\Delta T$  = Disminución de la temperatura del aire con pérdidas ( $^{\circ}C$ )

$T_A$  = Temperatura de entrada de la zona I ( $^{\circ}C$ )

$T_B$  = Temperatura de salida de la zona III ( $^{\circ}C$ )

$$\Delta T = 94.577 - 56.873$$

$$\Delta T = 37.704 \text{ } ^{\circ}C$$

Para la disminución de la temperatura por pérdidas de calor al exterior se emplea la ecuación 18.

$$\Delta T_p = \frac{x_1 \times q}{G \times \%} \quad (18)$$

siendo,

$\Delta T_p$  = pérdidas de calor al exterior ( $^{\circ}C$ )

$x_1$  = pérdidas de calor en la zona II (%)

$q$  = Cantidad de calor perdido ( $Kcal/h$ )

$G$  = Caudal del aire ( $kg$  de aire seco /  $h$ )

$\%$  = Diferencia de temperaturas entre  $T_A$  y  $T_{interfase}$  (%)

$$\Delta T_p = \frac{0.4 \times 5.332}{0.736 \times 0.119}$$

$$\Delta T_p = 24.351 \text{ } ^\circ C$$

Si no existiera perdidas, la disminuci3n de temperatura del aire se determina con la ecuaci3n 19.

$$\Delta T' = \Delta T - \Delta T_p \tag{19}$$

siendo,

$\Delta T'$  = Disminuci3n de la temperatura del aire sin p3rdidas ( $^\circ C$ )

$\Delta T$  = Disminuci3n de la temperatura del aire con p3rdidas ( $^\circ C$ )

$\Delta T_p$  = p3rdidas de calor al exterior ( $^\circ C$ )

$$\Delta T = 37.704 - 24.351$$

$$\Delta T = 13.353 \text{ } ^\circ C$$

A continuaci3n, se calcula la diferencia media de temperaturas entre el aire y el s3lido para esta zona:

$$(\Delta T)_{log} = \frac{49.577 - 11.873}{\ln\left(\frac{49.577}{11.873}\right)}$$

$$(\Delta T)_{log} = 26.38 \text{ } ^\circ C$$

Para conocer el n3mero de elementos de transmisi3n para esta zona se utiliza la ecuaci3n 20.

$$(N_{OT})_{II} = \frac{\Delta T'}{(\Delta T)_{log}} \tag{20}$$

siendo,

$(N_{OT})_{II}$  = N3mero de elemento de transmisi3n para la zona II

$\Delta T'$  = Diferencia de temperaturas entre el aire a la entrada y la salida de la zona II ( $^\circ C$ )

$(\Delta T)_{log}$  = Diferencia media de temperaturas entre el aire y el s3lido de la zona II ( $^\circ C$ )

$$(N_{OT})_{II} = \frac{13.353}{26.38}$$

$$(N_{OT})_{II} = 0.506$$

### 8.2.1.10 Cálculo del número total de elementos de transmisión

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a determinar el número total de elementos de transmisión para el secador de túnel:

$$N_{OT} = 0.136 + 0.506 + 0.054$$

$$N_{OT} = 0.696$$

### 8.2.1.11 Cálculo de la altura del elemento de transmisión del calor

Para calcular la altura del elemento de transmisión del calor se emplea la ecuación 21.

$$H_{OT} = \frac{57 \times c \times G^{0.2}}{a} \quad (21)$$

siendo,

$H_{OT}$  = Altura del elemento de transmisión de calor

$c$  = Calor específico del aire ( $kcal / kg^{\circ}C$ )

$G$  = Caudal del aire ( $(kg \text{ de aire seco}) / h$ )

$a$  = Coeficiente de convección ( $W / m^2 \times K$ )

$$H_{OT} = \frac{57 \times 0.24 \times 0.736^{0.2}}{2.862}$$

$$H_{OT} = 4.496$$

### 8.2.1.12 Cálculo de la longitud del túnel de secado

Conociendo la altura y el número de elementos de transmisión, se procede a determinar la

longitud de la cámara de secado aplicando la ecuación 22.

$$z = [(H_{OT} \times N_{OT})]_I + [(H_{OT} \times N_{OT})]_{II} + [(H_{OT} \times N_{OT})]_{III} \quad (22)$$

siendo,

$z$  = Longitud del túnel de secado ( $m$ )

$H_{OT}$  = Altura del elemento de transmisión de calor

$(N_{OT})_I$  = Número de elemento de transmisión para la zona I

$(N_{OT})_{II}$  = Número de elemento de transmisión para la zona II

$(N_{OT})_{III}$  = Número de elemento de transmisión para la zona III

$$z = [(4.496 \times 0.136)]_I + [(4.496 \times 0.506)]_{II} + [(4.496 \times 0.054)]_{III}$$

$$z = 3.13 \text{ m}$$

### 8.2.2. Dimensionamiento de la banda transportadora

Se procede a calcular los esfuerzos tangenciales que existen en el tambor motriz para el cálculo de sus dimensiones.

#### 8.2.2.1 Cálculo del esfuerzo tangencial de ida

$$Fa = [L \times Cq \times Ct \times f (q_b + q_G + q_{RO}) \pm (q_G + q_b) \times H] \times 0,981 \quad (23)$$

siendo,

$Fa$  = Esfuerzo tangencial de ida ( $daN$ )

$L$  = Longitud de la banda ( $m$ )

$Cq$  = Coeficiente de resistencias fijas

$Ct$  = Coeficiente de resistencias pasivas

$f$  = Coeficiente de rozamiento interior del material y los elementos giratorios

$q_b$  = Peso de la banda por metro lineal ( $kg/m^2$ )

$q_G$  = Peso del material por metro lineal ( $kg/m$ )

$q_{RO}$  = Peso de las partes giratorias superiores ( $kg/m$ )

$H$  = Desnivel de la banda ( $m$ )

Se sabe por el diseño que la longitud de la banda será de  $L = 5.3 \text{ m}$

Se escoge un valor de la tabla 8 de  $Cq = 4.5$  debido a que la distancia entre los centros de los tambores es menor a 10 m.

**Tabla 8:** Coeficiente de resistencias fijas.

Centres m	Cq
10	4.5
20	3.2
30	2.6
40	2.2
50	2.1
60	2.0
80	1.8
100	1.7
150	1.5
200	1.4
250	1.3
300	1.2
400	1.1
500	1.05
1000	1.03

**Fuente:** Rumelca.

Según la tabla 9 vemos que para una temperatura de 20° o mayor se escoge un valor de  $Ct$  de 1.

$$Ct = 1$$

**Tabla 9:** Coeficiente de las resistencias pasivas debidas a la temperatura.

Temperature °C	+ 20°	+ 10°	0	- 10°	- 20°	- 30°
Fattore Ct	1	1,01	1,04	1,10	1,16	1,27

**Fuente:** Rumelca.

Según la velocidad de la banda transportadora, la cual será baja para transportar de forma eficiente las semillas de cacao, se elige el valor del coeficiente de rozamiento en la tabla

28 y con una velocidad de 1  $m/s$ .

$$f = 0.016$$

**Tabla 10:** Coeficiente de rozamiento interior  $f$  del material y de los elementos giratorios.

Horizontal belt conveyor rising and gently falling	speed m/s					
	1	2	3	4	5	6
Rotating parts and material with standard internal friction	0,0160	0,0165	0,0170	0,0180	0,0200	0,0220
Rotating parts and material with high internal friction in difficult working conditions	from 0,023 to 0,027					
Rotating parts of a conveyor in descent with a brake motor	from 0,012 to 0,016					

**Fuente:** Rumelca.

Se procede a calcular el peso de la banda por metro lineal utilizando la ecuación 24.

$$q_b = q_{bn} + 1.15 \times (4 + 2) \quad (24)$$

siendo,

$q_b$  = Peso de la banda por metro lineal ( $kg/m^2$ )

$q_{bn}$  = Peso del núcleo de la correa ( $kg/m^2$ )

Con ayuda de la tabla 11, se escoge el valor que corresponde a una resistencia de 200  $N/mm$  para la banda, debido a que no soportará mucho peso de las semillas de cacao.

$$q_{bn} = 2 \text{ kg}/m^2$$

**Tabla 11:** Peso del núcleo de la correa ( $q_{bn}$ ).

Breaking force of belt N/mm	Belt with textile inserts (EP) Kg/m <sup>2</sup>	Belt with metal inserts Steel Cord (ST) Kg/m <sup>2</sup>
200	2.0	-
250	2.4	-
315	3.0	-
400	3.4	-
500	4.6	5.5
630	5.4	6.0
800	6.6	8.5
1000	7.6	9.5
1250	9.3	10.4
1600	-	13.5
2000	-	14.8
2500	-	18.6
3150	-	23.4

**Fuente:** Rumelca.

$$q_b = 2 + 1.15 \times (4 + 2) = 8.9 \text{ kg/m}^2$$

Así mismo, se calcula el peso del material por metro lineal empleando la ecuación 25.

$$q_G = \frac{I_v}{3.6 \times v} \quad (25)$$

siendo,

$v$  = Velocidad de la banda ( $m/s$ )

$I_v$  = Capacidad de transporte de la banda ( $T/h$ )

Entonces, con una velocidad de  $v = 1 \text{ m/s}$  y una capacidad de transporte de  $I_v = 0.002 \text{ T/h}$  obtenemos:

$$q_G = \frac{0.002}{3.6 \times 1} = 5.56 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$$

El peso de las partes giratorias superiores está dado por:

$$q_{RO} = \frac{P_{prs}}{a_0} \quad (26)$$

Según la tabla 12, se escoge los valores que corresponden para un ancho de banda de 800 mm y un diámetro de los rodillos de 89 mm (Ver anexo B), por lo que el peso de las partes giratorias superiores e inferiores es de:

$$P_{prs} = 10.4 \text{ kg}$$

$$P_{pri} = 7.8 \text{ kg}$$

**Tabla 12:** Peso de las partes giratorias de los rodillos de las estaciones (sup/inf).

Belt width mm	Roller diameter mm									
	89		108		133		159		194	
	Pprs Kg	Ppri	Pprs	Ppri	Pprs	Ppri	Pprs	Ppri	Pprs	Ppri
400	—	—	—							
500	5.1	3.7	—							
650	9.1	6.5	—							
800	10.4	7.8	16.0	11.4	—					
1000	11.7	9.1	17.8	13.3	23.5	17.5				
1200			20.3	15.7	26.7	20.7	—			
1400					29.2	23.2	—			
1600					31.8	25.8	—			
1800							47.2	38.7	70.5	55.5
2000							50.8	42.2	75.3	60.1
2200							—	—	—	—

**Fuente:** Rumelca.

El peso específico del cacao es menor a  $1.2 \text{ t/m}^3$  por lo que se escoge el siguiente valor de la tabla 13 para el paso aconsejable de las estaciones.

$$a_0 = 1.50 \text{ m}$$

**Tabla 13:** Paso máximo aconsejable para las estaciones.

Belt width mm	Pitch of sets upper specific weight of conveyed material t/m <sup>3</sup>			lower m
	< 1.2 m	1.2 ÷ 2.0 m	> 2.0 m	
300	1.65	1.50	1.40	3.0
400				
500				
650				
800	1.50	1.35	1.25	3.0
1000	1.35	1.20	1.10	3.0
1200	1.20	1.00	0.80	3.0
1400				
1600				
1800				
2000	1.00	0.80	0.70	3.0
2200				

**Fuente:** Rumelca.

$$q_{RO} = \frac{10.4}{1.50} = 6.93 \text{ kg/m}$$

Una vez que se tienen todas las variables para la ecuación, se procede a calcular la fuerza tangencial de ida. La banda está en posición horizontal, por lo que el valor de  $H$  que corresponde al desnivel de la banda se establece en 0.

$$H = 0 \text{ m}$$

$$Fa = [5.3 \times 4.5 \times 1 \times 0.016 (8.9 + 5.56 \times 10^{-4} + 6.93)] \times 0.981 = 5.93 \text{ daN} = 59.3 \text{ N}$$

### 8.2.2.2 Cálculo de la fuerza tangencial de retorno.

$$Fr = [L \times Cq \times Ct \times f (q_b + q_{RU}) \pm (q_b \times H)] \times 0.981 \quad (27)$$

Peso de las partes giratorias inferiores.

$$q_{RU} = \frac{P_{pri}}{a_u} \quad (28)$$

De la tabla 13 podemos obtener el paso aconsejable para las estaciones de retorno y con el peso de las estaciones inferiores obtenemos:

$$a_u = 3 \text{ m}$$
$$q_{RU} = \frac{7.8}{3} = 2.6 \text{ kg/m}$$

Con todos los datos obtenemos la fuerza tangencial de retorno:

$$Fr = [5.3 \times 4.5 \times 1 \times 0.016 (8.9 + 2.6) \pm (8.9 \times 0)] \times 0.981 = 4.3 \text{ daN} = 43 \text{ N}$$

### 8.2.2.3 Cálculo de la fuerza tangencial total

Para la obtención de la fuerza tangencial total se suma la fuerza tangencial de ida y de retorno.

$$Fu = Fa + Fr \quad (29)$$

siendo,

$Fu$  = Esfuerzo tangencial total ( $daN$ )

$Fa$  = Esfuerzo tangencial de ida ( $daN$ )

$Fr$  = Esfuerzo tangencial de retorno ( $daN$ )

$$Fu = 5.93 + 4.3 = 10.23 \text{ daN} = 102.3 \text{ N}$$

### 8.2.2.4 Cálculo de las tensiones de la banda

En la figura 19 se muestra la distribución de las fuerzas que actúan sobre la banda transportadora. En primer lugar, se procede a calcular  $T_2$  haciendo uso de la ecuación 30, ya que las otras fuerzas implican a  $T_2$ .



**Figura 19:** Tensiones de la banda.

**Fuente:** Rumelca.

$$T_2 = Fu \times Cw \quad (30)$$

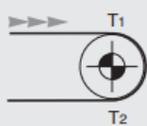
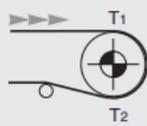
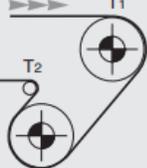
siendo,

$Fu$  = Esfuerzo tangencial total ( $daN$ )

$Cw$  = Factor de abrazamiento

Se tiene un ángulo de abrazamiento de  $180^\circ$  entre el tambor y la banda transportadora, además, al final de la banda existe un sistema de tensión por lo que el valor escogido es  $Cw = 0.8$  desde la tabla 14.

**Tabla 14:** Valores de factor de abrazamiento  $C_w$  según ángulo.

Drive arrangement	Angle of wrap	tension unit or counterweight pulley		screw tension unit pulley	
		unlagged	lagged	unlagged	lagged
	180°	0.84	0.50	1.20	0.80
	200°	0.72	0.42	1.00	0.75
	210°	0.66	0.38	0.95	0.70
	220°	0.62	0.35	0.90	0.65
	240°	0.54	0.30	0.80	0.60
	380°	0.23	0.11	-	-
	420°	0.18	0.08	-	-

**Fuente:** Rumelca.

Entonces, con todos los datos obtenidos se calcula la tensión  $T_2$ .

$$T_2 = 10.23 \times 0.8 = 8.184 \text{ daN} = 81.84 \text{ N}$$

Ahora, se calcula la tensión  $T_1$ .

$$T_1 = Fu + T_2 \tag{31}$$

siendo,

$Fu$  = Esfuerzo tangencial total (daN)

$T_2$  = Tensión dos de la banda transportadora (daN)

$$T_1 = 10.23 + 8.184 = 18.414 \text{ daN} = 184.14 \text{ N}$$

Por último, podemos calcular  $T_3$ .

$$T_3 = T_2 + Fr \tag{32}$$

siendo,

$T_2 =$  Tensión 2 de la banda transportadora ( $daN$ )

$Fr =$  Esfuerzo tangencial de retorno ( $daN$ )

$$T_3 = 8.184 + 4.3 = 12.484 \text{ daN} = 124.84 \text{ N}$$

### 8.2.2.5 Dimensionamiento de los tambores

Según la tabla 15 del catálogo de Rumelca se escoge un diámetro de 200  $mm$  para el tambor motriz y un diámetro de 160  $mm$  para el contratambor.

**Tabla 15:** Diámetros mínimos recomendados para los tambores.

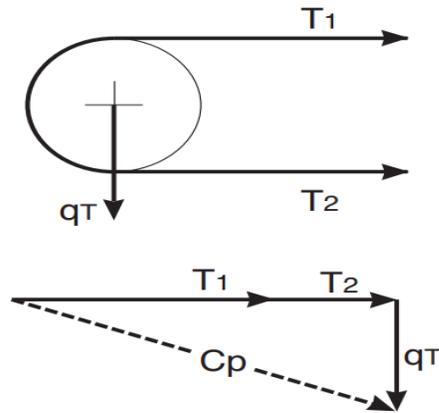
Belt breaking load N/mm	Belt with textile core EP DIN 22102			Belt with steel core ST DIN 22131		
	Ø motorised pulley mm	return pulley	direction change drum	Ø motorised pulley mm	return pulley	direction change pulley
200	200	160	125	-	-	-
250	250	200	160	-	-	-
315	315	250	200	-	-	-
400	400	315	250	-	-	-
500	500	400	315	-	-	-
630	630	500	400	-	-	-
800	800	630	500	630	500	315
1000	1000	800	630	630	500	315
1250	1250	1000	800	800	630	400
1600	1400	1250	1000	1000	800	500
2000	-	-	-	1000	800	500
2500	-	-	-	1250	1000	630
3150	-	-	-	1250	1000	630

Fuente: Rumelca.

#### 8.2.2.5.1 Cálculo del eje del tambor motriz

Para hallar el diámetro del eje del tambor motriz es necesario algunas variables, como son la resultante de las tensiones  $Cp$ , el momento de flexión  $Mf$ , el momento de torsión  $Mt$ , el

momento ideal de flexión  $Mif$  y el módulo de resistencia  $W$ .



**Figura 20:** Diagrama de cuerpo libre.

**Fuente:** Rumelca.

$$C_p = \sqrt{(T_1 + T_2)^2 + q_t^2} \quad (33)$$

siendo,

$C_p$  = Resultante de las tensiones de la banda ( $daN$ )

$T_1$  = Tensión 1 de la banda transportadora ( $daN$ )

$T_2$  = Tensión 2 de la banda transportadora ( $daN$ )

$q_t$  = Peso del tambor motriz ( $daN$ )

$$C_p = \sqrt{(18.414 + 8.184)^2 + 380^2} = 380.93 \text{ daN} = 3,809.3 \text{ N}$$

$$Mf = \frac{C_p}{2} \times a_g \quad (34)$$

$$Mf = \frac{380.93}{2} \times 0.18 = 34.28 \text{ daNm} = 342.8 \text{ N} \cdot m$$

$$Mt = \frac{P}{n} \times 954.9 \quad (35)$$

Siendo  $P$  la potencia absorbida y  $n$  el número de revoluciones:

$$n = \frac{v \times 1,000 \times 60}{D \times \pi} \quad (36)$$

siendo,

$v$  = Velocidad de la banda transportadora ( $m/s$ )

$D$  = Diámetro del tambor motriz

$$n = \frac{1 \times 1,000 \times 60}{200 \times \pi} = 95.5 \text{ rpm}$$
$$P = \frac{Fu \times v}{100 \times \eta} \quad (37)$$

siendo,

$P$  = Potencia absorbida ( $Kw$ )

$v$  = Velocidad de la banda transportadora ( $m/s$ )

$\eta$  = Eficiencia

Se reemplazan los valores de la velocidad de la banda  $v = 1 \text{ m/s}$  y la eficiencia  $\eta = 0.86$ .

$$P = \frac{10.23 \times 1}{100 \times 0.86} = 0.11 \text{ Kw}$$

$$Mt = \frac{0.11}{95.5} \times 954.9 = 1.09 \text{ daNm} = 10.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$Mif = \sqrt{Mf^2 + 0.75Mt^2} \quad (38)$$

$$Mif = \sqrt{34.28^2 + 0.75(1.09)^2} = 34.29 \text{ daNm} = 342.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$W = \frac{Mif \times 1,000}{\sigma_{amm}} \quad (39)$$

El esfuerzo admisible  $\sigma_{amm}$  del acero es de  $7.82 \text{ daN/mm}^2$

$$W = \frac{34.29 \times 1,000}{7.82} = 4,384.91 \text{ mm}^3$$

Por lo tanto, el diámetro del eje del tambor motriz es de:

$$d = \sqrt[3]{\frac{W \times 32}{\pi}} \quad (40)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4,384.91 \times 32}{\pi}} = 35.48 \text{ mm}$$

### 8.2.2.5.2 Cálculo del eje del contratambor

Una vez obtenidos los diámetros correctos para el tambor motriz y el contratambor, se deben calcular los diámetros de sus respectivos ejes.

$$C_{pr} = \sqrt{(2 * T_3)^2 + q_r^2}$$

$$C_{pr} = \sqrt{(2 * 12.484)^2 + 83^2} = 86.67 \text{ daN} = 866.7 \text{ N}$$

$$Mif = \frac{C_{pr}}{2} \times a_g$$

$$Mif = \frac{86.67}{2} \times 0.18 = 7.8 \text{ daNm} = 78 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$W = \frac{7.8 \times 1,000}{7.82} = 997.44 \text{ mm}^3$$

Por lo tanto, el diámetro del eje del contratambor es de:

$$d = \sqrt[3]{\frac{997.44 \times 32}{\pi}} = 21.66 \text{ mm}$$

### 8.2.2.6 Cálculo y selección de las chumaceras

Después de haber calculado los ejes para los tambores es necesario saber qué tipo de chumacera será necesaria, sabiendo que soportará la carga de la banda transportadora, de los tambores y sus respectivos ejes.

$$f_h = f_n \times \frac{C_r}{P_r} \quad (41)$$

siendo,

$f_h$  = Factor de vida

$f_n$  = Factor de velocidad

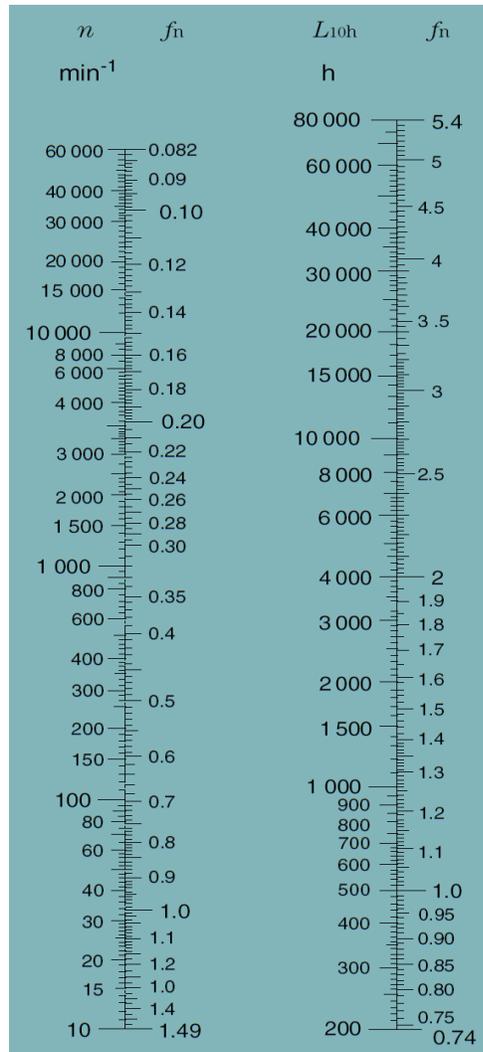
$C_r$  = Capacidad básica de carga dinámica (N)

$P_r$  = Carga dinámica equivalente (N)

Se procede a despejar la carga dinámica ( $C_r$ ) de la ecuación 41 quedando de la siguiente manera:

$$C_r = \frac{f_h}{f_n} \times P_r \quad (42)$$

A continuación, se procede a calcular el factor de velocidad ( $f_n$ ) y el factor de vida ( $f_h$ ) con ayuda de la figura 21.



**Figura 21:** Escala para el cálculo de la vida nominal básica.

**Fuente:** Catálogo NTN.

Al establecer las rpm en 95.5 se puede hallar el factor de velocidad  $f_n = 0.7$  con una vida nominal básica de trabajo en 20,000 h se halla el factor de vida  $f_h = 3.4$  obteniendo como

resultado una capacidad básica de carga de:

$$Cr = \frac{3.4}{0.7} \times 3,800 = 18.46 \text{ kN}$$

$$Cr = \frac{3.4}{0.7} \times 1,185.8 = 5.76 \text{ kN}$$

Al buscar en el catálogo el valor de la carga dinámica calculada se selecciona las siguientes chumaceras, ver Anexo C.

**Tabla 16:** Selección de chumaceras.

Diámetro del eje(mm)	Número de la chumacera
25	F-UCPM205/P03
40	F-UCPM208/P03

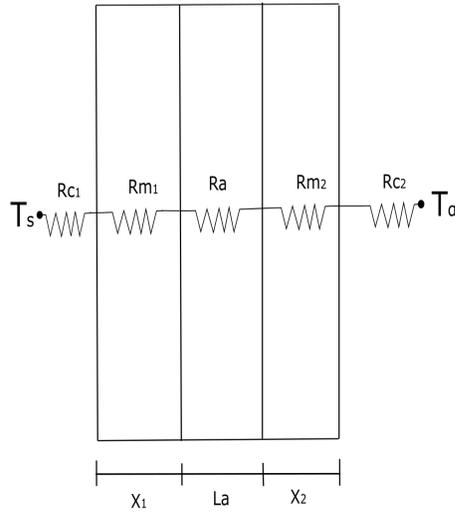
### 8.2.3. Dimensionamiento del aislante para la cámara de secado

Las paredes de la cámara de secado están formadas por capas de aislamiento térmico que evitan las pérdidas de calor de esta, para realizar el cálculo del espesor del aislante térmico se utilizó los siguientes datos mostrados en la tabla 17.

**Tabla 17:** Variables que intervienen en el dimensionamiento del aislante.

Descripción	Abr.	Valores	Unidad
Temperatura en el interior de la cámara	$T_s$	60	$^{\circ}C$
Temperatura en el exterior de la cámara	$T_{\infty}$	20	$^{\circ}C$
Espesor de la pared asumida	$x_1, x_2$	0.5	mm
Conductividad térmica del aislante	$k_1$	0.03	$W/mK$
Conductividad térmica del material	$k_2$	52.5	$W/mK$
Área de la cámara de secado	$A$	3.097	$m^2$
Coefficiente de convección	$h$	25	$W/m^2K$

**Fuente:** Autores.



**Figura 22:** Esquema de temperaturas.

**Fuente:** Autores.

Para determinar el coeficiente de convección ver el anexo D.

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (43)$$

siendo,

$\dot{Q}$  = Flujo de calor ( $W$ )

$h$  = Coeficiente de convección ( $W/m^2K$ )

$A$  = Área de la cámara de secado ( $m^2$ )

$T_s$  = Temperatura en el interior de la cámara ( $^{\circ}K$ )

$T_\infty$  = Temperatura en el exterior de la cámara ( $^{\circ}K$ )

$$\dot{Q} = (25)(3.097)(333.15 - 288.15)$$

$$\dot{Q} = 3,484.125 \text{ W}$$

Con el fin de reducir las pérdidas de calor en un 90 % se aísla las paredes de la cámara de secado con fibra de vidrio, para lo cual se plantea:

$$\dot{Q} = 0.10 \times 3,484.125$$

$$\dot{Q} = 348.413 \text{ W}$$

Ahora se procede a determinar la resistencia total con la ecuación 44.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (44)$$

siendo,

$\dot{Q}$  = Flujo de calor ( $W$ )

$\Delta T'$  = Diferencia de temperaturas entre la interna y externa de la cámara de secado ( $^{\circ}C$ )

$R_{total}$  = Resistencia total ( $K/W$ )

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{333.15 - 288.15}{348.413}$$

$$R_{total} = 0.129 \frac{K}{W}$$

Una vez determinado la resistencia total, se calcula el espesor del aislante para la cámara de secado empleando la ecuación 45.

$$R_{total} = R_{c1} + R_{m1} + R_a + R_{m2} + R_{c2} \quad (45)$$

siendo,

$R_{total}$  = Resistencia total ( $K/W$ )

$R_{c1}$  = Resistencia del coeficiente de convección interna ( $W/(m^2K)(m^2)$ )

$R_{m1}$  = Resistencia del material utilizado ( $m/(W/mK)(m^2)$ )

$R_a$  = Resistencia del aislante utilizado ( $m/(W/mK)(m^2)$ )

$R_{m2}$  = Resistencia del material utilizado ( $m/(W/mK)(m^2)$ )

$R_{c2}$  = Resistencia del coeficiente de convección externa ( $W/(m^2K)(m^2)$ )

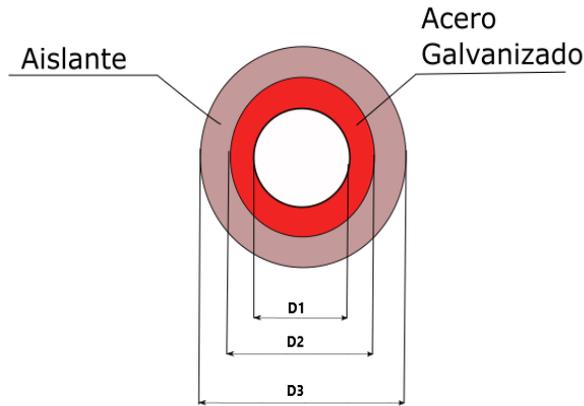
$$R_{total} = \frac{1}{hA} + \frac{x_1}{k_2A} + \frac{L_a}{k_1A} + \frac{x_2}{k_2A} + \frac{1}{hA}$$

$$0.129 = \frac{1}{25 \times 3.097} + \frac{0.0005}{52.5 \times 3.097} + \frac{L_a}{0.03 \times 3.097} + \frac{0.0005}{52.5 \times 3.097} + \frac{1}{25 \times 3.097}$$

$$L_a = 0.00957 \text{ m} = 0.957 \text{ cm}$$

#### 8.2.4. Dimensionamiento del aislante para conductos

Se consideró aislar las paredes de los conductos térmicamente, figura 23, para evitar pérdidas de calor y también para brindar un entorno seguro al operario.



**Figura 23:** Representación esquemática del conducto.

**Fuente:** Autores.

Para establecer el aislante del conducto se requieren de algunos datos que se muestran en la tabla 18, con la finalidad de determinar los coeficientes de convección, ver anexo D.

**Tabla 18:** Valores establecidos para el cálculo del aislante del ducto.

Descripción	Abr.	Valores	Unidad
Coeficiente de convección interior	$h_1$	160	$W/m^2K$
Coeficiente de convección exterior	$h_2$	5.88	$W/m^2K$
Conductividad térmica (fibra de vidrio)	$k_a$	0.03	$W/mK$
Conductividad térmica (acero galvanizado)	$k_m$	52.5	$W/mK$
Diámetro interior	$d_1$	202.7	$mm$
Diámetro exterior	$d_2$	203.2	$mm$
Temperatura interior	$T_{\infty,0}$	100	$^{\circ}C$
Temperatura exterior	$T_{\infty,i}$	20	$^{\circ}C$

**Fuente:** Autores.

Es necesario determinar un aislante térmico para reducir las pérdidas de calor, por lo que se realiza un balance energético y utilizando el concepto de resistencia térmica se obtiene la siguiente ecuación 46.

$$\frac{T_{\alpha,0} - T_{\alpha,i}}{R_{combinada} + R_{aislante} + R_{metal} + R_{convección}} = \frac{T_{\alpha,0}}{R_{total}}$$

$$\frac{T_{\alpha,0} - T_{\alpha,i}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_a L} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_m L} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{T_{\alpha,0}}{\frac{1}{h_{combinada} A}}$$

$$\frac{T_{\alpha,0} - T_{\alpha,i}}{\frac{1}{h_1 \pi D_3 L} + \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi k_a L} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k_m L} + \frac{1}{h_2 \pi D_1 L}} = \frac{T_{\alpha,0}}{\frac{1}{h_1 \pi D_3 L}} \quad (46)$$

siendo,

$T_{\alpha,0}$ =Temperatura interior del ducto ( $^{\circ}C$ )

$T_{\alpha,i}$ =Temperatura exterior del ducto ( $^{\circ}C$ )

$h_1$ = Coeficiente de convección interior ( $W/m^2K$ )

$D_3$ = Diámetro del aislante ( $m$ )

$L$ = Longitud del aislante ( $m$ )

$D_2$ = Diámetro exterior del ducto ( $m$ )

$k_a$ = Conductividad térmica fibra de vidrio ( $W/mK$ )

$D_1$ = Diámetro interior del ducto ( $m$ )

$k_m$ = Conductividad térmica acero galvanizado ( $W/mK$ )

$h_2$ = Coeficiente de convección exterior ( $W/m^2K$ )

Se reorganiza la ecuación 46 y mediante la ecuación 47 se determina el espesor del aislante.

$$\frac{T_{\alpha,0} - T_{\alpha,i}}{T_{\alpha,0}} = 1 + h_1 \times D_3 \left[ \frac{\ln(D_3/D_2)}{2k_a} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2k_m} + \frac{1}{h_2 D_1} \right] \quad (47)$$

siendo,

$T_{\alpha,0}$ =Temperatura interior del ducto ( $^{\circ}C$ )

$T_{\alpha,i}$ =Temperatura exterior del ducto ( $^{\circ}C$ )

$h_1$ = Coeficiente de convección interior ( $W/m^2K$ )

$D_3$ = Diámetro del aislante ( $m$ )

$D_2$ = Diámetro exterior del ducto ( $m$ )

$k_a$ = Conductividad térmica fibra de vidrio ( $W/mK$ )

$D_1$ = Diámetro interior del ducto ( $m$ )

$k_m$  = Conductividad térmica acero galvanizado ( $W/mK$ )

$h_2$  = Coeficiente de convección exterior ( $W/m^2K$ )

$D_1$  = Diámetro interior del ducto ( $m$ )

Ahora, con los datos establecidos inicialmente se procede a reemplazar en la ecuación 47.

$$\frac{100 - 20}{20} = 1 + (5.88)D_3[\ln(D_3/0.2032)/(2 \times 0.03) + \ln(0.2032/0.2027)/(2 \times 52.5) + 1/(160 \times 0.2027)]$$

Resolviendo la ecuación 47 mediante el software EES, se obtiene que el diámetro del aislamiento es:

$$D_3 = 0.2315 \text{ m}$$

Por lo tanto, el espesor del aislamiento necesario para la superficie es:

$$t > \frac{D_3 - D_2}{2} = \frac{0.2315m - 0.2032m}{2} = 0.01 \text{ m}$$

### 8.2.5. Dimensionamiento del motor-reductor

Inicialmente se requiere que la velocidad de la cinta transportadora sea de  $1 \text{ m/s}$  y una carga máxima de  $20 \text{ kg}$ . Se estima que la eficiencia del reductor sea del  $94\%$  y las pérdidas por fricción sean del  $16\%$ , por lo tanto, aplicando la ecuación 48 se obtiene la potencia necesaria.

$$P = \frac{m \times g \times v}{n_{reductor} \times n_{fricción}} \quad (48)$$

siendo,

$P$  = Potencia ( $kW$ )

$g$  = Gravedad ( $m/s^2$ )

$m$  = Carga máxima ( $kg$ )

$v$  = Velocidad de la cinta transportadora ( $m/s$ )

$n_{reductor}$  = Eficiencia del reductor (%)

$n_{fricción}$  = Pérdidas por fricción (%)

$$P = \frac{20 \times 9.81 \times 1}{0.94 \times 0.84}$$

$$P = 248.480 \text{ W} = 0.248 \text{ kW}$$

A continuación, se procede a determinar el torque que se necesita para mover el tambor motriz.

$$T = F \times d \quad (49)$$

siendo,

$T$  = Torque ( $N \cdot m$ )

$F$  = Fuerza ( $N$ )

$d$  = Distancia ( $m$ )

$$T = 20(9.81) \times (0.1)$$

$$T = 20(9.81) \times (0.1)$$

$$T = 19.62 \text{ N} \cdot m$$

Con los valores calculados se selecciona el motor de  $0.25 \text{ kW}$  y  $1,414.38 \text{ rpm}$ , pero como se requiere que a la salida del reductor tenga una velocidad de  $1 \text{ m/s}$  se calcula la relación de transmisión adecuada donde  $1 \text{ m/s}$  son  $21.33 \text{ rpm}$ .

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (50)$$

$$i = \frac{1,414.38}{21.33}$$

$$i = 66.3$$

Una vez calculado la relación de transmisión se procede a seleccionar el motor-reductor. Por lo tanto, se determina que se necesita un motor reductor de  $0.25 \text{ kW}$  con un torque de  $19.62 \text{ N} \cdot m$  conjuntamente con una relación de transmisión de  $66.3$  para que la cinta transportadora gire a la velocidad deseada, ver anexo E.

### 8.2.6. Cálculo flujo volumétrico

Se procede a calcular el flujo volumétrico del ducto esquematizado en la figura 24, para posteriormente con ayuda del software Compute A-Fan determinar la potencia del motor, ver



Una vez calculado el flujo volumétrico se procedió a seleccionar el calentador del ducto que pasando al sistema inglés es  $1,570 \text{ ft}^3/\text{min}$ , ver anexo H.

### 8.2.7. Cálculo de la tubería estructural cuadrada (ASTM A 36)

En la tabla 19, se muestra todos los pesos a los que está sometido las patas de la banda transportadora, esto con el fin de obtener una sumatoria total de pesos.

**Tabla 19:** Sumatoria de pesos.

Elemento	Cantidad	Peso(kg)
Rodillos	3	17.7
Tambor motriz	1	387.36
Contra-tambor	1	83
Chumaceras	4	4.8
Cámara interior	1	36.242
Cámara exterior	1	38.185
Motor-reductor	1	23.567
Perfiles tipo C	4	62.67
Tolva	1	35.904
$\Sigma_{TOTAL}$		<b>689.428</b>

**Fuente:** Autores.

Para el cálculo se divide el peso total de  $689.428 \text{ kg}$  para 10 que es el número total de patas que soportará la banda y la cámara de secado, por lo que se considerará un peso de  $68.943 \text{ kg}$ , como se muestra en la figura 25.



**Figura 25:** Diagrama de cuerpo libre del tubo estructural cuadrado.

**Fuente:** Autores.

Se obtiene los valores del catálogo de Ipac, ver el anexo I.

$$A = 5.41 \text{ cm}^2$$

$$I = 19.5 \text{ cm}^4$$

$$i = 1.90 \text{ cm}$$

siendo,

$A$  = área del tubo estructural cuadrado

$I$  = momento de inercia

$i$  = radio de giro

Aplicando criterio de Esbeltez

$$\frac{kl}{r} = \frac{92 \text{ cm}}{1.90 \text{ cm}} = 48.421$$

En la tabla 20 se procede a interpolar para hallar el factor de carga, ver anexo J.

**Tabla 20:** Factores de carga para miembros  $Kl/r$ .

$\frac{kl}{r}$	$F_a (kg/cm^2)$
48	1,303
48.417	1,300.474
49	1,297

**Fuente:** Autores.

Calculando carga permisible

$$P = A \times F_a \tag{53}$$

siendo,

$P$  = Carga permisible (kg)

$A$  = Área del tubo estructural cuadrado ( $m^2$ )

$F_a$  = Factor de carga ( $kg/cm^2$ )

$$P = 5.41 \text{ cm}^2 \times 1,300.474 \text{ kg/cm}^2$$

$$P = 7,035.564 \text{ kg} = 69,018.88 \text{ N}$$

$$P = 69,018.88 \text{ N} > 676.3 \text{ N}$$

Por lo tanto, se observa que la carga permisible es muy superior a la carga que soportarán cada una de las patas, por lo que el tubo estructural seleccionado soportará los pesos mencionados en la tabla 19.

### 8.2.8. Velocidad de secado

Se procede a determinar la velocidad de secado por medio de la ecuación 54.

$$W_c = \frac{S}{A} \left( \frac{\Delta X}{\Delta \theta} \right) \quad (54)$$

Siendo,

$S$ =Peso del sólido seco ( $kg$ )

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

$W_c$ =Velocidad de secado ( $kg/h \times m^2$ )

$\Delta X$ = Variación de la humedad en base seca ( $kg H_2O/kg$  sólido seco)

$\Delta \theta$  = Variación del tiempo de secado ( $h$ )

$$W_c = \frac{0.0296}{0.25} \left( \frac{0.1212 - 0.1162}{0.56 - 0.53} \right)$$

$$W_c = 0.02 \frac{kg}{h \times m^2}$$

Para determinar el tiempo de secado en el período constante se emplea la ecuación 55.

$$t_c = \frac{L_s}{AW_c} (x_1 - x_2) \quad (55)$$

Siendo,

$W_c$ =Velocidad de secado constante ( $kg/h \times m^2$ )

$A$ =Superficie expuesta al secado ( $m^2$ )

$L_s$ =Sólido seco ( $kg$ )

$X_1$ =Humedad inicial ( $kgH_2O/kg$  sólido seco )

$X_2$ =Humedad crítica ( $kgH_2O/kg$  sólido seco )

$$t_c = \frac{0.0296}{(0.25)(0.02)}(0.1212 - 0.1162)$$

$$t_c = 0.0296 \text{ h}$$

El tiempo de secado en el período decreciente se establece mediante la ecuación 56.

$$t_p = \frac{S}{A} \frac{(x_c - x_f)}{(W_c - W_f)} \ln \frac{W_c}{W_f} \quad (56)$$

Siendo,

$W_c$ =Velocidad de secado constante ( $kg/h \times m^2$ )

$W_f$ =Velocidad final ( $m/s$ )

$X_c$ =Humedad crítica ( $kgH_2O/kg$  sólido seco )

$X_f$ =Humedad final ( $kgH_2O/kg$  sólido seco )

$A$ =Superficie expuesta al secado ( $m^2$ )

$S$ =Sólido seco ( $kg$ )

$$t_p = \frac{0.0296}{0.25} \frac{(0.1162 - 0.07)}{(0.02 - 0.01)} \ln \left( \frac{0.02}{0.01} \right)$$

$$t_p = 0.379 \text{ h}$$

Finalmente, el tiempo total de secado se determina con la ecuación 57:

$$t = t_c + t_p \quad (57)$$

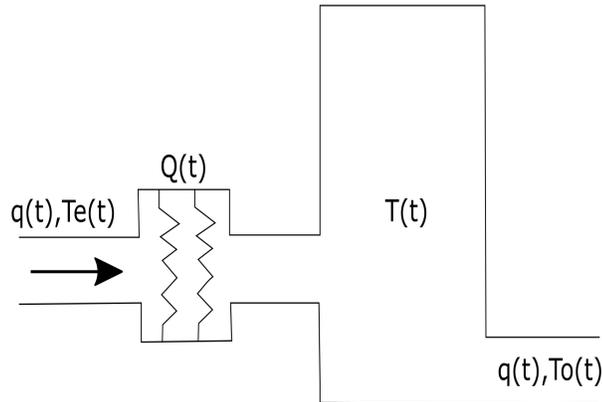
$$t = 0.0296 + 0.379$$

$$t = 0.4086 \text{ h}$$

En consecuencia, se tiene que el secado del grano de cacao se realiza en un tiempo total de 0.4086 h con una humedad inicial de 55 % y llegando a su humedad final de 7 %.

### 8.2.9. Modelo Matemático del Controlador

Para el planteamiento del modelo matemático se realiza un esquema del sistema térmico para poder interpretar e identificar las variables involucradas de dicho sistema, figura 26.



**Figura 26:** Representación esquemática de la cámara de secado.

**Fuente:** Autores.

siendo,

$q(t)$ =Flujo volumétrico de entrada del sistema ( $m^3/s$ )

$T_e(t)$ = Temperatura de entrada (ambiente) ( $^{\circ}C$ )

$Q(t)$ =Calor de la resistencia eléctrica ( $W$ )

$T(t)$ = Temperatura dentro del volumen de control ( $^{\circ}C$ )

$T_o(t)$ = Temperatura de salida del sistema ( $^{\circ}C$ )

#### 8.2.9.1 Función de transferencia del sistema térmico

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} \quad (58)$$

siendo,

$T(s)$ =Temperatura transitoria del sistema ( $^{\circ}C$ )

$Q(s)$ =Flujo de calor por resistencia eléctrica ( $W$ )

#### 8.2.9.2 Balance de masa y energía

Se realiza el balance de masa y energía a través de la ecuación 59.

$$mH_1(t) - mH_2(t) = \frac{du(t)}{d(t)} \quad (59)$$

Siendo,

$m$ =Calor específico del fluido ( $kJ/kg^\circ C$ )

$H_1(t)$ =Entalpía ( $Kcal/kg$ )

$\frac{du(t)}{d(t)}$ =Variación de energía en el volumen de control

Se identifica los términos que conforman las ecuaciones de energía total del sistema.

$$\rho V C_p \frac{dT(t)}{d(t)} = \text{Cambio del calor del flujo que entra al sistema}$$

Siendo,

$\rho$ =Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$V$ =volumen cámara de secado ( $m^3$ )

$C_p$ =calor específico del fluido ( $kJ/kg^\circ C$ )

$\frac{dT(t)}{d(t)}$ =variación de la temperatura en el volumen de control ( $^\circ C$ )

Se halla la ecuación de variación de temperatura dentro del volumen de control.

$$\rho C_v q [T_e(t) - T_o(t)] = \text{Variación de temperatura del sistema}$$

siendo,

$\rho$ =Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$C_v$ =capacidad calorífica a volumen constante ( $kJ/kg^\circ C$ )

$q$ =caudal o flujo volumétrico ( $m^3/s$ )

$T_e(t)$ = Temperatura de entrada (ambiente) ( $^\circ C$ )

$T_o(t)$ = Temperatura de salida del sistema ( $^\circ C$ )

Se representa el cambio de temperatura dentro de la cámara de secado como:

$$Q(t) = \text{flujo de calor de resistencia térmica}$$

La ecuación que domina el sistema es:

$$\rho V C_p \frac{dT(t)}{d(t)} = \rho C_v q [T_e(t) - T_o(t)] + Q(t) - \frac{T(t) - T_a(t)}{R} \quad (60)$$

La ecuación 60 se interpreta de la siguiente manera:

Calor del flujo que entra al sistema es igual al cambio en la temperatura dentro del volumen de control más el calor de la resistencia eléctrica menos las pérdidas por intercambio de calor con el ambiente.

Simplificando la ecuación 60 se obtiene:

$$k_1 = \rho V C_p \frac{dT(t)}{dt} \quad (61)$$

$$k_2 = \rho C_v q \quad (62)$$

Se obtiene una ecuación lineal

$$k_1 = k_2 [T_e(t) - T_o(t)] + Q(t)$$

En donde la temperatura de volumen de trabajo es:

$$T(t) = -T_e(t) + T_o(t) \therefore \Delta T = T(t)$$

Por consiguiente, la ecuación general queda:

$$k_1 \frac{dT(t)}{dt} = Q(t) - K_2(T(t))$$

Aplicando Laplace, se obtiene:

$$k_1 s T(s) = Q(s) - K_2 T(s)$$

Despejando:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{K_1 s + K_2} \quad (63)$$

Así mismo, a la función de transferencia hallada es posible añadirle una constante K la cual representa la potencia máxima de las resistencias eléctricas industriales, quedando la ecuación 63 de la siguiente manera:

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{K}{K_1 s + K_2} \quad (64)$$

Siendo,

$K_1$ =Constante uno

$K_2$ =Constante dos

Finalmente, se resumen las variables que intervienen en el sistema, tabla 21.

**Tabla 21:** Parámetros del sistema.

Descripción	Abr.	Valor	Unidad
Volumen de la cámara de secado	$v$	0.00461681	$m^3$
Densidad del aire	$\rho$	1.23	$kg/m^3$
Calor específico a presión constante	$C_p$	1.009	$KJ/Kg^\circ C$
Calor específico a volumen constante	$C_v$	0.722	$KJ/Kg^\circ C$
Velocidad del flujo de aire	$Vel$	22.85	$m/s$
Área de la cámara de secado	$A$	18.483	$m^2$

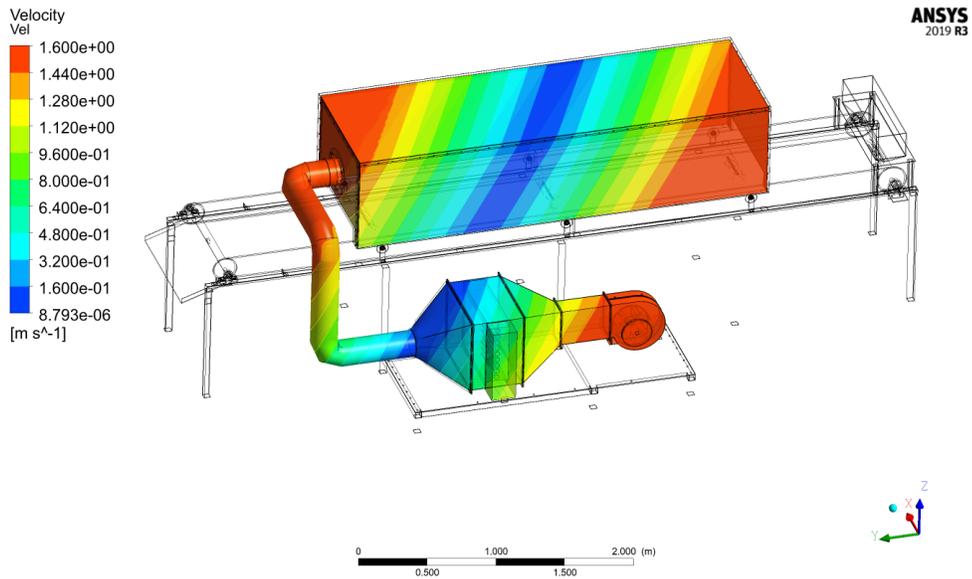
**Fuente:** Autores.

### 8.3. Evaluación del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

#### 8.3.1. Evaluación del sistema mecánico.

Para las simulaciones se utiliza el método de elementos finitos, garantizando la convergencia del método a través del Jacobiano que valida la calidad de la malla, el cual se mantuvo con un promedio del 85 % en todos los ensayos que se realizaron, de modo que las iteraciones que realice el software sean más fiables.

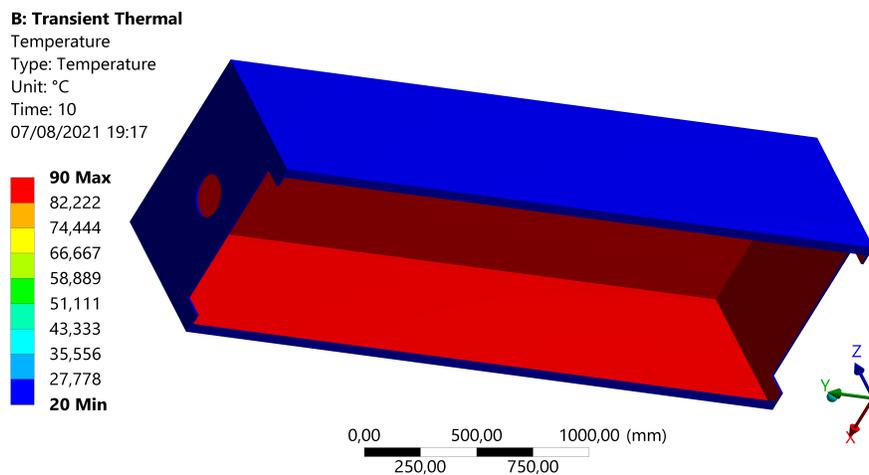
En la figura 27 se observa el análisis de la velocidad del flujo del aire estableciendo la entrada de esta en la zona del blower, por este motivo en esta zona se tiene la mayor velocidad, también se visualiza una velocidad considerable a la salida de las tuberías, hacia la cámara y al extremo opuesto cuando choca con la pared de la cámara interna. La velocidad máxima del aire generada por el blower es de 3.3  $m/s$  y según los resultados de la simulación se ve que el aire llega a 1.6  $m/s$  en los puntos más críticos.



**Figura 27:** Simulación CFX del flujo del aire

**Fuente:** Autores.

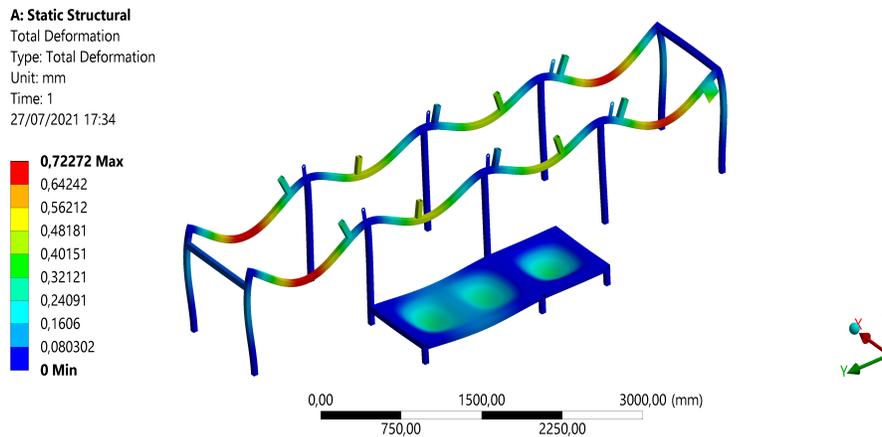
En el análisis térmico, correspondiente a la figura 28, se observa como la temperatura interna llega a los 90 °C, garantizando que el cacao se seque poco a poco durante todo el trayecto de la cámara de secado y conjuntamente con el controlador de temperatura se obtiene un secado óptimo del grano.



**Figura 28:** Análisis térmico de la cámara de secado

**Fuente:** Autores.

Finalmente, en el análisis estructural, que vemos en la figura 29 se observa que no existen problemas con el peso que debe soportar la estructura, dado que en los puntos más críticos que son las bases de la cámara de secado y los extremos donde se ubican los tambores la deformación es mínima, la cual no genera mayor inconveniente en la estructura. Además, se tiene un factor de seguridad de 15 con respecto al esfuerzo.

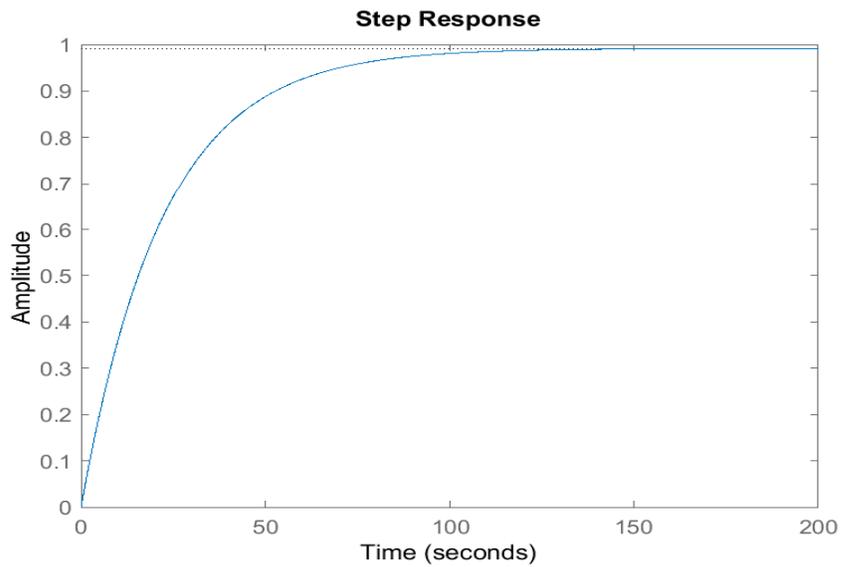


**Figura 29:** Análisis estructural

**Fuente:** Autores.

### 8.3.2. Evaluación del sistema de control de temperatura.

Para este equipo de secado se propuso realizar un control de temperatura, por lo que se realizó un controlador proporcional-integrador (PI) para lo cual, se sometió al sistema a una entrada escalón como se muestra en la figura 30.

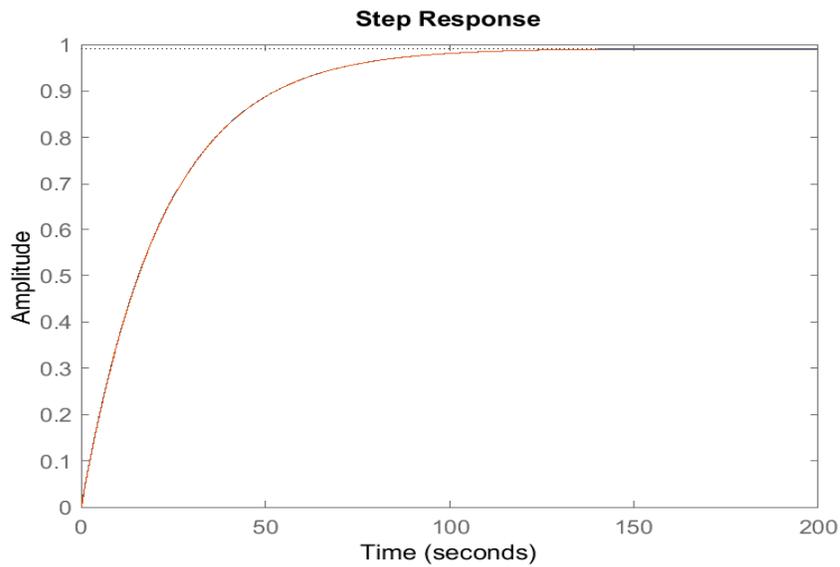


**Figura 30:** Respuesta a una entrada escalón unitario - continuo ( $x(t)$  vs tiempo).

**Fuente:** Autores.

Se procede a discretizar la planta del dominio de “s” a “z” obteniendo la figura 31, donde se estableció un tiempo de muestreo de 0.1 segundos, el cual fue calculado con la ecuación 65 de la siguiente manera:

$$T_m < \frac{t_s \pm 0.02}{10} \quad (65)$$

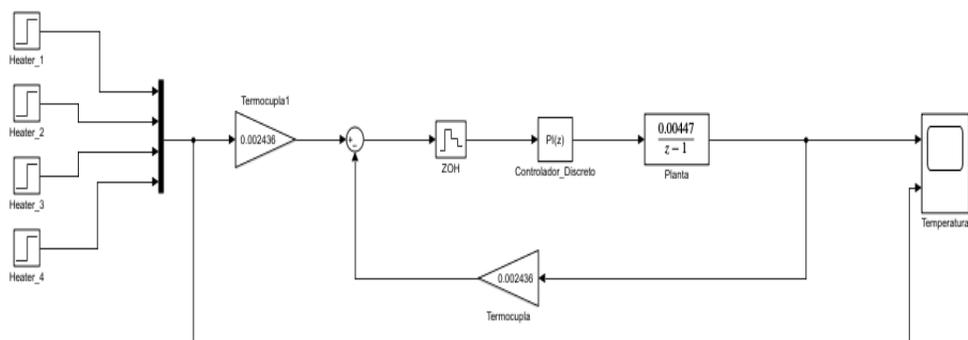


**Figura 31:** Respuesta a lazo abierto discretizada ( $x[n]$  vs tiempo).

**Fuente:** Autores.

Como se observa en la figura 31, se grafica conjuntamente con la función continua con el fin de validar de que el sistema discreto tenga la misma forma que el sistema continuo.

A continuación, se procede a construir el diagrama de bloques usando el entorno de programación de Simulink, como se indica en la figura 32.



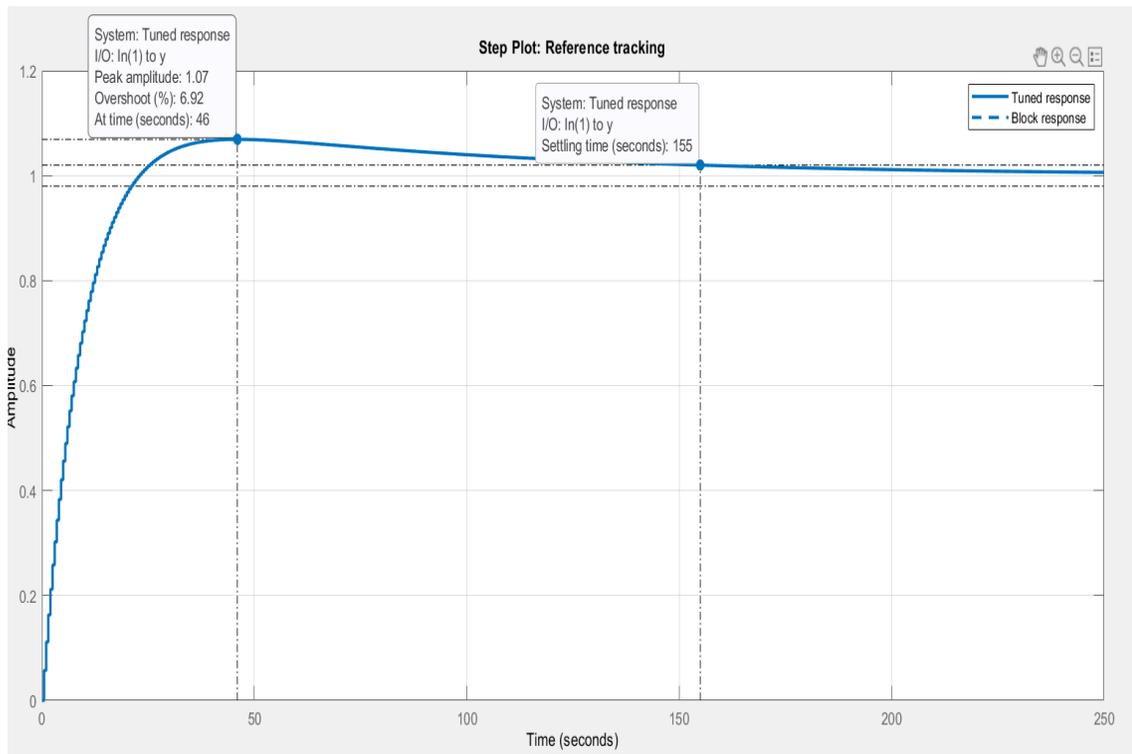
**Figura 32:** Diagrama de bloques del sistema.

**Fuente:** Autores.

Una vez construido el modelo en Simulink se procede a diseñar el controlador con ayuda

de la aplicación PID Tuner, figura 33.

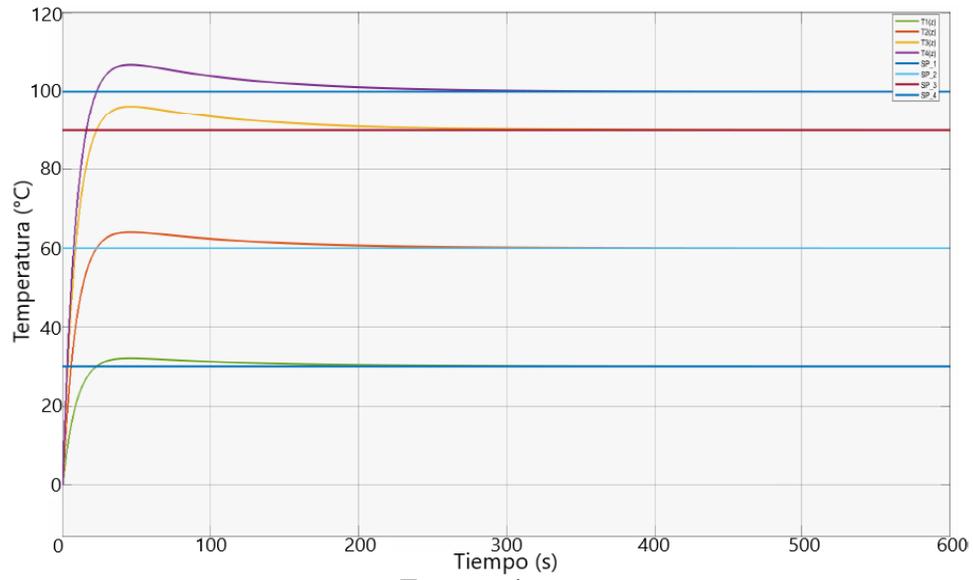
En la figura 33 se observa que la sobre oscilación y el tiempo de establecimiento son 6.92 % y 155 segundos respectivamente.



**Figura 33:** Respuesta del sistema con acción de control.

**Fuente:** Autores.

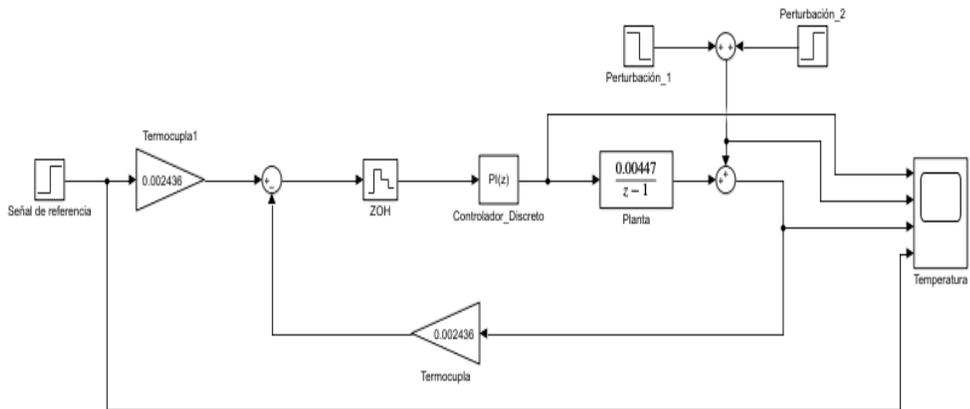
Así mismo, en la figura 34 se compara la señal de la respuesta deseada con la señal de la salida del sistema, donde se observa que la salida del sistema tiene las mismas características que la respuesta deseada, donde se interpreta que la señal de salida ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ ) se establece en la señal deseada ( $SP_1, SP_2, SP_3, SP_4$ ) la cual esta a diferentes temperaturas siendo  $30^\circ C$ ,  $60^\circ C$ ,  $90^\circ C$  y  $100^\circ C$ .



**Figura 34:** Variable controlada ante la señal de referencia.

**Fuente:** Autores.

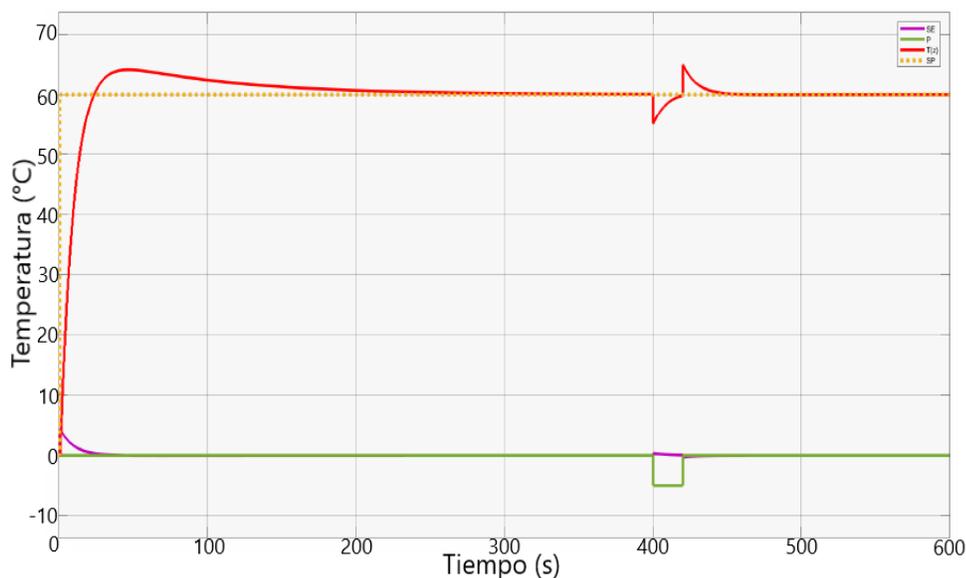
Ante perturbaciones se plantea el siguiente diagrama de bloques, ver la figura 35.



**Figura 35:** Diagrama de bloques del sistema frente a una perturbación.

**Fuente:** Autores.

En la figura 36 se puede observar cómo reacciona el sistema ante perturbaciones.



**Figura 36:** Variable controlada frente a una perturbación.

**Fuente:** Autores.

Finalmente, se plantea la función de transferencia del controlador PI.

$$Y(z) = \frac{5,266}{z - 1}$$

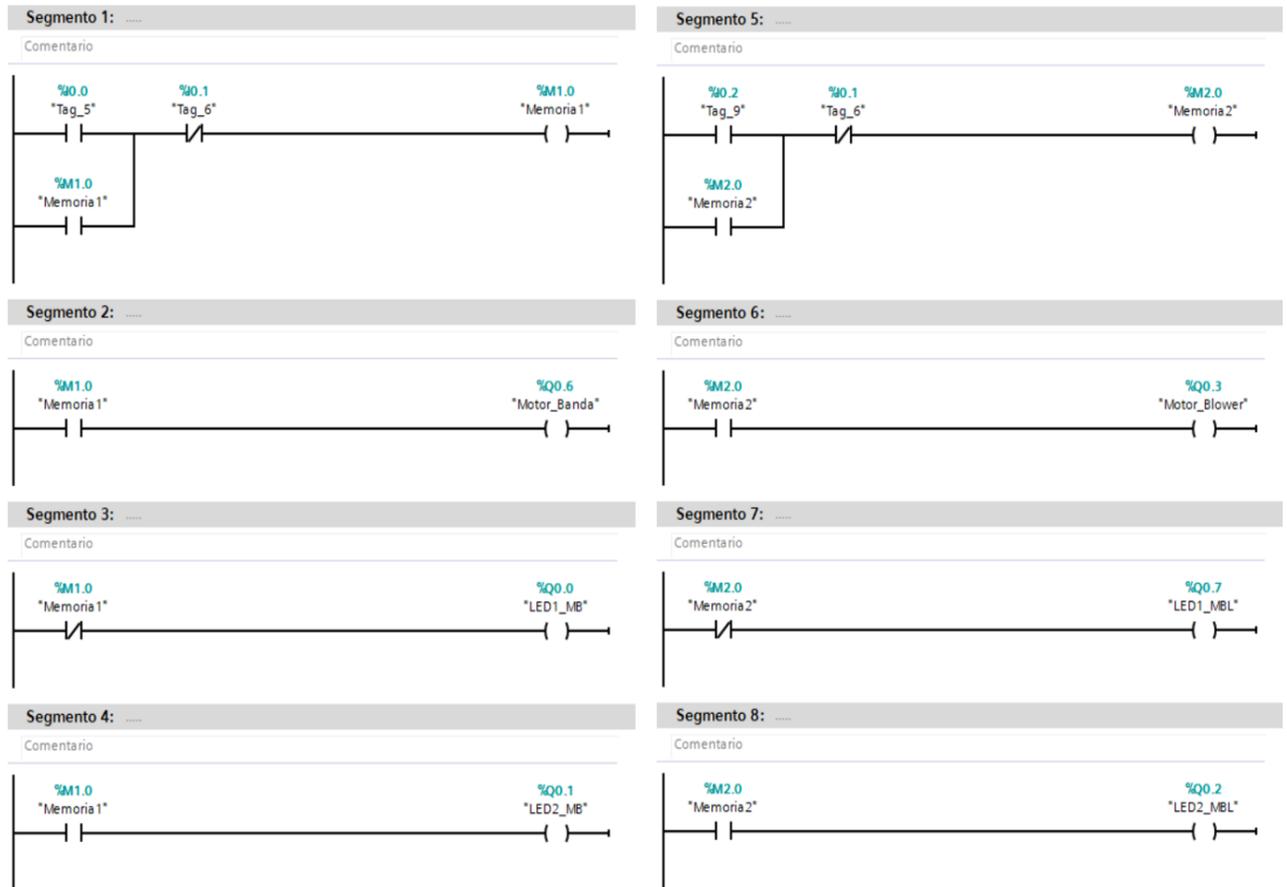
Aplicando la inversa de la transformada Z se obtiene la ecuación en diferencias de dicho controlador.

$$y(k) = 5,266^k u(k)$$

Posteriormente, se realiza el control de los motores y temperatura desarrollando el código en lenguaje Ladder para posteriormente implementarlo en un PLC (Controlador Lógico Programable), en la figura 37 se hace el control de los motores tanto del blower como el de la banda transportadora, posteriormente se implementa en el PLC el controlador desarrollado para la temperatura la cual se muestra desde la figura 38 a la 40, el cual desarrolla las conversiones de analógico a digital, permitiendo que el operario pueda visualizar los datos de temperatura claramente.

En la figura 37, los primeros segmentos controlan el motor de la banda transportadora, en primer lugar, tenemos una entrada I0.0 que al ser accionada se activa una memoria M1.0,

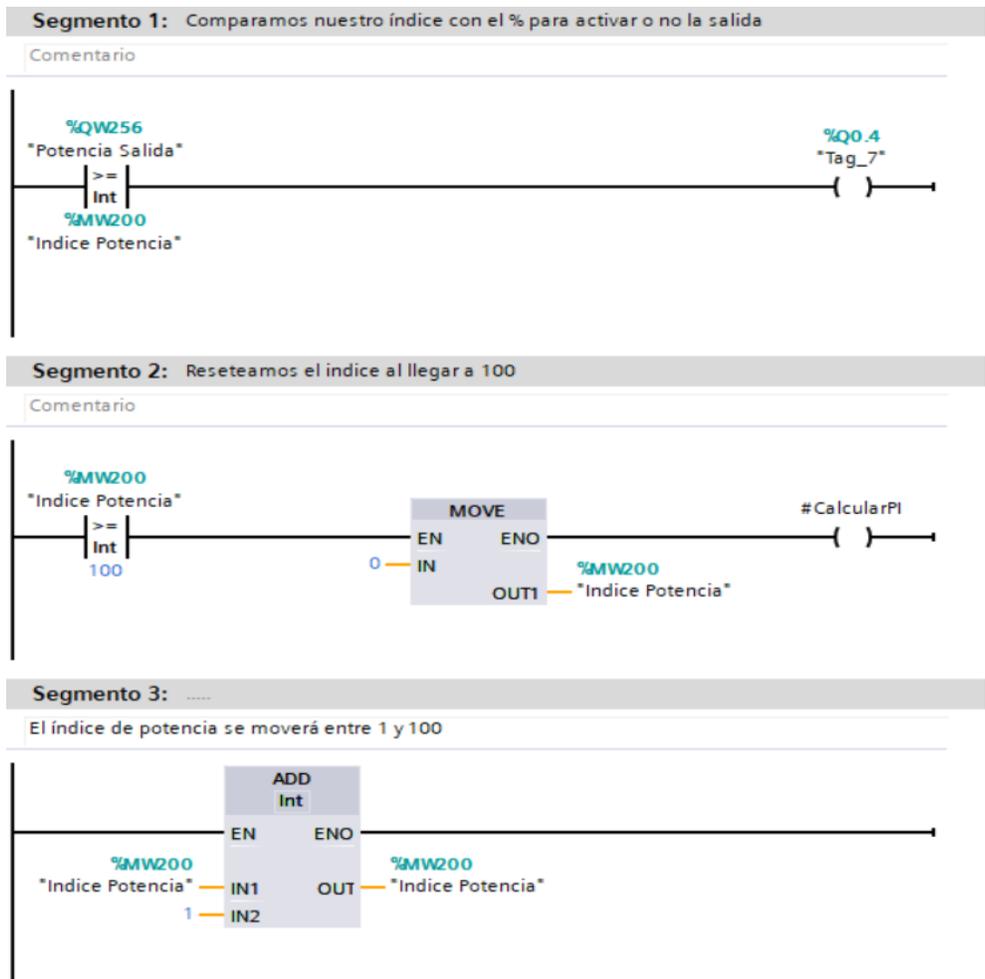
con esto se logra activar un led que será la salida Q0.1, esta mostrará que el motor está funcionando correctamente, adicionalmente se activa el propio motor que será la salida Q0.6. En caso de pulsar el botón de emergencia que corresponde a la entrada I0.1 se desactiva la memoria M1.0 desactivando también el motor y el led Q0.1, además de esto se activa el led Q0.0 que indica cuando el motor no está funcionando. Del segmento 5 al segmento 8 se tiene el controlador del motor del blower, el cual es muy similar al control de la banda transportadora.



**Figura 37:** Control de motores. Banda transportadora(izquierda), Blower(Derecha).

**Fuente:** Autores.

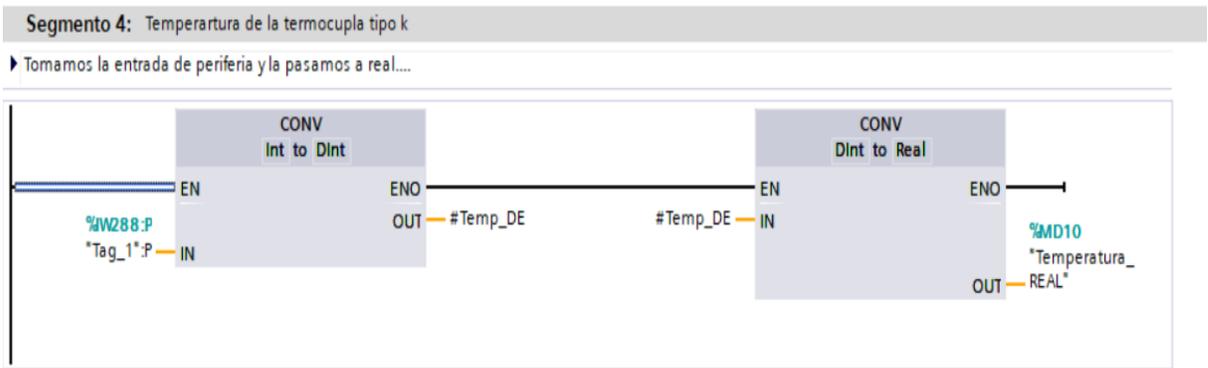
La Figura 38 indica el control de las resistencias eléctricas industriales, de tal forma que se activan cuando la potencia de salida alcanza un valor mayor al índice de está que será establecido previamente. El índice de potencia se va sumando de uno en uno hasta llegar, en este caso, al valor de 100, este valor corresponde a la potencia que requieren las resistencias que es de 500 W.



**Figura 38:** Inicialización del control de las resistencias eléctricas industriales.

**Fuente:** Autores.

La figura 39 muestra la programación de la conversión de la señal de temperatura de un valor analógico a digital, convirtiendo la señal de un valor de entero a real y este valor final se guarda en la variable MD10.



**Figura 39:** Conversión de analógico a digital.

**Fuente:** Autores.

En la figura 40 se realiza el control PI de la temperatura, de tal forma que, mediante los parámetros de control de entrada, los tiempos de establecimiento y la sobreoscilación se genere un control sobre la temperatura que nos asegure, mediante sensores, que la temperatura interna de la cámara este en 90 °C.

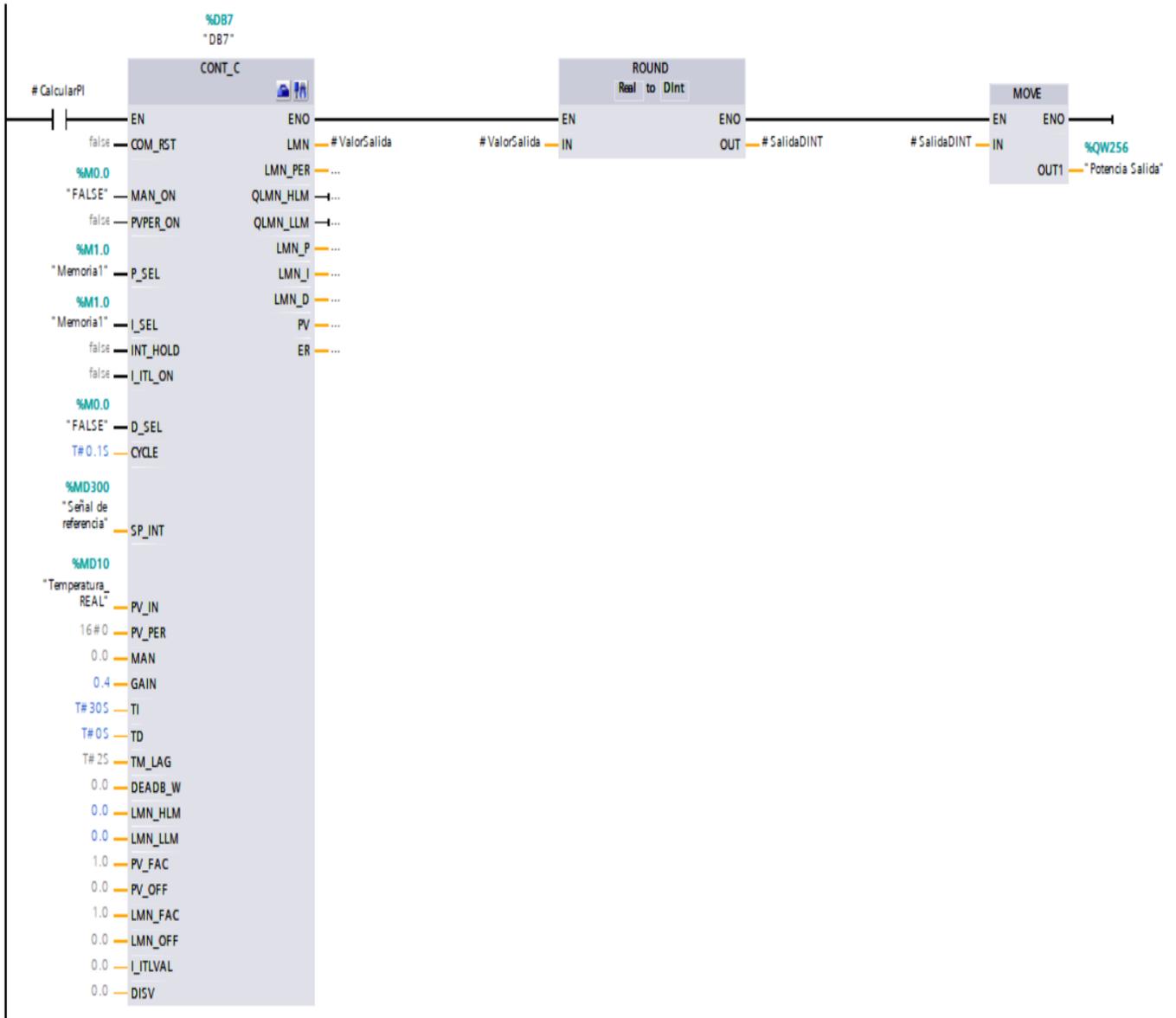


Figura 40: Ingreso de datos del PI diseñado.

Fuente: Autores.

#### 8.4. Análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

Para realizar el análisis de costos del equipo de secado es necesario cotizar los precios de todos los elementos que conforman la máquina, por lo que, desde la tabla 22 a la 28 se evaluará todos los componentes.

**Tabla 22:** Costos de la cámara de secado.

Elementos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Plancha de acero Galvanizado (1.22x2.44)m	6	17.362	104.72
Fibra de vidrio	1	7.94	7.94
$\Sigma_{\text{Total}}$			112.66

**Fuente:** Autores.

**Tabla 23:** Costos de la estructura del equipo de secado.

Elementos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Tubería estructural cuadrada (50x3)mm	2	14.25	28.5
Plancha de acero galvanizado (blower, tolvas, tensor, motor)	1	17.362	17.362
$\Sigma_{\text{Total}}$			45.862

**Fuente:** Autores.

**Tabla 24:** Costos de sistemas de transmisión de movimiento.

Elementos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Ejes	2	7	14
Chumaceras	4	6.75	27
Rodamientos	6	3	18
Tambor motriz	1	300	300
Contratambor	1	200	200
Rodillos	3	50	150
Motorreductor	1	170	170
Tejido de fibra de vidrio (1x50)m	1	8	8
$\Sigma_{\text{Total}}$			887

**Fuente:** Autores.

**Tabla 25:** Costos de sistemas de calentamiento de aire.

Elementos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Motor	1	89.25	89.25
Ventilador	1	60	60
Resistencias eléctricas industriales	9	9.06	81.54
Conductos	1	120	120
Abrazadera para conductos	6	10.4	62.4
Lana de vidrio	1	7.94	7.94
$\Sigma_{\text{Total}}$			421.13

**Fuente:** Autores.**Tabla 26:** Costo de sistemas de control.

Elementos	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Pulsantes NA	4	10	40
Selector	3	14.62	43.86
Display indicador	1	4.5	4.5
Termocupla tipo K	2	16.99	33.98
Cable	1	48.16	48.16
PLC 315-2 DP	1	700	700
Módulo de salidas analógicas (AI 4/AO 2X8BIT_1)	1	572	572
Tablero de control	1	10.5	10.5
Fusibles	5	4.93	24.65
Interruptor Automático	3	5.36	16.08
Interruptor Diferencial	3	10.5	31.5
Disyuntor Guardamotor	3	19.81	59.43
Contactador eléctrico	2	6.64	13.28
Relé Térmico	2	14.78	29.56
LED indicador piloto	5	11.26	56.3
$\Sigma_{\text{Total}}$			1,683.8

**Fuente:** Autores.**Tabla 27:** Costo de diseño.

Detalle	Costo/hora	Horas laboradas	Precio Total
Estudiante 1	1.66	520	863.2
Estudiante 2	1.66	520	863.2
$\Sigma_{\text{Total}}$			1,726.4

**Fuente:** Autores.

Finalmente, considerando los costos anteriores se realiza un análisis de los costos totales del equipo de secado la cual se muestra en la tabla 28.

**Tabla 28:** Costos totales del equipo de secado.

Detalle	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Cámara de secado	1	112.66	112.66
Estructura	1	45.862	45.862
Sistemas de transmisión de movimiento	1	887	887
Sistemas de Calentamiento de aire	1	421.13	421.13
Sistema de control	1	1,683.8	1,683.8
Costo de diseño	2	863.2	1,726.4
$\Sigma_{\text{Total}}$			4,876.85

**Fuente:** Autores.

Con el objetivo de poder comparar el precio obtenido de la máquina se cotejó el costo de distintas máquinas que realizan el mismo proceso, de tal manera que se pueda garantizar que el diseño sea asequible. Cabe mencionar que no existe una máquina con tales características de este diseño y capacidad de producción, sin embargo, se comparará con máquinas existentes en el mercado que realizan el proceso de secado de cacao.

En la tabla 29 se puede observar que el costo obtenido de la máquina diseñada está dentro de los rangos de precios de las máquinas ya existentes en el mercado, por lo que, en el caso de construir la máquina, está es competitiva con las ya existentes en el mercado.

**Tabla 29:** Precio de máquinas existentes en el mercado.

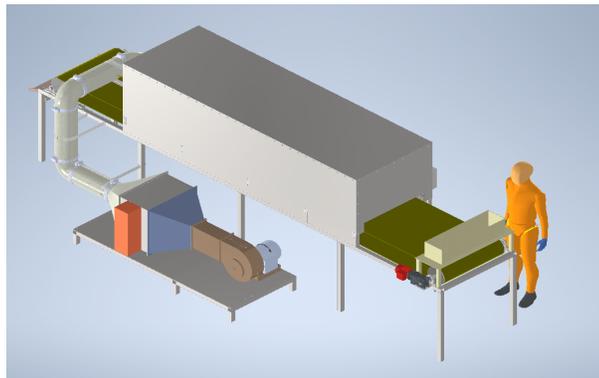
Descripción	Costo
Máquina secadora de túnel de horno LC-SD1500	\$2,800.00
Equipo secador de cinta tipo túnel WANDA	\$9,000.00
Secador de calor con túnel con cinta transportadora SD5000	\$4,980.00
Horno de secado tipo túnel DYX-Microwave Drying	\$6,000.00
Túnel de secado de microondas GRT	\$5,000.00

**Fuente:** Autores.

## 9. Resultados

### 9.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

En este apartado se obtuvo como resultado diseñar una máquina tipo túnel a contracorriente para secar el grano de cacao y como medio de calentamiento se usó resistencias eléctricas industriales, debido a que permitirá un mayor control del tiempo de secado del producto y ayudará a mantener las propiedades organolépticas del grano, figura 41.



**Figura 41:** Secador continuo tipo túnel a contracorriente.

**Fuente:** Autores.

Además, con la banda transportadora seleccionada se logrará obtener un secado uniforme del grano, dado que esta banda posee agujeros permitiendo que el aire caliente fluya también en la base del cacao, ver figura 42.



**Figura 42:** Banda transportadora recubierta de teflón.

**Fuente:** Autores.

## 9.2. Propuesta del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

La tabla 30 indica los resultados obtenidos del diseño del secador tipo túnel.

**Tabla 30:** Resultados de los cálculos del diseño del secador tipo túnel.

<b>Balance de energía</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
$G$	Caudal del aire	$Kg_{aire-seco}/h$	0.736
$H_1$	Entalpía del sólido (entrada)	$Kcal/kg$	41.702
$H_2$	Entalpía del sólido (salida)	$Kcal/kg$	57.48
$H_2$	Entalpía del aire (entrada)	$Kcal/kg$	36.221
$H_1$	Entalpía del aire (salida)	$Kcal/kg$	35.568
$q$	Calor perdido	$Kcal/h$	5.332
<b>Zona II</b>			
$H_a$	Entalpía del sólido(entrada)	$Kcal/kg$	64.71
$H_b$	Entalpía del sólido (salida)	$Kcal/kg$	43.11
$N_{OT}$	Número de elementos de transmisión	-	0.054
<b>Zona I</b>			
$T_a$	Temperatura de entrada	$^{\circ}C$	56.873
$(\Delta T)_{log}$	Temperatura media del sólido y el aire	$^{\circ}C$	28.437
$T_a'$	Temperatura del aire sin pérdidas al exterior	$^{\circ}C$	53.856
$N_{OT}$	Número de elementos de transmisión	-	0.136
<b>Zona III</b>			
$T_b$	Calor cedido por el aire	$^{\circ}C$	94.577
-	Calor absorbido por el sólido	$Kcal/h$	0.425
-	Calor perdido al exterior	$Kcal/h$	0.533
<b>Cámara de secado</b>			
$N_{OT}$	Número total de elementos de transmisión	-	0.696
$H_{OT}$	Altura del elemento de transmisión	-	4.496
$z$	Longitud de la cámara de secado	$m$	3.13

**Fuente:** Autores.

Para el dimensionamiento del espesor del aislante de la cámara de secado y para los conductos se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la tabla 31.

**Tabla 31:** Resultados de los cálculos del espesor de aislantes.

Descripción	Valor y/o unidad	Unidades
Cámara de secado	1.1	<i>cm</i>
Conductos	1	<i>cm</i>

**Fuente:** Autores.

Adicionalmente, en la tabla 32 se detalla los resultados para el dimensionamiento de los demás componentes.

**Tabla 32:** Resultados de los diferentes componentes del equipo.

Descripción	Valor y/o unidad	Unidades
<b>Motorreductor</b>		
Potencia	0.248	<i>kW</i>
Torque	19.62	<i>N · m</i>
Relación de transmisión	66.3	-
<b>Blower</b>		
Flujo Volumétrico	0.74034	<i>m<sup>3</sup>/s</i>
<b>Tubería estructural cuadrada</b>		
Carga permisible	15.507	<i>kip</i>
<b>Velocidad de secado</b>		
Tiempo de secado (constante)	0.0296	<i>h</i>
Tiempo de secado (decreciente)	0.379	<i>h</i>

**Fuente:** Autores.

Finalmente, en el modelo matemático del controlador se halla la función de transferencia que gobierna el sistema:

$$G(s) = \frac{0.9918}{22.14s + 1}$$

### 9.3. Evaluación del diseño del equipo automatizado para el proceso de secado de cacao

En el análisis estructural estático se interpreta que la estructura que se ha diseñado es fiable para soportar el peso de todos los componentes de la máquina, al tener el factor de seguridad de 15, con respecto al esfuerzo al cual está sometido se puede indicar que es una máquina robusta, en este aspecto es importante indicar que las dimensiones de los elementos

consideran aspectos de fabricación, ver tabla 33.

**Tabla 33:** Valores obtenidos de la simulación.

Descripción	Valor	Unidad
Deformación total	0.72	<i>mm</i>
Factor de seguridad	15	-

**Fuente:** Autores.

En el análisis térmico y de fluido se comprobó que la temperatura se establezca a  $90^{\circ}C$  en el interior de la cámara, este análisis se realizó por convección de modo que al tener los resultados de la tabla 34 se verifica que la temperatura es la adecuada.

**Tabla 34:** Valores obtenidos de la simulación.

Descripción	Valor	Unidad
Análisis Térmico	90.226	$^{\circ}C$
Dinámica de fluidos	1.6	<i>m/s</i>

**Fuente:** Autores.

En la tabla 35 se indica las constantes obtenidas del controlador diseñado.

**Tabla 35:** Constates de control.

Descripción	Valor
Kp	5260
Ki	0.011

**Fuente:** Autores.

Con las constantes halladas en la tabla 35 se alcanzó a mejorar la respuesta del sistema las cuales se muestran en la tabla 36.

**Tabla 36:** Parámetros de control.

Descripción	Valor
Sobreoscilación (%)	6.92
Tiempo de establecimiento (segundos)	155

**Fuente:** Autores.

#### **9.4. Análisis de costos de la implementación del diseño de un equipo automatizado para el proceso de secado de cacao**

Al llevar a cabo un análisis de costos de los distintos componentes del equipo de secado se llega a tener un valor total de \$4,876.85 donde para obtener este valor fue de gran importancia identificar claramente los costos en cuanto a materia prima y costo de diseño, en donde el valor reflejado representa una gran rentabilidad para los pequeños y medianos productores de cacao, además de que el equipo garantiza una ganancia adicional mejorando los ingresos de estos al momento de comercializar el producto.

Es fundamental precisar que la cotización que se realiza es una estimación, dado que los precios de ciertos componentes varían dependiendo de cada fabricante, ocasionando que la misma este expuesto a cambios.

Un factor importante es la mano de obra, debido a que ciertos componentes deben ser maquinados por personal calificado.

Es necesario tomar en cuenta, también, el costo del diseño, que para cuyo cálculo se consideró el costo actual de la hora de \$1.66 y teniendo en cuenta un aproximado de 520 horas de trabajo, que dio como resultado \$863.2 por cada persona involucrada en el diseño de la máquina dando como total 1,726.4 dólares americanos.

Para analizar el costo de la máquina, se tomó en cuenta únicamente el valor económico de los materiales y del diseño, dado que no se fabricó la máquina y no se dio ningún otro tipo de costos relacionados con la manufactura.

## 10. Conclusiones

En función de buscar un sistema adecuado para el secado de cacao se planteó el diseño de un equipo automatizado para esta etapa, por lo que para realizar tal diseño se empleó la teoría de cinética de secado y transferencia de masa, para lo cual se necesita saber las características físicas y químicas del cacao, de tal manera que a través de estos parámetros se consiga mantener el valor organoléptico y la pérdida adecuada de humedad del grano garantizando la calidad del proceso.

El equipo diseñado es un sistema de producción continua con un estilo de secado tipo túnel, donde el tiempo de secado varía entre 25 y 30 minutos y la longitud del secador es de 3.15 *m*.

Se propone un sistema de control, de modo que el operario pueda controlar la temperatura y los motores de la máquina desde el tablero de control. De igual manera, también se realizó un controlador PI (proporcional-integrador) para el control de temperatura el cual se ajusta a la temperatura (60 °C) adecuada para el secado, de tal forma que el producto mantenga sus propiedades organolépticas.

Con respecto al costo del diseño propuesto se puede concluir que para la construcción de la máquina se alcanza un valor comercial de 4,876.85 USD, siendo un valor admisible para los pequeños y medianos productores, debido a que el equipo es rentable, en razón de que permite alcanzar una mejor calidad y garantía en el proceso de secado.

## 11. Recomendaciones

Para un futuro trabajo de investigación se menciona que se investigue otros mecanismos de secado como son las nuevas tecnologías a través de ondas electromagnéticas o mediante infrarrojo lejano que son métodos muy aplicados en otros países, dado que son amigables con el medio ambiente y no contaminan.

Dar el mantenimiento adecuado a la máquina, esto con la finalidad de evitar que se reúnan residuos en el interior de ésta y así evitar procesos de oxidación en los componentes mecánicos.

El tiempo de secado depende de la humedad inicial del cacao, en este proyecto se tomó un

valor de 55 % de acuerdo a las investigaciones realizadas, pero para algunas especies de cacao este valor varía, por lo que se recomienda primero establecer las características del producto a secar.

## Referencias

- Anacafe, A. N. D. C. (2004). Cultivo de cacao.
- Anecacao (2016). El beneficiado del cacao: secado, transporte, almacenamiento y evaluación de calidad.
- Caballero, Cava, J. A. (2015). Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2t/día.
- Espinoza, Plaza, P. y Yange, Zambrano, W. (2012). Diseño e implementación de una secadora híbrida para el control y monitoreo del proceso de secado del cacao.
- Fito, Maupoey, P., Grau, Ana, M. A., Barat, Baviera, J. M., y Albors, Sorolla, A. M. (2016). Introducción al secado de alimentos por aire caliente.
- Geankoplis, J., C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias.
- Guailas, Barbecho, F. A. y Juca, Loja, C. J. (2020). Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura.
- Manjarrez, Bastidas, A. A. (2020). Análisis y diseño de un mecanismo para secado del grano de cacao CCN51 que se produce en el Carmen provincia de Manabí.
- Miguel, Ángel, R., Henry, Alfonso, G., y Franklin, Mauricio, S. (2013). Análisis y selección de proceso de secado de cacao y diseño de prototipo de una unidad secadora tipo plataforma.
- Ocon, García, J. y Tojo, Barreiro, G. (1970). Problemas de ingeniería química. operaciones básicas. tomo ii.
- Parra, Rosero, P. (2013). Secado artificial de cacao. estado del arte.
- Parra, Rosero, P., Saavedra, R., y William, I. (2012). Modelación y simulación en ambiente ecosimpro de una cámara de secado para cacao.
- Real, Academia, E. (2020). Asociación de academias de la lengua española.
- Siguencia, Ávila, J. M. (2013). Evaluación de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita para granos de cacao CCN51.
- Instituto, Ecuatoriano, de, Normalización (2018). Cacao en grano. Requisitos.

- Lema, Barrera, Daniela, Verónica. (2013). Comparación estadística de medidas antropométricas entre mestizos, indígenas y afroecuatorianos del Ecuador.
- Alegría, Vargas, Erika. (2015). Evaluación de tratamientos previos al proceso de tostado de semillas de cacao para el diseño del área de producción de pasta de cacao (*Theobroma cacao*).
- Parra, Rosero, Pablo. (2017). Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente.
- Chaves, Cordova, Natali, Enma and Aucancela, Guacho, Carlos, Efrain. (2009). Diseño y construcción de un secador de túnel para la deshidratación del maíz.
- Oumarou, DJOBO. (2014). Efecto de los tratamientos térmicos sobre las proteínas de la leche.
- Ogata, Katsuhiko. (2010). Ingeniería de control moderna.

# ANEXOS

# Anexo A: Requisitos de diseño - Gráfica de humedad para mezclas de aire y vapor de agua.

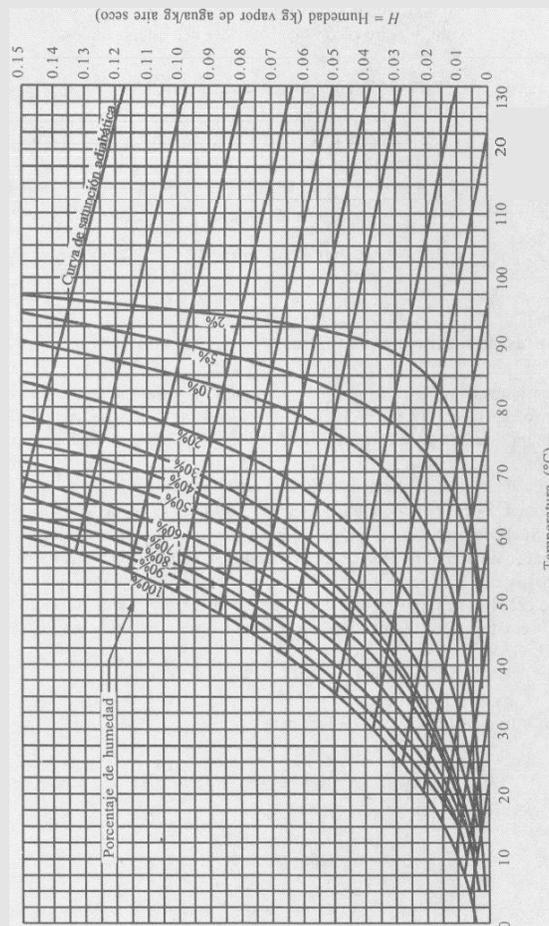


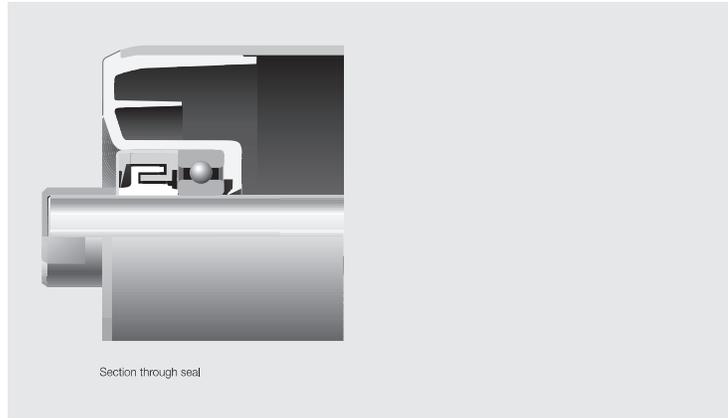
FIGURA 9.3-2. Gráfica de humedad para mezclas de aire y vapor de agua a una presión total de 101.325 kPa (760 mm de Hg) (Tomado de R.E. Treybal | Mass-Transfer Operations | 3a. ed., Nueva York: McGraw-Hill Book Company | 1980 | Reproducida con autorización.)

# Anexo B: Selección de rodillo.



## 2 Rollers

series  
**RTL 1**



Section through seal

**Ø 89 N**

Bearing 6202  
(15 x 35 x 11)

d = 15  
d<sub>i</sub> = 20  
ch = 17 \*  
s = 2  
e = 4  
g = 9

\*ch = 14 upon  
request

**Example of ordering**  
standard design  
RTL1,15B,89N,758

for special designs  
see pages 80-81

belt width mm	roller dimensions mm			weight Kg		load capacity daN					
	B	C	A	rotating parts	total	belt speed m/s					
arrangements						0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
400	160	168	186	1.1	1.4	105	95	88	83	79	75
300 500	200	208	226	1.3	1.6	105	95	88	83	79	75
400 650	250	258	276	1.5	1.9	105	95	88	83	79	75
500 800	315	323	341	1.8	2.3	105	95	88	83	79	75
300 650 1000	380	388	406	2.1	2.6	105	95	88	83	79	75
800	465	473	491	2.4	3.1	105	95	88	83	79	75
400	500	508	526	2.6	3.3	104	95	88	83	79	75
500 1000	600	608	626	3.0	3.9	85	85	85	83	79	75
650	750	758	776	3.7	4.7	68	68	68	68	68	68
800	950	958	976	4.5	5.9	53	53	53	53	53	53
1000	1150	1158	1176	5.4	7.0	44	44	44	44	44	44

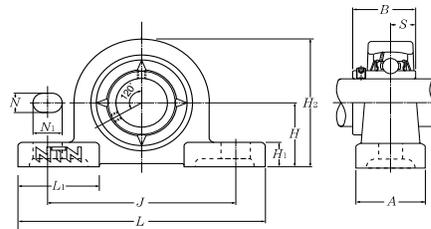
The indicated load capacity relates to a project working of 10,000 hours.

# Anexo C: Selección de chumacera.

## F-UCPM2

NTN

Chumacera tipo puente (Serie de acero inoxidable)  
Con tornillo de fijación (Prisionero)



Diámetro del eje mm	Número <sup>1)</sup> de la chumacera	Dimensiones nominales											Tamaño del perno mm
		H	L	J	A	N	N <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	B	S	
20	F-UCPM204/LP03	33.3	120	95	30	12	14	11	64	42	31	12.7	M10
25	F-UCPM205/LP03	36.5	130	105	30	12	14	12	70	42	34.1	14.3	M10
30	F-UCPM206/LP03	42.9	155	121	36	17	20	13	82	54	38.1	15.9	M14
35	F-UCPM207/LP03	47.6	161	127	38	17	20	14	92	54	42.9	17.5	M14
40	F-UCPM208/LP03	49.2	171	137	40	17	20	14	98	52	49.2	19	M14
45	F-UCPM209/LP03	54	180	146	40	17	20	14	105	60	49.2	19	M14
50	F-UCPM210/LP03	57.2	195	159	45	19	22	16	114	65	51.6	19	M16

Observación: 1) Esta serie utiliza grasa sólida en los rodamientos como estándar. También hay disponibles chumaceras de acero inoxidable con grasa de grado alimentario o resistente al calor.  
2) La carga dinámica básica  $C_r$  de los rodamientos es diferente de los rodamientos fabricados con acero estándar.

## Anexo D: Ecuaciones simplificadas para convección desde diversas superficies.

Geometría física	$N_{GR}N_{PR}$	Ecuación	
		$h = btu/hpie^{2\circ}F$	$h = W/m^2K$
		$L = pie, \Delta T = \circ F$	$L = m, \Delta T = K$
		$D = pie$	$D = m$
Aire a 101.32kPa (1atm) abs de presión			
Planos y Cilindros Verticales	$10^4 - 10^9$	$h = 0.28(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 1.37(\Delta T/L)^{1/4}$
	$> 10^9$	$h = 0.18(\Delta T/L)^{1/3}$	$h = 1.24(\Delta T)^{1/3}$
Cilindros horizontales	$10^3 - 10^9$	$h = 0.27(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 1.32(\Delta T/L)^{1/4}$
	$> 10^9$	$h = 0.18(\Delta T)^{1/3}$	$h = 1.24(\Delta T)^{1/3}$
Placa Horizontal	$10^{-5} - 2 * 10^7$	$h = 0.27(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 1.32(\Delta T/L)^{1/4}$
Placa calentada hacia arriba o enfriada hacia bajo	$2 * 10^7 - 3 * 10^{10}$	$h = 0.22(\Delta T)^{1/3}$	$h = 1.52(\Delta T)^{1/3}$
Placa calentada hacia abajo o placa enfriada hacia arriba	$3 * 10^{-5} - 3 * 10^{10}$	$h = 22(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 0.59(\Delta T/l)^{1/4}$
Planos y cilindros verticales (Agua a 70°F(294K))	$10^4 - 10^9$	$h = 26(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 127(\Delta T/L)^{1/4}$
Planos y cilindros verticales(Líquidos orgánicos a 70°F(294K))	$10^4 - 10^9$	$h = 12(\Delta T/L)^{1/4}$	$h = 59(\Delta T/L)^{1/4}$

# Anexo E: Selección de motor-reductor.



### Dati tecnici

### Technical data

P <sub>1</sub> [kW]	n <sub>2</sub> [min <sup>-1</sup> ]	M <sub>2</sub> [Nm]	sf	i			P <sub>1</sub> [kW]	n <sub>2</sub> [min <sup>-1</sup> ]	M <sub>2</sub> [Nm]	sf	i		
<b>0.18</b>						<b>0.25</b>							
63B4 (1400 min <sup>-1</sup> )	227	7	5.6	6.18	CMB402	B5/B14	71A4 (1400 min <sup>-1</sup> )	227	10	7.1	6.18	CMB502	B5/B14
	187	9	4.6	7.49		B5/B14		187	12	5.8	7.49		B5/B14
	152	11	3.8	9.20		B5/B14		152	15	4.7	9.20		B5/B14
	118	14	3.3	11.83		B5/B14		118	19	4.7	11.83		B5/B14
	112	14	3.1	12.48		B5/B14		112	20	4.5	12.48		B5/B14
	94	17	2.6	14.83		B5/B14		94	24	3.8	14.83		B5/B14
	79	20	2.2	17.63		B5/B14		79	28	3.2	17.63		B5/B14
	75	21	2.6	18.60		B5/B14		75	30	3.7	18.60		B5/B14
	63	26	2.1	22.33		B5/B14		63	36	3.1	22.33		B5/B14
	59	28	2.0	23.91		B5/B14		59	38	2.9	23.91		B5/B14
	48	33	1.9	28.89		B5/B14		48	46	2.7	28.89		B5/B14
	45	36	1.8	30.84		B5/B14		45	49	2.5	30.84		B5/B14
	42	39	1.7	33.57		B5/B14		42	54	2.3	33.57		B5/B14
	39	41	1.6	35.63		B5/B14		39	57	2.2	35.63		B5/B14
	33	49	1.3	42.75		B5/B14		33	69	1.8	42.75		B5/B14
	25	64	1.0	55.31		B5/B14		25	89	1.4	55.31		B5/B14
	24	68	0.95	59.06		B5/B14		24	95	1.3	59.06		B5/B14
	22	74	0.88	64.29		B5/B14		22	103	1.2	64.29		B5/B14
	19	84	0.8	72.50		B5/B14		19	116	1.1	72.50		B5/B14
	45	36	3.5	30.84		CMB502	B5/B14	41	54	4.1	33.81		CMB633
	42	39	3.2	33.57	B5/B14			39	58	3.8	35.92	B5/B14	
	39	41	3.0	35.63	B5/B14			36	62	4.0	38.88	B5/B14	
	33	49	2.5	42.75	B5/B14			30	76	3.3	47.16	B5/B14	
	25	64	2.0	55.31	B5/B14			24	93	2.7	57.93	B5/B14	
	24	68	1.8	59.06	B5/B14			23	99	2.5	61.63	B5/B14	
	22	74	1.7	64.29	B5/B14			19	119	2.1	73.96	B5/B14	
	19	84	1.5	72.50	B5/B14			18	126	2.0	78.58	B5/B14	
	24	67	3.7	57.93	CMB633		B5/B14	15	150	1.7	93.33	B5/B14	
	23	71	3.5	61.63			B5/B14		10	225	1.1	140.52	
	19	85	2.9	73.96		B5/B14		7.7	291	0.9	181.81	B5/B14	
	18	91	2.8	78.58		B5/B14		24	92	5.4	57.52	CMB903	B5
	15	108	2.3	93.33		B5/B14		21	106	4.7	66.17		B5
	10	162	1.5	140.52		B5/B14		17	133	3.7	83.20		B5
	7.7	210	1.2	181.81		B5/B14		13	173	2.9	108.09		B5
	6.6	244	1.0	211.31		B5/B14		11	212	2.4	132.23		B5
	5.9	275	0.9	238.31	B5/B14		9.5	237	2.1	147.92	B5		
							8.4	268	1.9	167.09	B5		
							7.3	306	1.6	191.06	B5		
							6.3	356	1.4	221.88	B5		
							5.3	422	1.2	262.96	B5		
<b>0.25</b>						<b>0.37</b>							
71A4 (1400 min <sup>-1</sup> )	227	10	4.0	6.18	CMB402	B5/B14	71B4 (1400 min <sup>-1</sup> )	227	15	2.7	6.18	CMB402	B5/B14
	187	12	3.3	7.49		B5/B14		187	18	2.3	7.49		B5/B14
	152	15	2.7	9.20		B5/B14		152	22	1.8	9.20		B5/B14
	118	19	2.4	11.83		B5/B14		118	28	1.6	11.83		B5/B14
	112	20	2.2	12.48		B5/B14		112	30	1.5	12.48		B5/B14
	94	24	1.9	14.83		B5/B14		94	35	1.3	14.83		B5/B14
	79	28	1.6	17.63		B5/B14		79	42	1.1	17.63		B5/B14
	75	30	1.8	18.60		B5/B14		75	44	1.2	18.60		B5/B14
	63	36	1.5	22.33		B5/B14		63	53	1.0	22.33		B5/B14
	59	38	1.4	23.91		B5/B14		59	57	1.0	23.91		B5/B14
	48	46	1.4	28.89		B5/B14		48	69	0.9	28.89		B5/B14
	45	49	1.3	30.84		B5/B14		45	73	0.9	30.84		B5/B14
	42	54	1.2	33.57		B5/B14							
	39	57	1.1	35.63		B5/B14							
	33	69	0.9	42.75		B5/B14							

CMB



## Anexo F: Selección del blower.

Model	Drive	Volume	SP	Power	Motor	Speed	Hz	RPM	Motor	Max (Fan)
		CFM	inwc	HP	HP	Control			RPM	RPM
CP12D8	Direct	1590	0	,534	,000	NONE	-	860	1200	860
CP10D17	Direct	1570	0	,947	2,00	VFD	47	1365	1725	1751
CP12D8	Direct	1570	0	,514	,000	VFD	59	850	860	964
CP12D11	Direct	1570	0	,514	1	VFD	45	850	1140	1214

## Anexo G: Requisitos de diseño - Flujo Volumétrico.



**Duct Information**

Air Flow (cfm)

Diameter (in)  - OR - Height  × Width

Length (ft)

Roughness

Altitude (ft)

Air Temp (°F)

**Results**

Equivalent Diam (in)	<input type="text" value="8"/>	Results calculated per 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook Chapter 34, Equations 19, 21, 22, 24, 25 and Table 1.
Air Density (lb/ft <sup>3</sup> )	<input type="text" value="0,0749"/>	
Duct Velocity (fpm)	<input type="text" value="4498"/>	
S.P. Loss (inwg)	<input type="text" value="0,183"/>	

# Anexo H: Selección de calentadores de ducto.



### QFD and QID Air Duct Heaters

- » Install the heaters in a horizontal duct with the terminal housing at the side or bottom.
- » Use tandem mounting (several heaters in series) when possible.

**Note:** Units in Table 2 are only examples. For safety reasons, refer to this table as a guideline for custom design orders. Custom designed units will be built according to the requirements of your specific application.

**Note:** QFE and QIE Incoloy® tubular duct heaters are only available upon request

### COMMON FEATURES

- » Primary linear cutout: 160°F (71°C) 277/600 VAC, 25/10 AMP non-inductive
- » Secondary linear cutout - Manual reset complete with back-up magnetic contactor on units under 300V, 30 kW and less;
- » 225°F (107°C) 277/600 VAC, 25/10 AMP non-inductive

### ALTERNATIVE AUXILIARY DUCT HEATER CONTROLS

The following controls are supplied by WATTCO™ on the duct heater or are available as an EEMAC rated control panel for wall mount:

- » Duct thermostats
  - QFD (1 stage)
  - QFD (2 stage)
  - QFD (0 -135 OHM)
- » Controller
- » Room thermostat
- » Bulb holders
- » Silent contactors
- » SCR controllers
- » Sail switch
- » Fixed pressure differential switch
- » Main disconnect
- » Pneumatic electric switches
- » On-off switch
- » Magnetic contactors
- » Step controllers
- » Load fuses
- » Stage fuses
- » HRC fusing
- » Control transformers
- » Bottom terminal box
- » Secondary manual reset thermal cut-out
- » Fan interlock relay
- » Protective screens
- » Pilot lights



TYPE QFD



TYPE QID

TABLE 2  
Types QFD/QID Duct Heaters with Finned Elements

KW	STANDARD VOLTAGES					DIMENSIONS		MINIMUM AIR FLOW CFM (M <sup>3</sup> /MIN)	NO. OF ELEMS.	CATALOG FLANGE TYPE / QFD	NUMBERS INSERT TYPE / QID	APPROX. WEIGHT LBS (KG)
	120V 1φ	208V 1φ	240V 3φ	480V 1φ	600V 3φ	A	B					
1	✓	✓	—	—	—	6 (152)	6 (152)	50 (1.4)	2	QFD0010	QID0010	15 (7)
2.5	✓	✓	✓	—	—	6 (152)	6 (152)	150 (4.2)	3	QFD0025	QID0025	15 (7)
7.5	—	✓	✓	✓	✓	14 (356)	8 (203)	390 (11.0)	4	QFD0075	QID0075	20 (9)
10	—	✓	✓	✓	✓	14 (356)	12 (305)	500 (14.1)	6	QFD0100	QID0100	25 (11)
12.5	—	✓	✓	✓	✓	16 (406)	12 (305)	625 (17.7)	6	QFD0125	QID0125	30 (14)
15	—	✓	✓	✓	✓	18 (457)	12 (305)	750 (21.2)	6	QFD0150	QID0150	30 (14)
17.5	—	✓	✓	✓	✓	18 (457)	14 (356)	875 (24.8)	6	QFD0175	QID0175	35 (16)
20	—	✓	✓	✓	✓	18 (457)	16 (406)	1000 (28.3)	6	QFD0200	QID0200	35 (16)
25	—	—	✓	✓	✓	20 (508)	18 (457)	1250 (35.4)	9	QFD0250	QID0250	50 (23)
30	—	—	✓	✓	✓	24 (610)	18 (457)	1500 (42.4)	9	QFD0300	QID0300	55 (25)
35	—	—	✓	✓	✓	24 (610)	22 (559)	1650 (46.7)	9	QFD0350	QID0350	60 (27)
40	—	—	✓	✓	✓	26 (660)	24 (610)	2050 (58.0)	12	QFD0400	QID0400	70 (32)
45	—	—	✓	✓	✓	28 (711)	24 (610)	2200 (62.2)	12	QFD0450	QID0450	75 (34)
50	—	—	✓	✓	✓	28 (711)	26 (660)	2500 (70.7)	12	QFD0500	QID0500	80 (36)
60	—	—	✓	✓	✓	30 (762)	30 (762)	3000 (84.9)	15	QFD0600	QID0600	95 (43)
80	—	—	✓	✓	✓	36 (914)	32 (813)	4000 (113.1)	15	QFD0800	QID0800	105 (48)
100	—	—	✓	✓	✓	42 (1067)	36 (914)	5250 (148.5)	18	QFD1000	QID1000	130 (59)
120	—	—	✓	✓	✓	48 (1219)	36 (914)	6000 (170.0)	18	QFD1200	QID1200	150 (68)

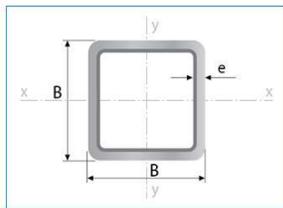
(1-800-492-8826)

www.wattco.com

5

# Anexo I: Catálogo de tubo estructural cuadrado.

## Tubería Estructural Cuadrada



Largo Normal:  
6 metros  
Recubrimiento:  
Negro o Galvanizado  
Calidad de Acero:  
JIS G 3132, ASTM A 36 y ASTM A572 Gr 50  
Norma de Fabricación:  
ASTM A 500/ NTE INEN 2415  
Espesores:  
Desde 1,40 a 6,00 mm  
Observaciones:  
Otras dimensiones y largos,  
previa consulta

### Aplicaciones

- Automotriz y de autopartes: carrocería y remolques.
- Agroganadera: maquinaria e implementos industriales, agrícolas, avícolas y ganaderos.
- Señalización y vialidad: soportes.
- Aparatos de gimnasia y fitness.
- Construcción: columnas.
- Estructuras: galpones y naves industriales, edificios, soporte de techos.



Designaciones	Área	Peso	Propiedades Estáticas			
			Eje x-x = y-y			
B	e	A	P	I	W	i
mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
20	1,40	0,99	0,78	0,56	0,56	0,75
	1,50	1,05	0,83	0,58	0,58	0,75
	1,80	1,23	0,96	0,66	0,66	0,73
	2,00	1,34	1,05	0,70	0,70	0,72
25	1,40	1,27	1,00	1,16	0,93	0,95
	1,50	1,35	1,06	1,22	0,97	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	1,11	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	1,19	0,93
30	1,40	1,55	1,22	2,08	1,39	1,16
	1,50	1,65	1,30	2,20	1,47	1,15
	1,80	1,95	1,53	2,53	1,68	1,14
	2,00	2,14	1,68	2,73	1,82	1,13
38	1,40	2,00	1,57	4,41	2,32	1,48
	1,50	2,13	1,67	4,67	2,46	1,48
	1,80	2,52	1,98	5,42	2,85	1,47
	2,00	2,78	2,18	5,89	3,10	1,46
40	1,40	2,11	1,66	5,18	2,59	1,57
	1,50	2,25	1,77	5,49	2,75	1,56
	1,80	2,67	2,09	6,39	3,19	1,55
	2,00	2,94	2,31	6,95	3,47	1,54
	2,50	3,59	2,82	8,23	4,12	1,51
	3,00	4,21	3,30	9,36	4,68	1,49
	4,00	5,35	4,20	11,18	5,59	1,45
50	1,40	2,67	2,10	10,42	4,17	1,97
	1,50	2,85	2,24	11,07	4,43	1,97
	1,80	3,39	2,66	12,95	5,18	1,96
	2,00	3,74	2,93	14,15	5,66	1,95
	2,50	4,59	3,60	16,96	6,78	1,92
	3,00	5,41	4,25	19,50	7,80	1,90
	4,00	6,95	5,45	23,84	9,54	1,85
60	1,50	3,45	2,71	19,52	6,51	2,38
	1,80	4,11	3,22	22,95	7,65	2,36
	2,00	4,54	3,56	25,15	8,38	2,35
	2,50	5,59	4,39	30,36	10,12	2,33
	3,00	6,61	5,19	35,17	11,72	2,31
	4,00	8,55	6,71	43,65	14,55	2,26
70	1,50	4,05	3,18	31,46	8,99	2,79
	1,80	4,83	3,79	37,09	10,60	2,77
	2,00	5,34	4,19	40,73	11,64	2,76
	2,50	6,59	5,17	49,43	14,12	2,74
	3,00	7,81	6,13	57,56	16,45	2,72
	4,00	10,15	7,97	72,22	20,64	2,67
75	1,50	4,35	3,42	38,92	10,38	2,99
	1,80	5,19	4,07	45,95	12,25	2,98
	2,00	5,74	4,50	50,50	13,47	2,97
	2,50	7,09	5,56	61,40	16,37	2,94
	3,00	8,41	6,60	71,65	19,11	2,92
	4,00	10,95	8,59	90,29	24,08	2,87
90	1,80	6,27	4,92	80,71	17,94	3,59
	2,00	6,94	5,45	88,87	19,75	3,58
	2,50	8,59	6,74	108,57	24,13	3,56
	3,00	10,21	8,01	127,32	28,29	3,53
	4,00	13,35	10,48	162,02	36,01	3,48
100	1,80	6,99	5,48	111,62	22,32	4,00
	2,00	7,74	6,07	123,01	24,60	3,99
	2,50	9,59	7,53	150,65	30,13	3,96
	3,00	11,41	8,96	177,08	35,42	3,94
	4,00	14,95	11,73	226,46	45,29	3,89
	5,00	18,36	14,41	271,36	54,27	3,84
	6,00	21,63	16,98	312,00	62,40	3,80
120	2,50	11,59	9,10	264,81	44,13	4,78
	3,00	13,81	10,84	312,38	52,06	4,76
	4,00	18,15	14,25	402,38	67,06	4,71
	4,50	20,27	15,91	444,87	74,14	4,68
	5,00	22,36	17,55	485,73	80,95	4,66
	6,00	26,43	20,75	562,68	93,78	4,61
125	3,00	14,41	11,31	354,53	56,73	4,96
	4,00	18,95	14,87	457,33	73,17	4,91
	5,00	23,36	18,33	552,87	88,46	4,87
	6,00	27,63	21,69	641,41	102,63	4,82
135	3,00	15,61	12,25	449,88	66,65	5,37
	4,00	20,55	16,13	581,80	86,19	5,32
	5,00	25,36	19,90	705,16	104,47	5,27
	6,00	30,03	23,58	820,25	121,52	5,23
150	3,00	17,41	13,67	622,76	83,03	5,98
	4,00	22,95	18,01	807,92	107,72	5,93
	5,00	28,36	22,26	982,37	130,98	5,89
	6,00	33,63	26,40	1146,43	152,86	5,84

## Anexo J: Factores de carga para miembros $Kl/r$ Acero A-36.

Esfuerzos admisibles en $\text{kg/cm}^2$ para miembros a compresión									
Miembros principales y secundarios $\frac{Kl}{r} \leq 120$					Miembros principales $120 \leq \frac{Kl}{r} \leq 200$				
$\frac{Kl}{r}$	$F_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\frac{Kl}{r}$	$F_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\frac{Kl}{r}$	$F_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\frac{Kl}{r}$	$F_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\frac{Kl}{r}$	$F_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
1	1516	41	1344	81	1072	121	713	161	405
2	1513	42	1338	82	1064	122	702	162	400
3	1510	43	1332	83	1056	123	693	163	395
4	1507	44	1326	84	1048	124	682	164	390
5	1504	45	1320	85	1040	125	671	165	386
6	1501	46	1315	86	1031	126	662	166	381
7	1498	47	1308	87	1024	127	651	167	376
8	1494	48	1303	88	1015	128	641	168	372
9	1491	49	1297	89	1007	129	631	169	368
10	1488	50	1290	90	998	130	622	170	364
11	1484	51	1284	91	991	131	612	171	359
12	1480	52	1278	92	982	132	603	172	355
13	1477	53	1271	93	973	133	593	173	351
14	1473	54	1265	94	965	134	585	174	347
15	1469	55	1259	95	956	135	576	175	343
16	1465	56	1252	96	948	136	567	176	339
17	1461	57	1245	97	939	137	560	177	335
18	1457	58	1239	98	930	138	551	178	331
19	1453	59	1233	99	921	139	543	179	328
20	1448	60	1226	100	913	140	536	180	324
21	1444	61	1218	101	903	141	528	181	321
22	1440	62	1212	102	894	142	521	182	317
23	1435	63	1205	103	885	143	513	183	314
24	1431	64	1198	104	877	144	506	184	310
25	1426	65	1191	105	867	145	499	185	307
26	1422	66	1184	106	858	146	493	186	304
27	1417	67	1177	107	849	147	486	187	300
28	1412	68	1170	108	840	148	480	188	297
29	1407	69	1162	109	830	149	473	189	294
30	1402	70	1155	110	821	150	467	190	291
31	1397	71	1148	111	811	151	461	191	288
32	1392	72	1140	112	802	152	454	192	285
33	1387	73	1133	113	792	153	449	193	282
34	1382	74	1126	114	783	154	443	194	279
35	1377	75	1118	115	773	155	437	195	276
36	1371	76	1110	116	763	156	432	196	274
37	1365	77	1103	117	753	157	426	197	271
38	1360	78	1095	118	743	158	420	198	268
39	1355	79	1088	119	733	159	416	199	265
40	1349	80	1080	120	723	160	410	200	262