



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

**IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA
PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN
FRONTERAS USA GUATEMALA ONG**

Allan Esteban Juárez Montufar

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, octubre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA
PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN
FRONTERAS USA GUATEMALA ONG**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALLAN ESTEBAN JUÁREZ MONTUFAR

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

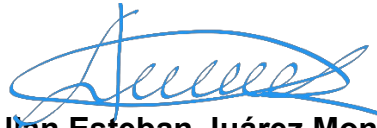
DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS USA GUATEMALA ONG

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de noviembre de 2021.


Allan Esteban Juárez Montúfar

Guatemala, 26 de septiembre de 2022

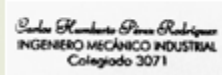
Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Morales:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación del estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, **Allan Esteban Juárez Montufar**, quien se identifica con el Registro Académico **201404242** y CUI **2675652400101** con el tema de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS USA GUATEMALA ONG**, y a mi criterio el mismo cumple con los objetivos planteados para su desarrollo.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo. Sin otro particular, me despido de usted cordialmente,

atentamente,



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Ingeniera Mecánico Industrial
Colegiado No. 3071
Asesor

Ref.EIM.049.2022

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS USA GUATEMALA ONG** desarrollado por el estudiante: **Allan Esteban Juárez Montufar** con Registro Académico **201404242** y CUI **2675652400101** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área de Materiales de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, septiembre 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LNG.DIRECTOR.216.EIM.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS USA GUATEMALA ONG.**, presentado por: **Allan Esteban Juárez Montufar**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre de 2023

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.720.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE SECADORA DE CARDAMOMO A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO PARA ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS USA GUATEMALA ONG**, presentado por: **Allan Esteban Juárez Montufar**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, octubre de 2023

JFGR/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la templanza y la guía espiritual, mía y de mi familia.
Mis padres	Ing. Berny Juárez y Astrid Montufar. Por siempre motivarme a pesar de mis defectos.
Mis abuelas	María Elena Toledo Chinchilla (q. e. p. d.), Dra. María Teresa Gatica y Celia Edilia Cano Gámez, por su amor incondicional.
Mis abuelos	Moisés Montufar (q. e. p. d.) y Guillermo Castillo, por su sabio consejo.
Mis tíos	Lic. Adys Montufar (q. e. p. d.), Amilsa y Abner Montufar, Lic. Roberto Ramírez, Licda. Jennifer Juárez. Por su ejemplo y gran cariño.
Mis hermanos	Sofía (q. e. p. d.), Sebastián, Adriana, Jacquelin y Gabriela Juárez, por su amistad y cariño fraternal.
Mis primos	Jefry, Josseline, Valeria, José Roberto y Mateo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitir formarme como profesional, como persona y como guatemalteco.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme valiosos conocimientos y experiencias para mi vida profesional y personal.
Mi asesor de tesis y catedrático	Ingeniero Carlos Humberto Pérez Rodríguez por su labor y apoyo altruista.
Mi amigo de la facultad	Erick Martínez y familia por su amistad genuina.
Señorita	María Isabel Pérez por su invaluable compañía incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. REQUERIMIENTOS DE SECADORA A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO	1
1.1. Requerimientos generales	1
1.1.1. Capacidad máxima	1
1.1.2. Transportabilidad	2
1.1.3. Manufactura	2
1.2. Variables experimentales	2
1.2.1. Caudal de aire.....	2
1.2.2. Temperatura del aire	3
1.2.3. Cama de cardamomo	3
1.2.4. Dirección de flujo de aire	3
1.2.4.1. Cama de cardamomo para flujo horizontal	4
1.3. Parámetros de medición	4
1.3.1. Velocidad de aire	4
1.3.2. Presión estática	4
1.3.3. Temperatura del aire	5
1.3.4. Humedad relativa	5

1.3.5.	Masa de cardamomo	5
1.3.6.	Consumo de energía	5
2.	CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO	7
2.1.	Potencia del motor	7
2.1.1.	Caudal específico	7
2.1.2.	Caída de presión estática	9
2.2.	Cámaras de secado	14
2.2.1.	Vertical	14
2.2.2.	Horizontal	16
2.3.	Quemador de gas LP	17
2.4.	Cámara de calentamiento	19
3.	PLANOS Y MODELO 3D	21
3.1.	Configuración vertical	21
3.1.1.	Transición de salida de aire del ventilador a cámara de calentamiento	21
3.1.2.	Cámara de calentamiento	23
3.1.3.	Tapa transición	24
3.1.4.	Codo circular a 90°	25
3.1.5.	Cámara de secado vertical	26
3.1.6.	Conjunto.....	27
3.2.	Configuración horizontal	27
3.2.1.	Tramo de aire caliente	28
3.2.2.	Transición de cámara de calentamiento a cámara de secado horizontal.....	28
3.2.3.	Tapa transición	29
3.2.4.	Cámara de secado horizontal	30
3.2.5.	Porta charolas	30

3.2.6.	Charolas de cardamomo	32
3.2.7.	Conjunto	34
4.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE	35
4.1.	Piezas prefabricadas	35
4.1.1.	Ventilador centrífugo	35
4.1.2.	Variador de frecuencia	37
4.1.3.	Quemador de propano	38
4.1.3.1.	Instrumentación	38
4.2.	Ductos	39
4.2.1.	Configuración vertical	40
4.2.2.	Configuración horizontal	40
4.3.	Conexiones	41
4.4.	Cuantificación de materiales	44
4.4.1.	Materiales de herrería	45
4.4.1.1.	Porta bandejas y bandejas	46
4.4.2.	Misceláneos	48
4.5.	Acondicionamiento cámara de calentamiento	50
4.6.	Ensamble final.....	51
4.6.1.	Transportabilidad	55
5.	SENSORES DE MEDICIÓN	57
5.1.	Velocidad de aire, presión estática, presión de velocidad y absoluta	57
5.2.	Temperatura y humedad relativa	58
5.3.	Gasto energético	59
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63

REFERENCIAS 65

APÉNDICE 67

ANEXOS 69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Caída de presión estática	9
Figura 2.	Comparativa de granos de soya y maíz respectivamente	10
Figura 3.	Granos de cardamomo	10
Figura 4.	Distribución de valores de regresión cuadrática y curva de cardamomo	11
Figura 5.	Capacidad calorífica quemadores PYPESA	18
Figura 6.	Dimensiones de quemador de gas LP	19
Figura 7.	Brida de transición	21
Figura 8.	Medidas de bridas según modelo	22
Figura 9.	Transición con brida y pestaña	22
Figura 10.	Cámara de calentamiento	23
Figura 11.	Tapa transición 6 pulgadas	24
Figura 12.	Codo circular	25
Figura 13.	Cámara de secado vertical	26
Figura 14.	Disposición elementos secadora vertical	27
Figura 15.	Cono transición de 6 a 8 pulgadas con pestañas	28
Figura 16.	Transición de cono a cámara de secado	29
Figura 17.	Cámara de secado horizontal	30
Figura 18.	Bastidor porta charolas	31
Figura 19.	Porta charolas elevación.....	31
Figura 20.	Porta charolas perfil	32
Figura 21.	Charola porta cardamomo planta	33
Figura 22.	Charola porta cardamomo perfil	33

Figura 23.	Configuración horizontal	34
Figura 24.	Ventiladores centrífugos	35
Figura 25.	Curva característica de ventiladores centrífugos	36
Figura 26.	Ventilador centrífugo CST-800 Soler&Palau	37
Figura 27.	Quemador de gas LP e instrumentación	39
Figura 28.	Ducto vertical con rejilla	40
Figura 29.	Ducto y cámara horizontal	41
Figura 30.	Conexión de transición	42
Figura 31.	Conexiones herméticas	43
Figura 32.	Conexión configuración horizontal	44
Figura 33.	Bandejas armadas	46
Figura 34.	Porta bandejas y bandejas terminadas y colocadas	47
Figura 35.	Porta bandejas en cámara de secado horizontal	47
Figura 36.	Sistema de puertas dobles de inspección y extracción	49
Figura 37.	Empaques de neopreno	50
Figura 38.	Acondicionamiento de cámara de calentamiento	51
Figura 39.	Secadora de cardamomo ensamblada (configuración vertical) ...	54
Figura 40.	Secadora de cardamomo ensamblada (configuración horizontal)	54
Figura 41.	Anemómetro con tubo de Pitot	57
Figura 42.	Termómetro y medidor de humedad relativa	58

TABLAS

Tabla 1.	Regresión cuadrática	11
Tabla 2.	Caída de presión específica	12
Tabla 3.	Caída de presión estática	13
Tabla 4.	Potencia del motor	13
Tabla 5.	Cuantificación material de herrería	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballos de fuerza
cm	Centímetros
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
Hz	Hertz
kg	Kilogramos
lb	Libras
m	Metros
kBTU	Miles de BTU
mm	Milímetros
Pa	Pascales
ft	Pies
ft ²	Pies cuadrados
CFM	Pies cúbicos por minuto
”	Pulgadas
inH ₂ O / inwg	Pulgadas de columna de agua
BTU	Unidad térmica británica
V	Voltios

GLOSARIO

Bastidor	Estructura compuesta de largueros y travesaños a la que se fijan los demás elementos que conforman una estructura.
Brida	Elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías que permite ser desmontado sin operaciones destructivas.
Caudal	Cantidad de fluido que circula por una sección de ducto por unidad de tiempo.
<i>Engineers Without Borders</i>	EWB, Ingenieros Sin Fronteras.
Frecuencia	En electricidad es el número de veces que una onda repite su ciclo por periodo de tiempo.
ONG	Organización no gubernamental.
Ventilador centrífugo	Ventilador que impulsa el aire desde su centro hacia afuera mediante sus álabes.

RESUMEN

Según Grézaud (2022) el cardamomo es un producto insignia de la flora de Guatemala el cual le ha dado renombre internacional al país por ser el mayor exportador de este en el mundo. Para explorar el comportamiento del cardamomo durante su proceso de secado e incrementar la calidad y rentabilidad de este producto en el territorio nacional se implementó una secadora a escala para pruebas de laboratorio con la que se pudiese tener control sobre variables clave y llevar a cabo ensayos controlados para determinar cambios en el comportamiento mientras estas variables son alteradas.

Para determinar las dimensiones y la naturaleza de las piezas que conforman la secadora se recurrió a distintas literaturas y cálculos básicos con ecuaciones científicas y empíricas. Para ilustrar el modelo teórico de las piezas propias de la secadora y servir de guía para fabricantes y encargados del proyecto, se utilizó software de modelación 3D de ingeniería de fácil reconocimiento. Por último, para impulsar la secadora se obtuvieron componentes prefabricados disponibles en el país para asegurar un funcionamiento controlado.

Luego de lograr construir y obtener todos los componentes de la secadora de manera que fuesen fácilmente transportables, se procedió a su montaje, siendo adaptados los sensores seleccionados para las lecturas de los parámetros a observar a la hora de realizar ensayos y poder de esta manera tabular los datos para su posterior análisis y reformulación de valores de variables para la retroalimentación del funcionamiento de la secadora.

OBJETIVOS

General

Implementar una secadora de cardamomo a escala para pruebas de laboratorio para Asociación Ingenieros Sin Fronteras USA Guatemala ONG.

Específicos

1. Diseñar una secadora que cumpla con todos los requerimientos por parte de EWB USA Guatemala.
2. Crear planos y esquemas de la máquina como guía principal del proyecto.
3. Dimensionar y adquirir el equipo necesario para la secadora que cumpla con las necesidades de diseño y que se encuentre disponible en el territorio nacional.
4. Construir y ensamblar piezas de la secadora para su presentación y entrega final.

INTRODUCCIÓN

Siendo Guatemala el mayor productor y exportador de cardamomo del mundo, Asam (2007) explica que aún se utilizan los mismos métodos de secado de antaño y mucho se desconoce del comportamiento de la dicha semilla ante las variables que intervienen en su proceso de secado ya que no existen estándares óptimos para dicho proceso y se basa en conocimientos empíricos dando como resultado un desaprovechamiento del producto y pérdidas a todo lo largo de la línea de negocio.

Con el fin de obtener parámetros del proceso de secado de la semilla de cardamomo y como la variación de estos afecta el producto final, tales como la temperatura, el caudal de aire, la dirección en que el aire impacta la semilla y la cantidad de semillas secadas a la vez; la Asociación Ingenieros Sin Fronteras USA Guatemala ONG (EWB) planteó el proyecto de la implementación de una secadora a escala para pruebas de laboratorio capaz de alterar estas variables de manera estable.

Dados los rangos en que estas variables deberían mantenerse la implementación constó de una etapa de diseño, una de cotización de equipo y materiales, una de construcción y finalmente una etapa de ensamblaje. Todo el proceso fue llevado a cabo con la supervisión y asesoría del director del país de Ingenieros Sin Fronteras (EWB) y un equipo colaborador de docentes y estudiantes de la Universidad de Illinois Urbana-Champaign E.E.U.U.

1. REQUERIMIENTOS DE SECADORA A ESCALA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO

Una lista de requerimientos es presentada por Asociación Ingenieros Sin Fronteras / USA Guatemala ONG para delimitar el alcance del proyecto. Mediante un documento se dividen los requerimientos en:

- Resultados a evaluar
- Variables experimentales
- Parámetros de medición
- Requerimientos en general

El objetivo de la organización con este proyecto es el de determinar el comportamiento del grano de cardamomo durante el proceso de secado y como este se ve afectado cuando variables clave del proceso son modificadas.

1.1. Requerimientos generales

Las pautas con las que se pretende la construcción de la secadora a escala son las siguientes:

1.1.1. Capacidad máxima

La secadora debe tener una capacidad máxima de peso de cardamomo cereza en cualquiera de sus formatos:

- Capacidad máxima: 20lb de cardamomo cereza

1.1.2. Transportabilidad

Ya que la secadora debe ser construida den la Ciudad de Guatemala y puesta en marcha en el municipio de Chisec, en el departamento de Alta Verapaz, cerca de los plantíos de cardamomo; la secadora debe ser fácilmente transportable con un diseño desarmable y de fácil ensamblaje.

1.1.3. Manufactura

La secadora debe ser manufacturada con materiales, componentes y técnicas disponibles en Guatemala.

1.2. Variables experimentales

Como requerimiento la secadora debe ser capaz de crear y mantener condiciones dentro de los parámetros establecidos para las siguientes variables clave del proceso.

1.2.1. Caudal de aire

Inicialmente se pretendía tener un caudal de aire entre 0.5 y 3 CFM por cada libra de cardamomo cereza de la máxima capacidad de la secadora, lo cual equivalía a un rango entre (2.5 – 60) CFM. Finalmente se optó por un rango intermedio que se apegara más a los niveles de velocidad de aire y presión estática de las secadoras convencionales de leña. El rango acordado es el siguiente:

(10 – 30) CFM

1.2.2. Temperatura del aire

Inicialmente se pretendía tener un rango de temperatura con una cresta más alta que las secadoras convencionales para ver como afectaba el cardamomo. Posteriormente se redujo ya que altas temperaturas dañan el cardamomo. El rango de temperatura acordado es:

(40-60) °C

1.2.3. Cama de cardamomo

El término *Cama de cardamomo* se refiere a la profundidad que tiene la capa de cardamomo a ser secada por ensayo en cualquier formato de la secadora. El rango de profundidad o de cama de cardamomo es:

(15 – 60) cm

1.2.4. Dirección de flujo de aire

La secadora debe tener 2 formatos de secado referentes a la dirección en la que el aire corre a través del cardamomo siendo estas:

- Vertical
- Horizontal

Ambos formatos deben ser de fácil ensamblaje y comparten todas las demás especificaciones a excepción de la cama de cardamomo que solo aplica para la configuración vertical.

1.2.4.1. Cama de cardamomo para flujo horizontal

Para la configuración horizontal la secadora contará con 4 bandejas las cuales tienen una profundidad máxima de 1 ½ pulgadas. El rango de cama de cardamomo para esta configuración es:

Cama de cardamomo (horizontal):

$(\frac{1}{2} - 1 \frac{1}{2})''$.

1.3. Parámetros de medición

La secadora debe tener la capacidad de medir los parámetros de velocidad de aire, presión estática, temperatura del aire, humedad relativa, masa de cardamomo, y consumo de energía, los cuales se describen a continuación.

1.3.1. Velocidad de aire

La velocidad de aire se relaciona directamente a la relación entre la presión de velocidad y presión estática y la densidad del aire. De igual manera es útil para correlacionar el caudal de aire el cual tiene sus límites y debe ser regulado mediante el cardamomo va perdiendo humedad y por lo tanto peso. (Summer y Williams, 2009).

1.3.2. Presión estática

Summer y Williams (2009), describen que la presión estática debe ser medida antes de la cámara de granos donde esta será más alta ya que el aire no

tiene salida directa a la atmosfera. Esta deberá ser medida debido a pulgadas de agua o inH₂O.

1.3.3. Temperatura del aire

Conocer la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado es primordial al igual que a la salida junto con la temperatura del ambiente.

1.3.4. Humedad relativa

La humedad relativa a la salida de la cámara de secado da la pauta para saber la medida en la que la secadora se está deshaciendo de la humedad del cardamomo comparándola con la humedad relativa del ambiente. (Summer y Williams, 2009).

1.3.5. Masa de cardamomo

Con el peso y el volumen que abarca el cardamomo en su formato cereza y pergamino (antes y después del secado), se conocerá la densidad de este y la masa de agua que se eliminó del mismo durante el proceso de secado. (Summer y Williams, 2009).

1.3.6. Consumo de energía

La principal fuente de energía térmica será gas propano incinerado por un quemador; el consumo de este se medirá pesando las libras de gas licuado antes y después del proceso de secado. Luego conociendo el factor energético del gas propano se establecerá el consumo energético debido a miles de BTU o kBTU. (Wellmann, 2015).

2. CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO

2.1. Potencia del motor

Para calcular la potencia nominal del motor que impulsará el ventilador centrífugo, asumiendo una eficiencia en motor del 50 % se utilizó la siguiente ecuación. Summer y Williams (2009):

$$P = CFM * \frac{\Delta P}{3178} (HP)$$

Donde:

- CFM: el caudal introducido al sistema por el ventilador en CFM
- ΔP : caída de presión estática por la cama de cardamomo
- 3178: factor de conversión

2.1.1. Caudal específico

Para calcular el caudal específico definimos este como la razón de los CFM que ingresan a la cámara de secado sobre el área transversal en metros cuadrados. Siendo el objetivo replicar el caudal específico de una secadora convencional donde el caudal se encuentra entre 4,500 y 5,000 CFM y la cama de secado llamada pila tiene un área transversal circular de entre 2.3 y 3 metros de diámetro obtenemos el siguiente caudal específico:

$$Q_e = \text{Caudal específico} = \frac{Q}{\text{area}}$$

$$Q = (4500 - 5000) \text{ CFM}$$

$$D = (2.3 - 3)m$$

$$\text{Area} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (2.3 - 3)m = (4.9 - 7)m^2 = (52.7 - 94.8)ft^2$$

$$Q_e = (59.7 - 94.8)CFM/ft^2$$

$$Q_e \cong 75 \text{ CFM}/ft^2$$

Luego de obtener el caudal específico buscamos un rango entre el 50 % y el 200 % del valor nominal para poder modificar esta variable clave del proceso de secado; obtenemos lo siguiente:

$$(50 - 200)\%Q_e = (38 - 150)CFM/ft^2$$

Este caudal específico nos acerca a replicar circunstancias reales más debemos tomar en consideración los parámetros iniciales propuestos por Asociación Ingenieros Sin fronteras de 0.5 a 3 CFM por libra de cardamomo que nos da como resultado un caudal máximo de 60 CFM para el cual hallamos el caudal específico:

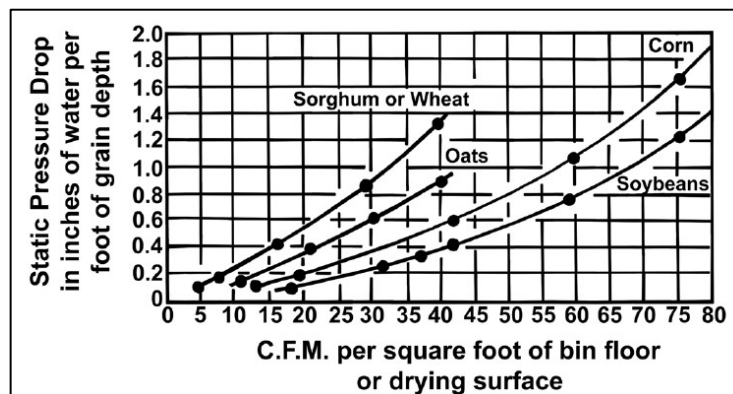
$$Q_e = \frac{3 \text{ CFM}/lb * 20lb}{0.1963ft^2} = 305 \text{ CFM}/ft^2$$

2.1.2. Caída de presión estática

Luego de conocer el caudal específico deseado a replicar, obtenemos la caída de presión causada por la cama de cardamomo a secar en la máxima capacidad de la secadora. En la gráfica 1 se observan las curvas para cada grano distinto de su caída de presión estática en pulgadas de agua por cada pie de profundidad de la cama respectiva en función del caudal específico de aire en CFM por cada pie cuadrado de área transversal de superficie de secado.

Figura 1.

Caída de presión estática



Nota. Gráfica de resistencia de los granos al flujo de aire como se muestra, por caída de presión en pulgadas de agua por pie de grano. Obtenido de P. Summer, y E. Williams (2009). *Grain and soybean drying on Georgia farms.* (p. 8.) The University of Georgia Cooperative Extension.

Asumiendo de que la curva del cardamomo en esta gráfica se encontraría entre la curva del maíz y el grano de soya por su similitud en diámetros del grano; procedemos a hacer una regresión cuadrática de los valores medios entre estas dos curvas para hallar un valor de caída de presión aproximado.

Figura 2.

Comparativa de granos de soya y maíz respectivamente



Nota. Fotografía de granos de soya y maíz. Elaboración propia.

Figura 3.

Granos de cardamomo



Nota. Fotografía de granos de cardamomo tomada en Aldea Semococh, Alta Verapaz. Elaboración propia.

Tabla 1.

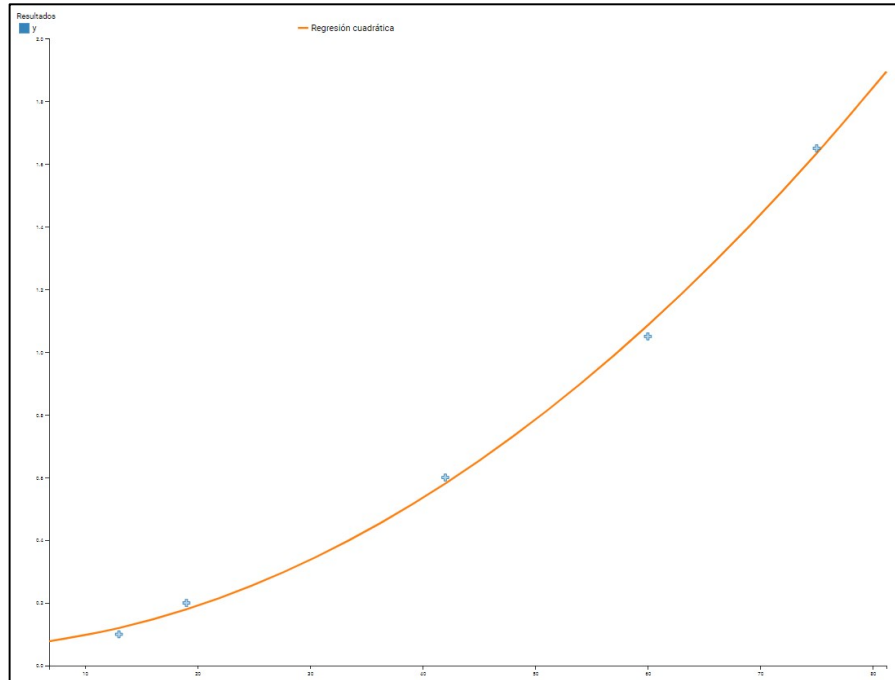
Regresión cuadrática

I	x	y	Regresión cuadrática
	6.8		0.0777
1	13	0.1	0.1199
2	19	0.2	0.1797
3	42	0.6	0.5809
4	60	1.1	1.0856
5	75	1.6	1.6339

Nota. Presentación de la regresión cuadrática. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 4.

Distribución de valores de regresión cuadrática y curva de cardamomo



Nota. Gráfica de distribución de valores de regresión cuadrática y curva de cardamomo. Elaboración propia, realizado con WolframAlpha.

Esta regresión cuadrática da como resultado el siguiente modelo para idealizar la curva de caída de presión estática por unidad de profundidad de cama de granos en función del caudal específico por unidad de área transversal de secado para el cardamomo:

$$Y = 0.0003x^2 + 0.0017x + 0.0542$$

Con esta ecuación se encuentra finalmente los valores de caída de presión específica entre el rango de caudal específico que se desea sondear entre el 50 % y el 200 % del valor nominal promedio

Tabla 2.

Caída de presión específica

X (CFM/ft²)	Y (inH₂O/ft)
40	0.5
50	0.7
75	1.4
150	7.05
305	27.56

Nota. Descripción de los valores de caídas de presión. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Por último, se multiplica la función Y por la máxima profundidad requerida de cama de cardamomo que son 60 cm o 1.97 ft y así se obtiene la caída de presión estática para distintos caudales específicos dentro del rango requerido:

Tabla 3.*Caída de presión estática*

Qe(CFM/ft²))	ΔPe(inH2O)
40	0.985
50	1.377
75	2.758
150	13.88
305	54.26

Nota. Descripción de los valores de caídas de presión estática. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Ya con los datos necesarios se obtienen los valores nominales de la potencia requerida por el motor con la ecuación 2. HP motor, según el caudal requerido y según el porcentaje del valor nominal de caudal.

Tabla 4.*Potencia del motor*

Q (CFM)	%Nominal	P Motor (HP)	
7.8	53	0.0023	
10	68	0.0043	
14.7	100	0.013	
29.4	200	0.13	Condiciones de secadora real
60	408	1.02	Condiciones propuestas EWB

Nota. Descripción de la potencia de motor. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con los valores obtenidos de potencia de 0.13 HP para condiciones de secadoras reales y de 1.02 HP para los parámetros propuestos por EWB se

consideró un valor intermedio entre los modelos comerciales de ventiladores centrífugos impulsados por motores eléctricos hallados entre estos límites que para fines prácticos se delimitaron entre $(1/8 - 1)$ HP.

Finalmente, el motor elegido para desempeñar esta tarea fue de:

$$P = \frac{3}{4} \text{ HP}$$

2.2. Cámaras de secado

Para dimensionar las cámaras de secado debemos conocer el peso específico promedio del cardamomo cereza incluyendo su factor de acomodamiento. (Asociación Ingenieros Sin Fronteras / USA Guatemala ONG, 2021). El dato proporcionado por EWB es el siguiente:

Peso específico del cardamomo cereza:

$$We = (850 - 920) \text{ Kg/m}^3$$

2.2.1. Vertical

La cámara de secado vertical tendrá una forma cilíndrica con un soporte para sostener el cardamomo, la cual deberá distribuir el peso máximo requerido de cardamomo con la profundidad máxima requerida de igual manera. Conociendo el peso, el peso específico y la profundidad máxima del cardamomo, procedemos primero a hallar el volumen total de cardamomo a alojar en la máxima capacidad de la secadora.

Datos:

$$h = 60cm$$

$$We = (850 - 920)kg/m^3 = (1.87 - 2.024) * 10^{-3}lb/cm^3$$

$$W = 20lb$$

Volumen en función del peso:

$$V = W/We$$

$$V = 20lb / (1.87 - 2.024) * 10^{-3}lb/cm^3$$

$$V = (10,675 - 9,863)cm^3$$

Una vez obtenido el volumen, se toma un valor intermedio entre los límites y lo introducimos en la formula del volumen del cilindro de la siguiente manera:

Volumen de un cilindro:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h$$

Luego despejamos el diámetro que es el dato que estamos buscando.

Datos:

$$V = 10,000 cm^3$$

$$h = 60 cm$$

$$D = \sqrt{\frac{V}{h}} = \sqrt{\frac{10,000}{60} * \frac{4}{\pi}} = 14.56cm = 5.83 in$$

Con los diámetros comerciales estando en pulgadas redondeamos el resultado para obtener una cámara de secado con un diámetro de:

$$D = 6in$$

Por último. Se sabe que la altura mínima de este ducto deberá ser de 60 cm para alojar el cardamomo más los traslapes para el ensamble con el resto de la secadora. Los prefabricados comerciales de diámetro de 6 in vienen en presentación de 1 yarda (91 cm) de altura lo cual beneficia tanto en el costo como en una holgura considerable para la altura.

2.2.2. Horizontal

Para la configuración horizontal se busca tener la mayor cantidad de área superficial de cardamomo en contacto con el aire caliente por lo cual la profundidad del cardamomo debe ser relativamente corta. Con esta consideración se optó por una configuración de bandejas transversales sobre un carro porta charolas dividida en 4 niveles.

Esta configuración, al contar con 4 bandejas, da como resultado una capacidad máxima de 5 libras de cardamomo cereza para cada bandeja para un total de 20 lb.

Las dimensiones predeterminadas para las bandejas son la profundidad de 1 ½ in y un ancho de 5 ½ in, con estos datos y el volumen de cardamomo calculamos el largo de las bandejas.

Datos:

Profundidad = 1 ½ in

Ancho = 5 ½ in

Volumen = (2,668.9 – 2,465)cm³

Volumen de un prisma rectangular:

$$V = P * A * L$$

$$V = (5.5) * (1.5) * L * (2.54cm/in)^2$$

$$L = (2,668.9 \sim 2465)cm^3 / (5.5)in * (1.5)in * (2.54cm/in)^2$$

$$L = (50.14 \sim 46.33)cm$$

En conclusión, se redondeó la cifra a:

$$L = 50cm$$

2.3. Quemador de gas LP

El calor requerido para elevar la temperatura del aire de secado depende del volumen de aire y del gradiente de temperatura deseado como se muestra en la siguiente expresión. (Summer y Williams, 2009).

Calor requerido en aire de secado (T en °F):

$$BTU/hora = 1.1 * \Delta T * CFM$$

Datos:

$$\Delta T = T_{deseada\ max} - T_{ambiente}$$

$$CFM_{max} = 60CFM$$

$$BTU/hora = 1.1 * (176 - 60)^{\circ}F * 60CFM$$

$$BTU/hora = 7,326$$

Conociendo el dato de la energía requerida nos dirigimos al catálogo del proveedor de quemadores industriales de gas LP tipo soplete de la marca PYPESA. En la tabla de capacidades aproximadas en miles de BTU por hora, observamos que el modelo base QA-11, supera este requerimiento para sus distintas presiones de trabajo por lo cual es el modelo escogido para la secadora.

Figura 5.

Capacidad calorífica quemadores PYPESA

Diferentes presiones de trabajo / Working Pressure (BTU per hour)							
Modelo Model	Esprea Orifice	11" W.C.	1 lb	2 lb	5 lb	10 lb	20 lb
QD-21	62	10.5	15.9	23.0	36.3	51.2	71.6
QD-22	37	47.0	150.9	212.3	337.6	478.3	700.9
QD-24	26	140.0	296.7	416.9	657.4	931.1	1,317.4
QA-11	70	4.9	9.5	13.3	21.2	29.9	43.5
QA-12	64	8.0	14.5	20.5	32.5	46.0	63.9
QA-13	50	36.0	56.3	79.3	125.3	176.5	250.7
QA-14	43	44.0	104.9	145.8	230.2	324.9	460.4
QA-15	33	81.0	173.9	248.1	393.9	555.1	782.7
QA-16	26	140.0	296.7	416.9	657.4	931.1	1,317.4
QA-17	7/32"		590.0	833.9	1,319.9	1,869.3	2,634.7

Nota. Quemadores de flama delgada. (Ver anexo 2). Obtenido de PYPESA (2021). *Catálogo de productos.* (p. 30.) PYPESA.

2.4. Cámara de calentamiento

Esta cámara contendrá el quemador de gas LP modelo QA-11 de la marca PYPESA más una compuerta de ignición del mismo y sus solapas de traslape en sus extremos.

Observando el catálogo de especificaciones del quemador observamos su medida de longitud.

Figura 6.

Dimensiones de quemador de gas LP



NO PARTE/PART	Modelo	Esprea / Orifice		Dimensiones en mm / Dimensions in mm				
		LP	Natural	A	B	C	D (NPT)	E (NPT)
002E700	QA-11	70	60	180	37	54	12.7	¼"
002E701	QA-12	64	42	220	57	74	25.4	½"
002E702	QA-13	50	30	240	86	73	31.7	½"
002E703	QA-14	43	25	380	95	88	38.1	½"
002E704	QA-15	33	20	480	130	105	50.8	½"
002E705	QA-16	26	15	590	122	112	76.2	½"
002E706	QA-17	7/32	5/16	770	155	150	101.6	1"
002E707	QA-18	21/64"	-	1270	285	275	203.2	1 ¼"

Nota. Quemadores industriales para gas L.P. (Ver anexo 2). Obtenido de PYPESA (2021). *Catálogo de productos.* (p. 29.) PYPESA.

Con una longitud de 18 cm se optó por una cámara de 50 cm de largo para albergar los demás componentes dentro de la cámara y la llama que emanará el quemador.

3. PLANOS Y MODELO 3D

3.1. Configuración vertical

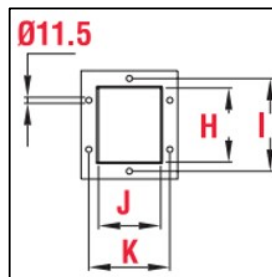
Tras haber establecido las dimensiones que satisfacen los requerimientos generales del proyecto se procedió a modelar cada pieza necesaria por separado empezando por la configuración vertical la cual es la principal ya que recrea el flujo de aire sobre el cardamomo que emplean las secadoras convencionales.

3.1.1. Transición de salida de aire del ventilador a cámara de calentamiento

La salida del ventilador centrífugo donde se fija esta transición tiene las siguientes medidas.

Figura 7.

Brida de transición



Nota. Ejemplo de centrífugos de álabes radiales. (Ver anexo 3). Obtenido de Soler&Palau (2021).
Catálogo general CSB-T. Ventilation Group. (p. 121.) MOEGSA.

Figura 8.

Medidas de bridas según modelo

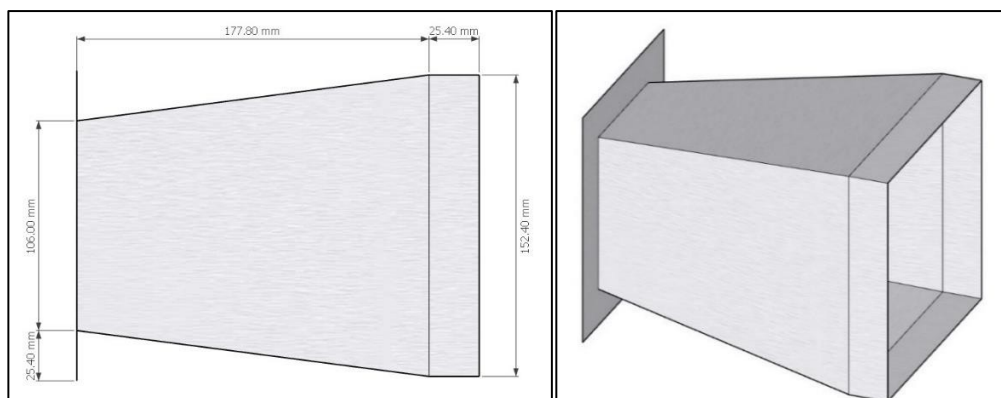
Modelo	A	B	C		D	E	F	G	H	I	J	K	ØL	ØM
			MF	TF										
CSB-T 400	359	414	317	313	230	230	112	90	70	102	60	91	147	112
CSB-T 800	426	496	344	336	257	287	140	91	106	139	81	115	153	123
CSB-T 1300	462	572	391	377	263	293	158	91	119	150	100	132	175	141
CSB-T 2000	538	630	-	451	311	341	195	116	126	162	120	154	190	156
CSB-T 2600	53	630	-	455	320	350	197	116	126	162	122	154	190	156
CSB-T 3500	8617	729	-	504	393	423	219	120	143	179	120	156	218	180

Nota. Table ejemplo de centrífugos de álabes radiales. (Ver anexo 3). Obtenido de Soler&Palau (2021). *Catálogo general CSB-T. Ventilation Group.* (p. 122.) MOEGSA.

Luego de la salida del ventilador la transición se conecta a la cámara de calentamiento que es un ducto cuadrado de 6 * 6 pulgadas. Se obtuvo la siguiente pieza de transición con las dimensiones dadas.

Figura 9.

Transición con brida y pestaña



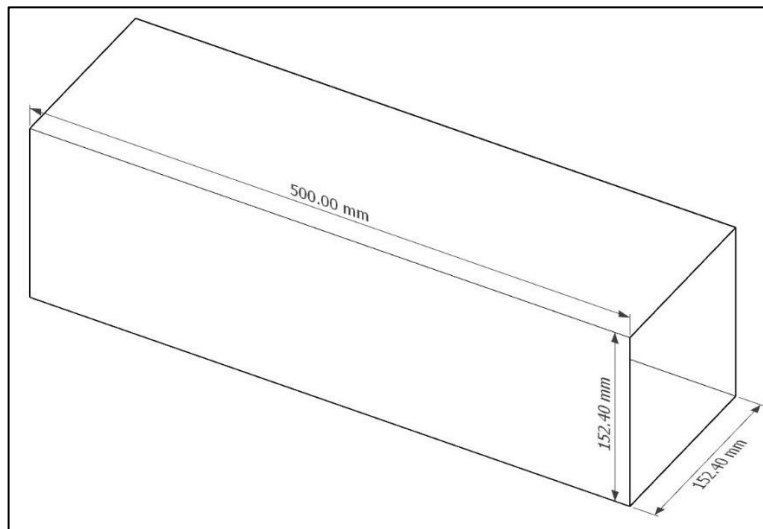
Nota. Gráfica ejemplo de pieza de transición con las dimensiones dadas. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.1.2. Cámara de calentamiento

Dentro de esta cámara se pretende calentar el aire proveniente del ventilador mediante un quemador de gas propano fijado en una de las paredes de esta. Para facilidad de instalación se optó por un ducto cuadrado de las siguientes dimensiones.

Figura 10.

Cámara de calentamiento



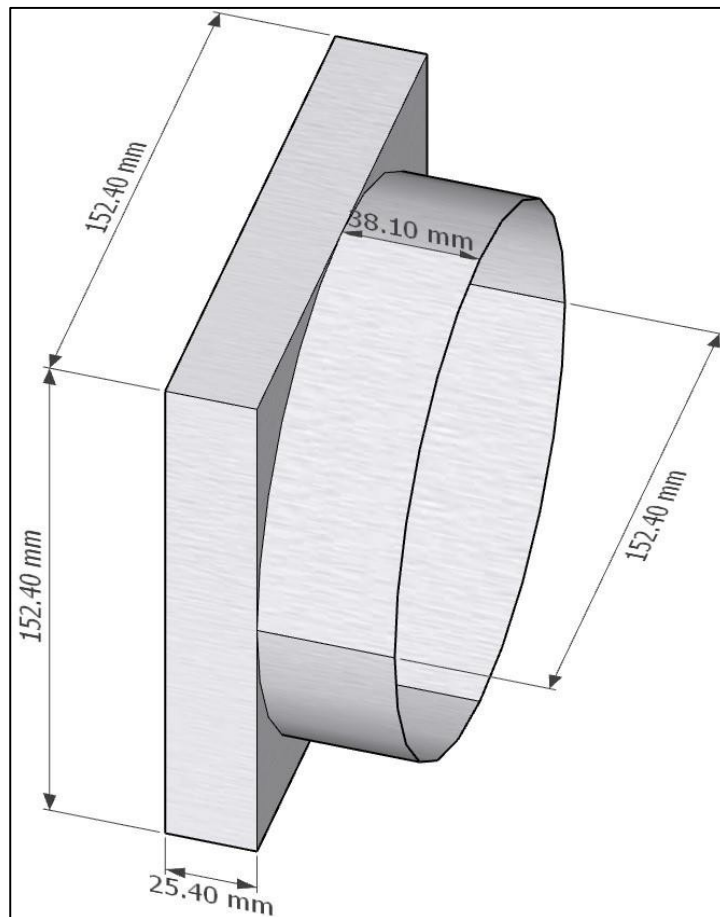
Nota. Gráfica ejemplo de cámara de calentamiento. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.1.3. Tapa transición

Para conectar la cámara de calentamiento con el resto de los ductos que serán circulares se empleó esta transición con las siguientes medidas.

Figura 11.

Tapa transición 6 pulgadas



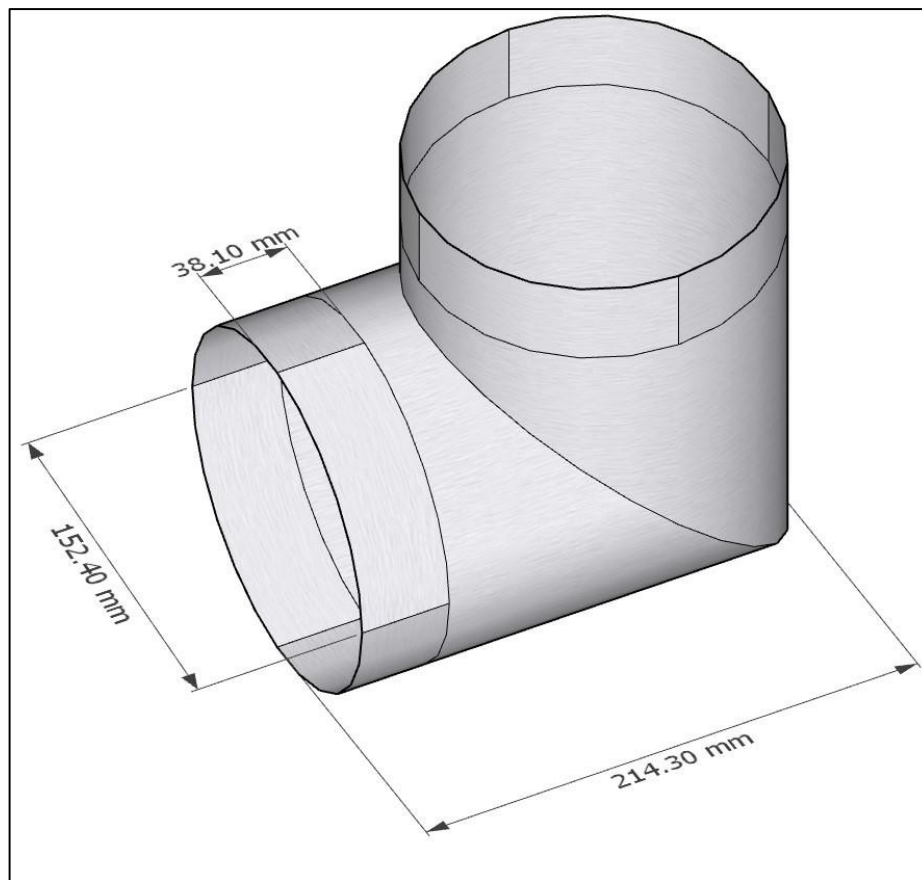
Nota. Gráfica ejemplo de tapa de transición de 6 pulgadas. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.1.4. Codo circular a 90°

Para darle la dirección deseada al aire en esta configuración vertical y a la vez mantener la secadora compacta se optó por un codo con las siguientes medidas.

Figura 12.

Codo circular



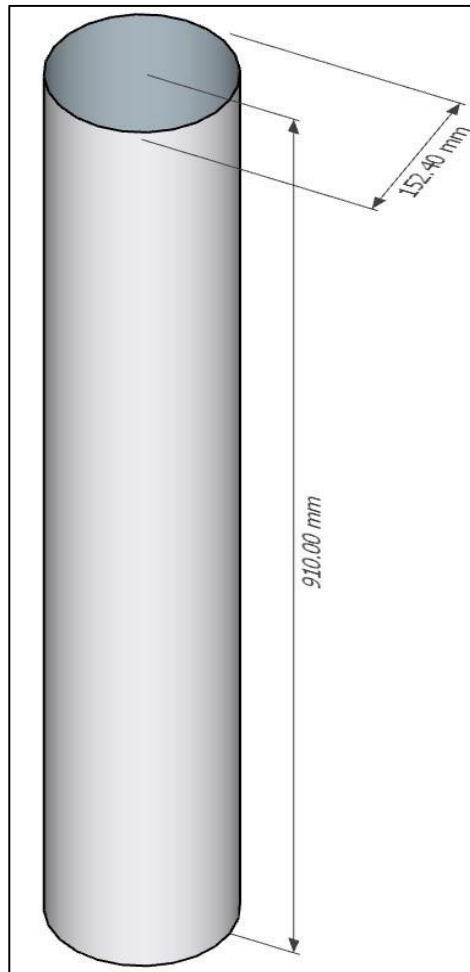
Nota. Gráfica ejemplo de codo circular. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.1.5. Cámara de secado vertical

Para la cámara que contendrá el cardamomo cereza durante el proceso de secado se optó por un ducto vertical con las siguientes medidas.

Figura 13.

Cámara de secado vertical



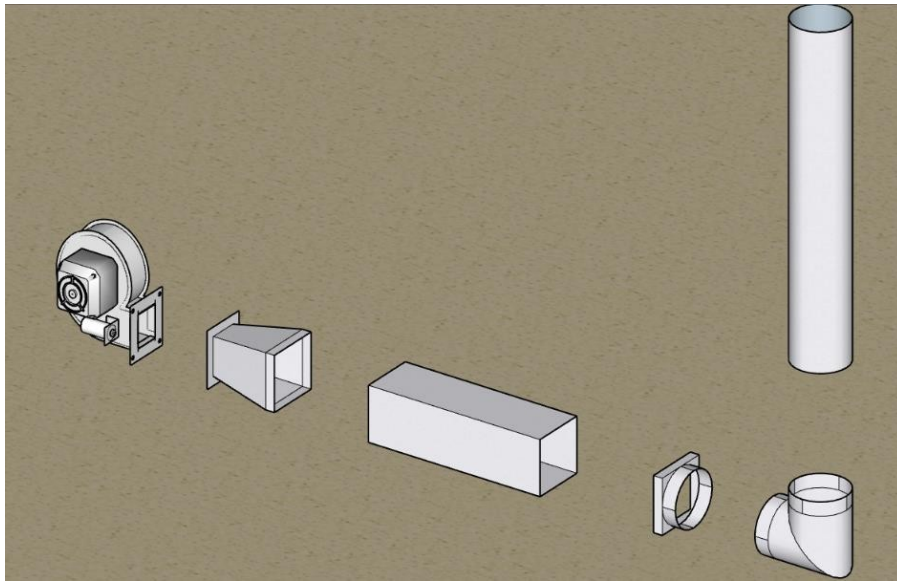
Nota. Gráfica ejemplo de cámara de secado vertical. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.1.6. Conjunto

Todas las piezas de la configuración en vertical en orden de ensamblaje se observan de la siguiente manera.

Figura 14.

Disposición elementos secadora vertical



Nota. Gráfica ejemplo de disposición de elementos secadora vertical. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2. Configuración horizontal

La configuración horizontal de la secadora comparte los componentes que brindan el suministro de aire y está diseñado para hacer pasar el mismo por los granos de cardamomo de manera horizontal, aprovechando de esta manera una mayor área superficial de contacto directo con un caudal de aire mayor, manteniendo el mismo volumen de granos.

3.2.1. Tramo de aire caliente

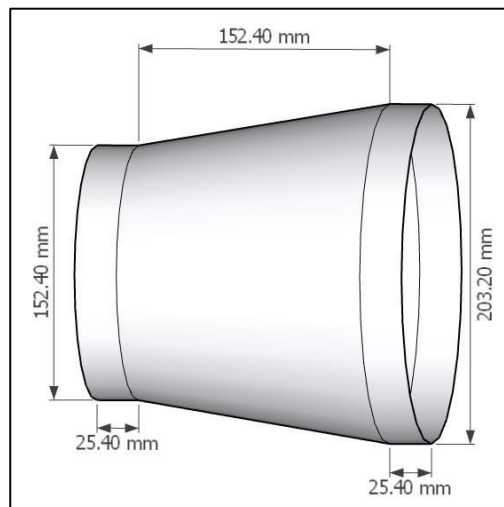
Para mantener compacta la secadora se utilizarán los mismos componentes desde la brida acople con el ventilador hasta la tapa transición cuadrada a circular; básicamente el tramo donde se introduce y calienta el aire; de esta manera también se ahorra en fabricación de piezas.

3.2.2. Transición de cámara de calentamiento a cámara de secado horizontal

Para acoplar el tramo de calentamiento de aire hacia la cámara de secado horizontal se empleó una transición cónica con traslapes con las siguientes medidas.

Figura 15.

Cono transición de 6 a 8 pulgadas con pestañas



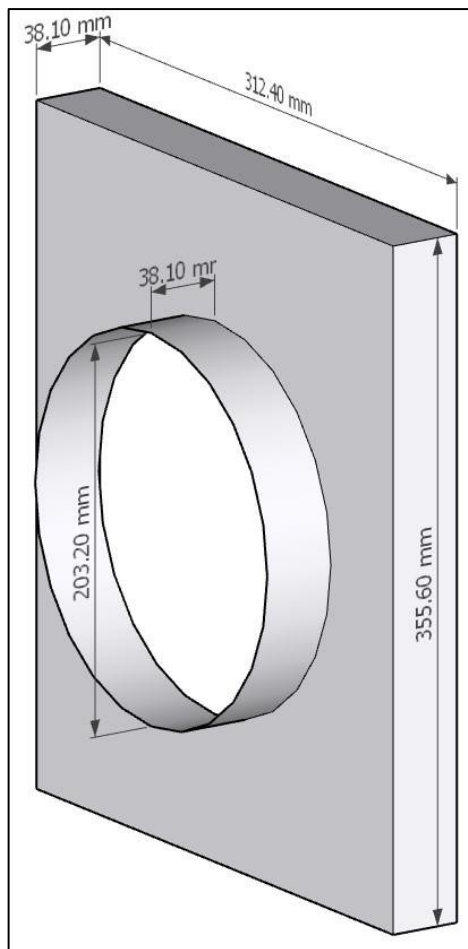
Nota. Gráfica ejemplo de transición de 6 a 8 pulgadas con pestañas. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2.3. Tapa transición

Para finalizar la transición hacia la cámara de secado horizontal se empleó una tapa cuadrada con un orificio circular con pestañas de traslape con las siguientes medidas.

Figura 16.

Transición de cono a cámara de secado



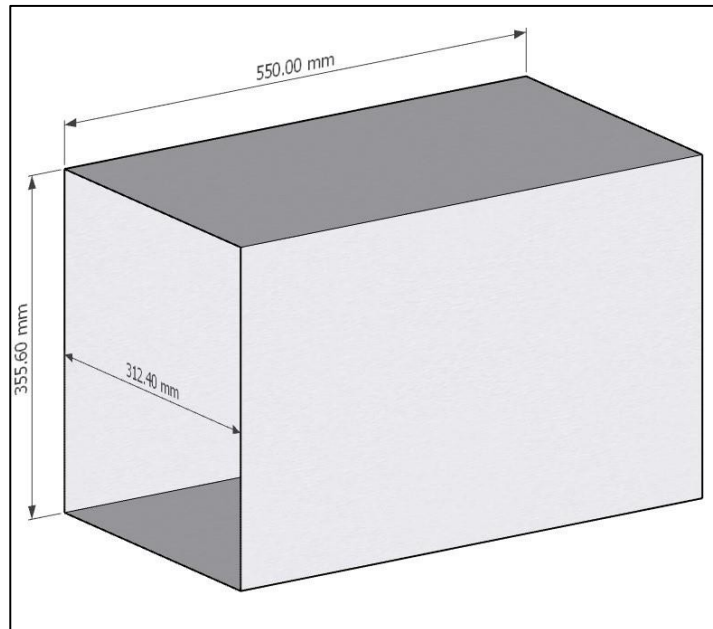
Nota. Gráfica ejemplo de transmission de cono a cámara de secado. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2.4. Cámara de secado horizontal

El espacio contenedor del cardamomo para el proceso de secado capaz de albergar la capacidad preestablecida fue diseñado con las siguientes medidas.

Figura 17.

Cámara de secado horizontal



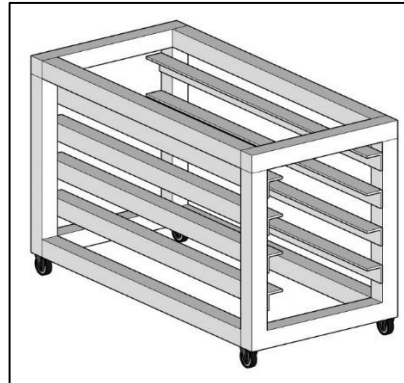
Nota. Gráfica ejemplo de cámara de secado horizontal. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2.5. Porta charolas

Para colocar las charolas que portan el cardamomo se optó por un bastidor capaz de sostener estas en la posición deseada que dio como resultado la siguiente disposición.

Figura 18.

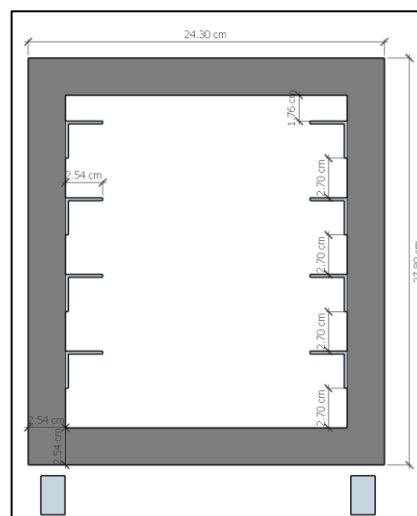
Bastidor porta charolas



Nota. Gráfica ejemplo de un bastidor porta charolas. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

Figura 19.

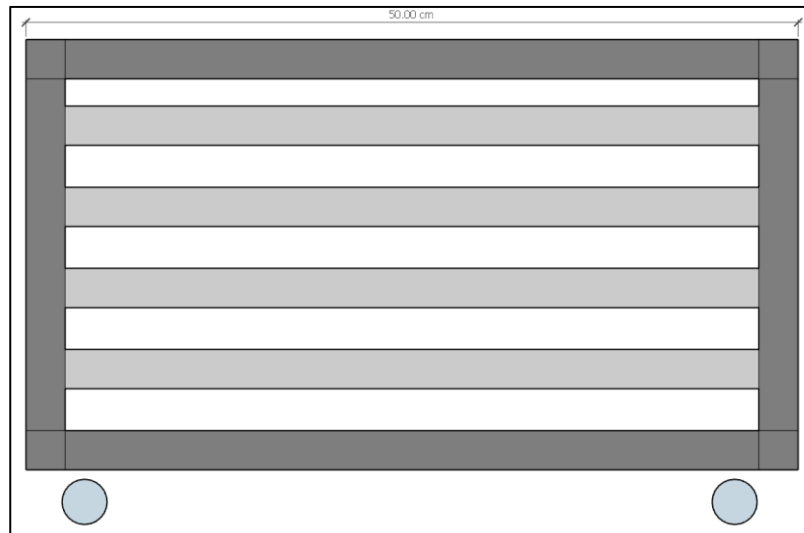
Porta charolas elevación



Nota. Gráfica ejemplo de un bastidor porta charolas elevación. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

Figura 20.

Porta charolas perfil



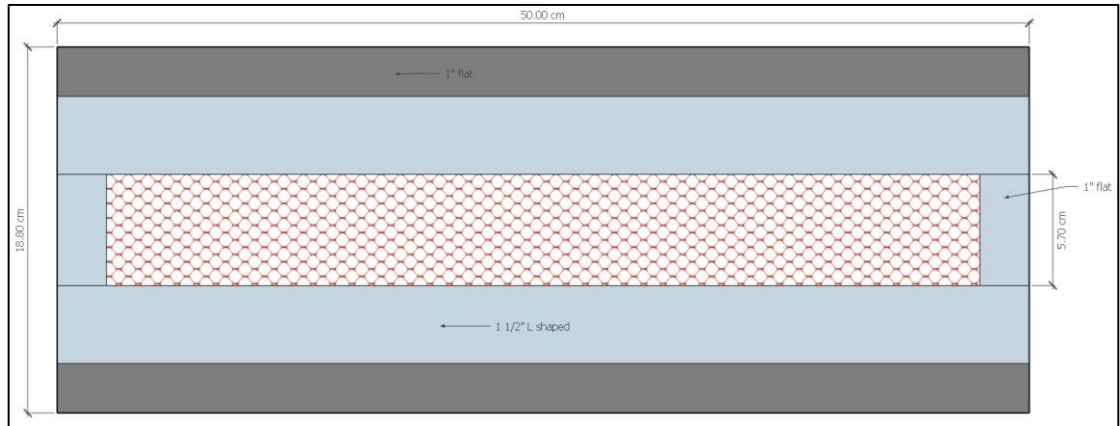
Nota. Gráfica ejemplo del perfil de un bastidor porta charolas. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2.6. Charolas de cardamomo

El previo dimensionamiento y capacidad volumétrica resultaron en unos contenedores tipo charola con las siguientes dimensiones.

Figura 21.

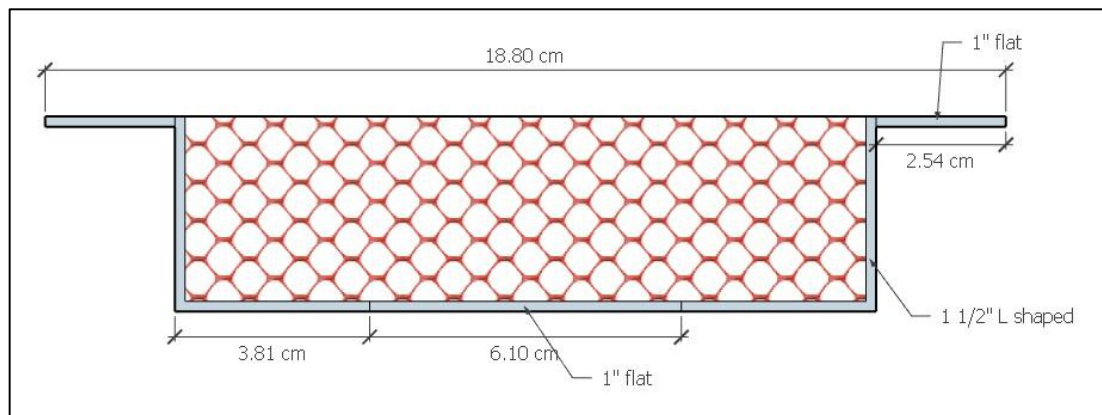
Charola porta cardamomo planta



Nota. Gráfica ejemplo de charola porta cardamomo. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

Figura 22.

Charola porta cardamomo perfil



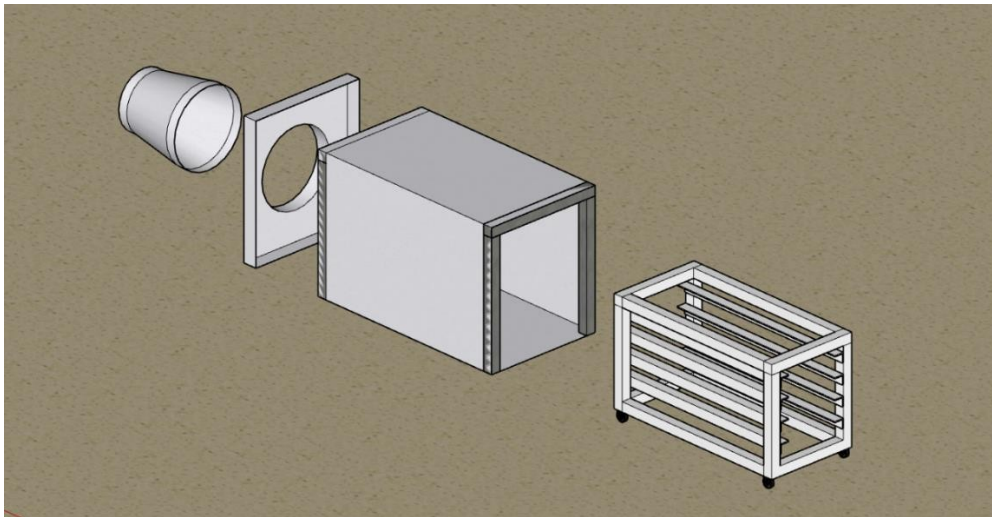
Nota. Gráfica ejemplo de perfil de charola porta cardamomo. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

3.2.7. Conjunto

La configuración horizontal comparte con la configuración vertical los elementos desde el ventilador hasta la tapa transición para tener el mismo circuito de aire caliente, debido a esto la primera transición tiene un lado de diámetro de 6 pulgadas para que la configuración sea compatible e intercambiable. El resto de elementos en orden de ensamblaje se observan de la siguiente manera:

Figura 23.

Configuración horizontal



Nota. Gráfica ejemplo de configuración horizontal. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

4. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE

4.1. Piezas prefabricadas

Para contar con una eficiencia más elevada y un ambiente de laboratorio más controlado; varias partes que conforman la secadora fueron prefabricadas y adquiridas de distribuidores que operan en el territorio nacional e internacional.

4.1.1. Ventilador centrífugo

Mediante el previo cálculo de la potencia necesaria que deberá cubrir el motor del ventilador y evaluando las opciones de los distribuidores nacionales, nos dirigimos al catálogo de ventiladores centrífugos de álabes radiales de la marca Soler&Palau distribuido por la empresa MOEGSA en Guatemala.

Figura 24.

Ventiladores centrífugos

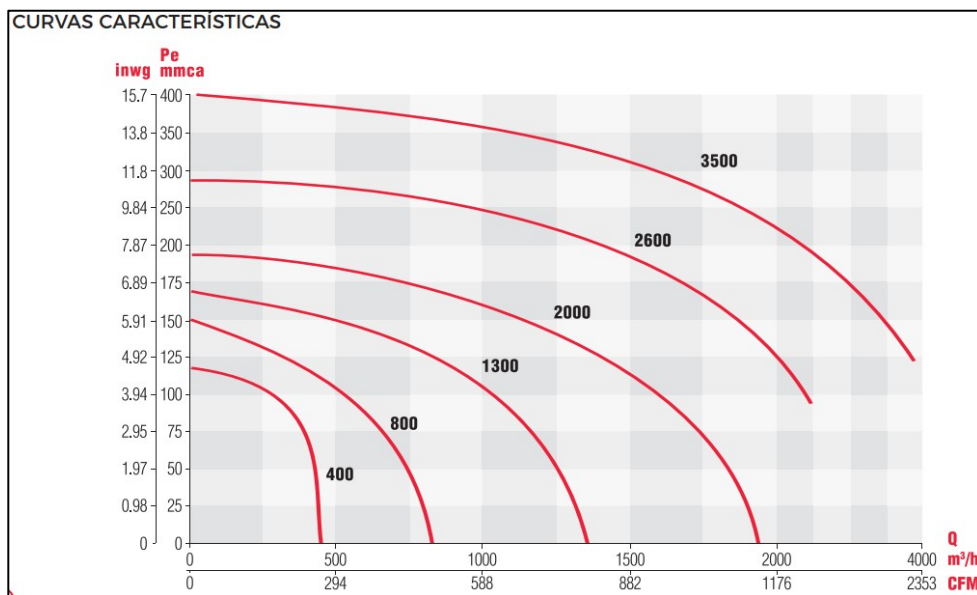
Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m³/hr / CFM	Potencia sonora dB(A)*	Peso aprox. kg
CSB-400	3515	1/2	127 / 220	9.1 / 3.7	400 / 235	73	17
CST-400	3410	1/2	220 / 440	1.9 / 0.9	400 / 235	73	17
CSB-800	3500	3/4	127 / 220	11.5 / 5.0	800 / 471	75	21
CST-800	3470	3/4	220 / 440	2.5 / 1.25	800 / 471	75	21
CSB-1300	3510	1	127 / 220	10.9 / 5.40	1300 / 765	82	24
CST-1300	3460	1	220 / 440	3.0 / 1.5	1300 / 765	82	24
CST-2000	3495	1 1/2	208 -230 / 460	4.0 / 2.0	2,000 / 1,176	84	37
CST-2600	3480	3	208 -230 / 460	7.4 / 3.7	2,600 / 1,529	86	41
CST-3500	3480	5	208 -230 / 460	11.8 / 5.9	3,500 / 2,059	90	66

Nota. Table ejemplo de ventiladores centrífugos. (Ver anexo 3). Obtenido de Soler&Palau (2021).
Catálogo general CSB-T. Ventilation Group. (p. 119.) MOEGSA.

Al inspeccionar las potencias vemos el modelo CST-800 de potencia $\frac{3}{4}$ HP y verificamos si soporta la caída de presión por la máxima cantidad de cardamomo con el máximo caudal de aire con ayuda de su curva característica.

Figura 25.

Curva característica de ventiladores centrífugos



Nota. Gráfica ejemplo de curvas características. (Ver anexo 3). Obtenido de Soler&Palau (2021). *Catálogo general CSB-T. Ventilation Group.* (p. 120.) MOEGSA.

En la tabla 3 se observa que para un caudal de aire nominal de 75 CFM con la carga máxima de cardamomo se obtiene una caída de presión estática de aproximadamente 2.75 pulgadas de agua. La curva característica del ventilador CST-800 supera con creces esta pérdida por lo cual es ideal para conformar la secadora.

Figura 26.

Ventilador centrífugo CST-800 Soler&Palau



Nota. Fotografía de un ventilador centrífugo CST-800 de la empresa Soler&Palau, tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

El motor del ventilador viene con un breaker de seguridad para protegerlo de picos de corriente, falsos contactos o una mala conexión.

4.1.2. Variador de frecuencia

Para que la secadora sea capaz de variar el caudal de aire se instaló un variador de frecuencia a la alimentación del ventilador el cual es el principal mando de control de la secadora junto con la instrumentación de presión de gas.

El variador de frecuencia también supe la función de recibir alimentación monofásica, de más fácil acceso en interior del país (Donde se pretenden llevar a cabo las pruebas) y entregar una señal trifásica hacia el motor trifásico del ventilador.

Con una potencia nominal de 1HP y la capacidad de transformar señales monofásicas a trifásicas a un voltaje nominal de 240V se empleó un variador de frecuencia de la marca WEG con una corriente nominal de 4.3 A a 60Hz. El variador cuenta con arranque suave programado automático.

4.1.3. Quemador de propano

El quemador de propano QA-11 debe quedar fijado paralelo al eje central de la cámara de calentamiento apuntando en el sentido de la corriente de aire para lo cual se cuenta con sus elementos de instrumentación.

4.1.3.1. Instrumentación

Para acoplar el quemador de propano a la cámara de calentamiento y alimentarlo con presión de gas utilizamos la siguiente lista de elementos de instrumentación:

- Regulador de presión REGO 597-FA
- Punta POL con tuerca izquierda
- Manguera flexible 1.5 metros
- Llave de bola roscada de ½ pulgada
- 2 conectores macho de 3/8 de pulgada
- Reducción de ½ a ¼ de pulgada, hierro negro cedula 80
- Niple hierro negro cedula 80 de ½ * 2 pulgadas
- 2 niples corridos hierro negro cedula 80 de ½ pulgada
- Unión universal ½ pulgada
- Placa de acero inoxidable de 15*15 cm

Figura 27.

Quemador de gas LP e instrumentación



Nota. Fotografía de un quemador de gas LP y su instrumentación, tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

4.2. Ductos

Los segmentos rectos del circuito de aire de secado son un punto importante de la secadora no solo para cumplir su función principal de dirigir el aire en el sentido deseado, sino que son un punto de medición de la velocidad del aire ya que a través de los ductos es donde encontraremos menos turbulencia y espacio suficiente para introducir un tubo de Pitot para medir presión de velocidad y estática.

4.2.1. Configuración vertical

Para esta configuración el ducto principal actúa a la vez como cámara de secado con una separación mediante una rejilla para permitir el flujo de aire y a la vez contener la carga de cardamomo.

Figura 28.

Ducto vertical con rejilla



Nota. Fotografía de un ducto vertical con rejilla, tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

Este ducto se fija únicamente a presión de encaje hacia el codo de 90° y asegurado con 2 abrazaderas para ductos de tal manera que sea fácilmente montable y desmontable.

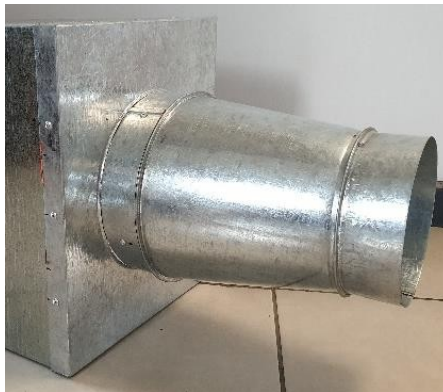
4.2.2. Configuración horizontal

Para canalizar el aire en la configuración horizontal hacia el área transversal de la elevación de las bandejas se utilizó una transición de 6 a 8

pulgadas de diámetro con una longitud axial de 6 pulgadas y traslapes de conexión de 1 pulgada en cada extremo descrita en el subíndice 3.2.2. Esta fue asegurada a la tapa de conexión en su traslape con remaches galvanizados (diámetro de 8 pulgadas) y con abrazaderas del lado de conexión a la cámara de calentamiento para permitir su montaje y desmontaje fácilmente.

Figura 29.

Ducto y cámara horizontal



Nota. Fotografía de un ducto y cámara horizontal, tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

4.3. Conexiones

Iniciando por la transición de la salida del ventilador a la cámara de calentamiento, esta cuenta con un flange al cual se le perforaron 6 agujeros para fijarse al ventilador con tornillos pasados con tuercas y arandelas.

Figura 30.

Conexión de transición

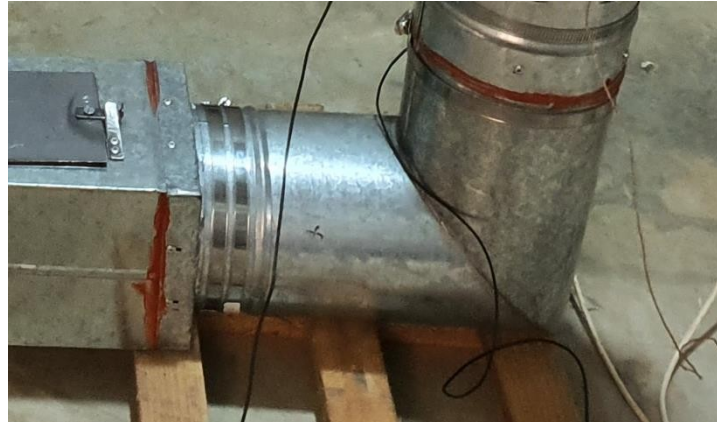


Nota. Fotografía de conexión de transición de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

Esta transición cuenta con una cejilla de traslape la cual se fija con el interior de la cámara de calentamiento mediante remaches galvanizados y sellada con silicón de alta temperatura. Esta misma técnica de combinar remaches galvanizados con silicón de alta temperatura fue utilizada en el resto de las conexiones no desmontables para obtener un sello hermético y evitar fugas de presión de aire.

Figura 31.

Conexiones herméticas

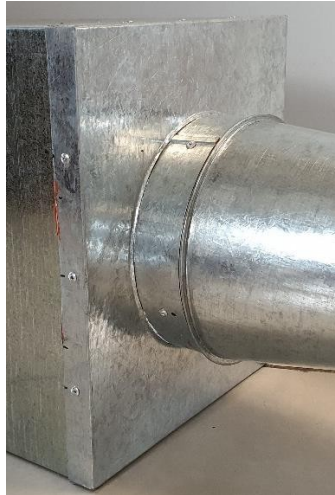


Nota. Fotografía de conexiones herméticas de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

En la figura 27 se observa la conexión entre la salida de la cámara de calentamiento y su acople; al igual que la conexión entre el codo de 90° y la cámara de secado vertical.

Figura 32.

Conexión configuración horizontal



Fuente: San Gaspar, zona 16, Ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

Por último, la figura 28 ilustra la conexión entre el cono, acople y cámara horizontales con los mismos recursos.

El resto de las uniones desmontables se logran mediante cejillas en los traslapes y abrazaderas de ducto galvanizadas.

4.4. Cuantificación de materiales

Obtener un detalle de la cantidad de materiales necesarios es extremadamente útil para la construcción y ensamble de la maquina completa, así como el presupuesto, y la logística de obtención de los materiales.

4.4.1. Materiales de herrería

En la siguiente tabla se hace la descripción de los materiales de herrería que se utilizan.

Tabla 5.

Cuantificación material de herrería

Porta Bandejas	Tubo cuadrado 1"			
	Perfil	Lados	Longitud (cm)	Total (m)
	Alto	4	27.82	1.11
	Ancho	4	19.05	0.76
	Largo	4	44.92	1.79
Angular 1"				
	Perfil	Lados	Longitud (cm)	Total (m)
	Largo	4	50	2
Bandejas (4)	Angular 1 1/2 "			
	Perfil	Lados	Longitud (cm)	Total (m)
	Largo	8	50	4
Hembra 1"				
	Perfil	Lados	Longitud (cm)	Total (m)
	Largo	8	50	4
	Ancho	12	6.35	0.76
Lámina expandida				
	Perfil	Lados	Área (cm)	
	Largo	8	6.35 * 21.19	
	Alto	8	13.97 * 3.81	

Nota. Descripción de la cuantificación de materiales de herrería. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

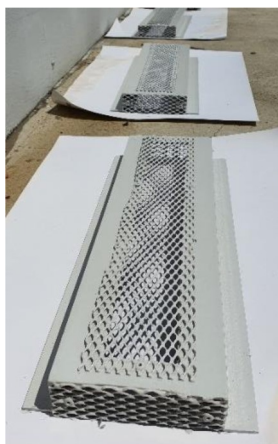
4.4.1.1. Porta bandejas y bandejas

El armado de estas piezas consistió en procesos de herrería de banco básicos como:

- Corte con pulidora y disco de corte
- Remoción de esquirlas con pulidora y disco de pulir
- Remoción de óxido y limpieza con cepillo de alambre y disco de pulir
- Puntos de soldadura con electrodo 6013
- Cordones de soldadura con electrodo 6013
- Barrenado con broca de 1/8" y 1/4"
- Recubrimiento con pintura anticorrosiva
- Atornillado de rodillos para facilidad de movilidad
- Remachado de lámina expandida

Figura 33.

Bandejas armadas



Nota. Fotografía de bandejas armadas, tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala.
Elaboración propia.

Figura 34.

Porta bandejas y bandejas terminadas y colocadas



Nota. Fotografía de porta bandejas y bandejas armadas y colocadas tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

Figura 35.

Porta bandejas en cámara de secado horizontal



Nota. Fotografía de porta bandejas en cámara de secado horizontal de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

4.4.2. Misceláneos

En el caso de la configuración horizontal, para efecto de la inspección del cardamomo durante el proceso de secado, basta con deslizar cualquiera de las bandejas hacia afuera para que el cardamomo quede expuesto ya que el extremo final de la cámara de secado horizontal está abierta a la atmosfera y se tiene libre acceso a las bandejas.

En el caso de la configuración vertical es más complicado ya que solo se tiene visualización de la capa superior de toda la carga de cardamomo que puede llegar a ser de hasta 60 centímetros. Debido a esto se diseñó e instaló un sistema de puertas dobles para poder inspeccionar y extraer a cualquier altura de la cama de cardamomo y a la vez mantener un sello considerable para que no tener fugas de presión de aire y por lo tanto de calor.

Figura 36.

Sistema de puertas dobles de inspección y extracción



Nota. Fotografía de un Sistema de puertas dobles de inspección y extracción de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

Las puertas internas están conformadas de malla de acero inoxidable para evitar la corrosión por humedad dentro de la cámara de secado y a la vez permitir la visibilidad; las puertas externas están conformadas por lámina de acero inoxidable que abarcan los orificios en la cámara de secado y un traslape para poder interponer un empaque de neopreno cuadrado fijado con silicón de alta temperatura. Las puertas exteriores que se encargan de la sujeción de todo el sistema de inspección están aseguradas con abrazaderas de ducto.

Figura 37.

Empaques de neopreno



Nota. Fotografía de empaques de neoprene tomada en San Gaspar zona 16, ciudad de Guatemala. Elaboración propia.

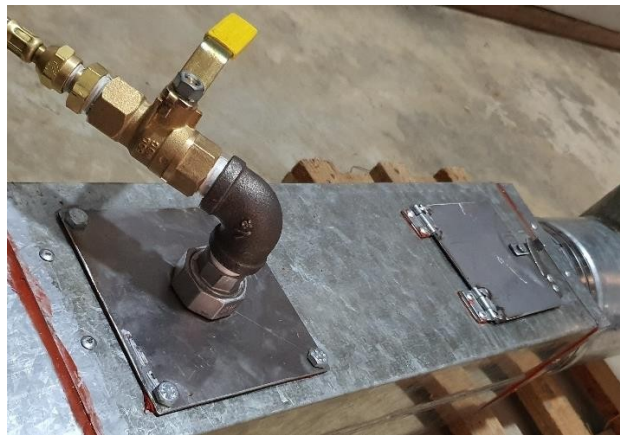
4.5. Acondicionamiento cámara de calentamiento

En la cámara de calentamiento se abrieron 2 agujeros cuadrados de 12 * 12 centímetros; uno para introducir el quemador de propano y el segundo para la ignición de la llama de este. Ambos cuentan con un empaque conformado meramente por una banda de silicón de alta temperatura en todo el borde del traslape. Para el orificio del quemador de propano se fijó la placa que sella la cámara con 4 tornillos con arandela y tuerca de 3/8". En el caso de la tapa del orificio de ignición esta se fijó por un lado con 2 bisagras sujetas por remaches galvanizados de 3/8" y por otro lado con un pasador a presión fijado a una cejilla

metálica previamente fijada a la cámara de calentamiento por remaches galvanizados de 3/8”.

Figura 38.

Acondicionamiento de cámara de calentamiento



Nota. Fotografía del acondicionamiento de cámara de calentamiento en la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

4.6. Ensamble final

Una vez se encontraron todos los elementos de la secadora en el lugar de la instalación se procedió a ensamblarla en el siguiente orden:

- Selección de área de montaje con accesibilidad a tomacorrientes e iluminación.
- Limpieza del área a ocupar con la secadora.

- Cableado de tomacorriente de 220V hacia breaker con cable calibre 10 monofásico.
- Cableado de breaker a variador de frecuencia con cable calibre 10 monofásico.
- Cableado de variador de frecuencia a motor del ventilador con cable calibre 10 trifásico.
- Ensamble de transición y cámara de calentamiento a salida del ventilador centrífugo mediante tornillos, tuercas y arandelas de $\frac{1}{4}$ ”.
- Ensamble de circuito de gas propano con tape de teflón y llave *stillson*.
- Conexión de regulador de presión Rego a cilindro de gas propano mediante rosca izquierda y llave inglesa ajustable.
- Sujeción de placa de quemador de propano a cámara de calentamiento mediante tornillos y tuercas de $\frac{3}{8}$ ”.
- Ensamble de cámara de secado vertical con codo de 90° a salida de cámara de calentamiento a presión y con abrazaderas de ducto.
- Colocación de tarimas de madera de nivelación bajo cámara de secado vertical.
- Configuración de variador de frecuencia, entrada de 220 V a 60 Hz monofásica a salida 220V trifásica con frecuencia variable entre 60 y 0 Hz.

- Colocación de rejilla sostén para cardamomo en cámara de secado vertical.
- Colocación de termocupla a la entrada de la cámara de calentamiento.
- Prueba por separado de ventilador y quemador de propano.
- Para cambiar a configuración horizontal únicamente se remueve la cámara vertical con su codo de 90° aflojando las abrazaderas y se procede a colocar la cámara horizontal de la siguiente manera:
 - Ensamble de cámara horizontal con transición de 6" a 8" con abrazaderas de ducto.
 - Colocación de tarimas de nivelación con base en el ventilador.
 - Colocación de termocupla a la entrada de la cámara de secado.
 - Introducción de porta bandejas con rodillos y bandejas a la cámara de secado.

Figura 39.

Secadora de cardamomo ensamblada (configuración vertical)



Nota. Fotografía de secadora de cardamom ensamblada (configuración vertical) de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

Figura 40.

Secadora de cardamomo ensamblada (configuración horizontal)



Nota. Fotografía de secadora de cardamom ensamblada (configuración horizontal) de la Asociación ADIRA ubicada en Chisec, Alta Verapaz. Elaboración propia.

4.6.1. Transportabilidad

Todas las piezas descritas a lo largo del documento abarcaron el espacio justo dentro de un automóvil sedan promedio junto con un maletín de herramientas para su instalación y los sensores a utilizar durante su funcionamiento como era requisito del proyecto.

5. SENSORES DE MEDICIÓN

5.1. Velocidad de aire, presión estática, presión de velocidad y absoluta

Para medir estos parámetros dentro de la secadora de cardamomo se utilizó un anemómetro digital con tubo de Pitot el cual únicamente requiere de un orificio para introducir el tubo. Este instrumento arroja lecturas en m/s para la velocidad de aire y Pascales para las distintas presiones. Para su correcto funcionamiento se conecta el tubo de Pitot en sus 2 entradas con tubos de hule para conducir la presión a las 2 entradas del lector digital. Este tubo debe ser colocado lo más centrado y paralelo posible al flujo de aire.

Figura 41.

Anemómetro con tubo de Pitot



Nota. Medidor preciso de flujo de aire. Obtenido de Trotec (s.f.). *Instrumentos de medición de trotec: modernos, precisos e ilimitados.* <https://es.trotec.com/productos-y-servicios/aparatos-de-medicion>), consultado el 25 junio del 2022. De dominio público.

5.2. Temperatura y humedad relativa

Para la medición de la temperatura se ocuparon 2 termómetros; el primero es una termocupla colocada al inicio de la cámara de secado para medir la temperatura del aire de entrada, este termómetro se encuentra fijo y funcionando durante todo el funcionamiento de la secadora. El segundo es un termómetro manual digital con el cual se toman lecturas esporádicas en tiempos clave del proceso de secado, el cual se utiliza para medir la temperatura del aire de salida de la cámara de secado.

Este mismo termómetro manual tiene la capacidad de medir humedades relativas en porcentajes y se tomó lecturas en la salida de la cámara de secado y en el ambiente para contemplar la diferencia de estas mientras el cardamomo va perdiendo humedad.

Figura 42.

Termómetro y medidor de humedad relativa



Nota. Ejemplo de un termómetro medidor de humedad. Obtenido de Kaise (s.f.). Medidores de humedad/temperature. (<https://kaiseinstrumentacion.com/categoria-producto/medidores-ambientales/medidores-de-humedad-temperatura/>), consultado el 25 de junio de 2022. De dominio público

5.3. Gasto energético

Para calcular el gasto de gas propano se cuenta con una báscula con el cual se mide la diferencia de peso al principio y al final de cualquier prueba de la secadora, la cual ya se encontraba en el lugar de la instalación de la secadora.

CONCLUSIONES

1. La implementación de una secadora de cardamomo a escala para pruebas de laboratorio para Asociación Ingenieros sin Fronteras USA Guatemala ONG se concluyó de manera exitosa.
2. Todos los requerimientos planteados por EWB USA Guatemala para el diseño de la secadora se cumplieron satisfactoriamente.
3. Con el fin de guiar y orientar a todas las personas involucradas en el proyecto, tanto fabricantes como personas encargadas fueron creados planos y esquemas ilustrativos de la secadora y sus componentes
4. Según los requerimientos de diseño, fueron dimensionadas las piezas prefabricadas que conforman la secadora y posteriormente fueron adquiridas según su disponibilidad en el territorio nacional.
5. Todas las piezas de la secadora fueron construidas y ensambladas con congruencia entre ellas para su correcto funcionamiento y posterior presentación y entrega final.

RECOMENDACIONES

1. Reconsiderar los requerimientos iniciales de la secadora, especialmente los rangos de valores de las variables experimentales.
2. Investigar otros tipos de introducción de energía térmica a la secadora como un intercambiador indirecto de energía utilizando el mismo quemador de propano o una resistencia eléctrica únicamente para el modelo a escala en específico.
3. Medir caída de presión estática real de cama de cardamomo y compararla con la regresión cuadrática teórica creada durante el proceso de cálculo y dimensionamiento, mediante una gráfica.
4. Replantear el método de inspección y extracción de cardamomo en la configuración vertical para prevenir fugas de presión en la cámara de secado.
5. Establecer parámetros de calidad para el cardamomo a utilizar en la secadora para evitar que esta variable externa afecte los resultados de los ensayos y darle así mejor consistencia y más fiabilidad a el diseño de la secadora.

REFERENCIAS

Asam, S. (2007) *Cardamom Processing*. Practical Action.

Grézaud, A. (2022) *El Cardamomo, el oro verde de Guatemala*. Olfactive STUDIO
<https://www.olfactivestudio.com/es/blogs/news/cardamom-guatemala-s-green-gold>

Asociación Ingenieros Sin Fronteras / USA Guatemala ONG. (2021). *Tecnología para el Desarrollo*. AISF. <https://www.isf.es/>

Summer, P. y Williams, E. (2009). *Grain and Soybean Drying on Georgia Farms*. The University of Georgia Cooperative Extension.

Wellmann, W. (2015). *Estudio para mejorar el diseño de secadoras para cardamomo*. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0835_M.pdf

APÉNDICE

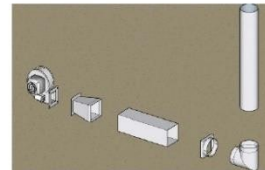
Apéndice 1.

Plan de ensayos

Orthogonal Array

Vertical Airflow

Vertical	Taguchi, P3, L3			
Run	Grain depth (cm)	Temperature (°C)	Airflow (CFM)	X
1	60	40	10	X1
2	60	60	20	X2
3	60	80	30	X3
4	30	40	20	X4
5	30	60	30	X5
6	30	80	10	X6
7	15	40	30	X7
8	15	60	10	X8
9	15	80	20	X9

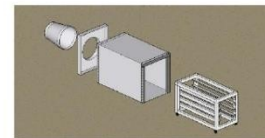


Total Cardamom Weight: 105 Lb

Alternative Array

Horizontal Airflow

Horizontal	Taguchi, P3, L3			
Run	Grain depth (in)	Temperature (°C)	Airflow (CFM)	X
1	1 ½	40	10	X1
2	1 ½	60	20	X2
3	1 ½	80	30	X3
4	1	40	20	X4
5	1	60	30	X5
6	1	80	10	X6
7	½	40	30	X7
8	½	60	10	X8
9	½	80	20	X9



Nota. Descripción del plan de ensayo. Elaboración propia, realizado con SketchUp.

ANEXOS

Anexo 1.

Requerimientos de secadora



ASOCIACIÓN INGENIEROS SIN FRONTERAS /
USA GUATEMALA ONG

DRAFT June 29, 2021

Introduction

This document lays out the design requirements for a benchtop cardamom dryer that will be used to determine the behavior of cardamom during drying and how this behavior changes as key process variables are changed.

Results to be Evaluated

The goal of the experiments will be to determine the effect of different variables on the following drying results:

- Dry cardamom quality as measured by color
- The uniformity of dryness of the dry cardamom
- The speed of the drying process
- The energy consumption of the drying process

Experimental Variables

The dryer should be able to produce and maintain conditions within the listed ranges for the following key variables.

- Airflow between 0.5 to 3 cfm/lb of green cardamom
- Air temperature between 40-80C
- Cardamom bed depth of 15-60cm
- Horizontal (cross) and vertical (through) airflow through the cardamom.

Measurement Parameters

The dryer should have the ability to measure and log the following parameters:

- Air velocity
- Static air pressure - entering and leaving cardamom
- Air temperature - entering and leaving cardamom
- Humidity - entering and leaving cardamom
- Volume of cardamom in the drying chamber
- Mass of cardamom in the drying chamber
- Energy consumption

General Requirements

- The dryer should have a maximum capacity of 20 pounds of green cardamom
- The dryer should be transportable
- The dryer should be manufactured with materials, components and techniques available in Guatemala

Nota. Presentación de los requerimientos para una secadora de cardamom. Obtenido de Asociación Ingenieros Sin Fronteras / USA Guatemala ONG. (2021). *Tecnología para el Desarrollo.* (<https://www.isf.es/>), consultado el 19 de julio de 2022. De dominio público.

Anexo 2.

Catálogo de quemadores de propano

QUEMADORES

Burners

► Quemadores industriales para gas L.P.

Quemadores tipo soplete Straight flame burners



Diseñados con la técnica más moderna de mezcla atmosférica de gas y aire. Totalmente de hierro vaciado.

Con esprea intercambiable de latón desarmable para fácil limpieza. Para usarse en calentadores de agua, estufas, calderas, peroles, cazos. Operan en cualquier posición y a cualquier presión de gas LP o natural.

Diseñados para que su flama sea larga y puede trabajar en posición horizontal o vertical. Especiales para hornos de cerámica, crisoles, túneles de secado, ladrilleras, panaderías, cerámica, etc.



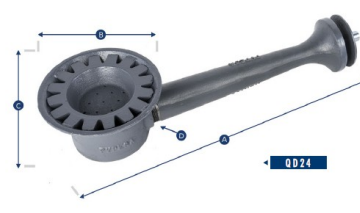
NO PARTE/PART	Modelo	Esprea / Orifice		Dimensiones en mm / Dimensions in mm				
		LP	Natural	A	B	C	D (NPT)	E (NPT)
002E700	QA-11	70	60	180	37	54	12.7	1/4"
002E701	QA-12	64	42	220	57	74	25.4	1/2"
002E702	QA-13	50	30	240	86	73	31.7	1/2"
002E703	QA-14	43	25	380	95	88	38.1	1/2"
002E704	QA-15	33	20	480	130	105	50.8	1/2"
002E705	QA-16	26	15	590	122	112	76.2	1/2"
002E706	QA-17	7/16"	1/16"	770	155	150	101.6	1"
002E707	QA-18	2 1/4"	-	1270	285	275	203.2	1 1/4"

► Quemadores flama desplegada

Spreaded head burners

Utilizados para calentar recipientes de todo tipo, y diseñados para aplicaciones donde la flama debe ser vertical y de gran área, como peroles, cazos, calentadores de agua, estufas comerciales, etc.





Capacidades aproximadas en miles de BTU por hora

Modelo	Esprea Orifice	Diferentes presiones de trabajo / Working Pressure (BTU per hour)					
		11" W.C.	1 lb	2 lb	5 lb	10 lb	20 lb
QD-21	62	10.5	15.9	23.0	36.3	51.2	71.6
QD-22	37	47.0	150.9	212.3	337.6	478.3	700.9
QD-24	26	140.0	296.7	416.9	657.4	931.1	1,317.4
QA-11	70	4.9	9.5	13.3	21.2	29.9	43.5
QA-12	64	8.0	14.5	20.5	32.5	46.0	63.9
QA-13	50	36.0	56.3	79.3	125.3	176.5	250.7
QA-14	43	44.0	104.9	145.8	230.2	324.9	460.4
QA-15	33	81.0	173.9	248.1	393.9	555.1	782.7
QA-16	26	140.0	296.7	416.9	657.4	931.1	1,317.4
QA-17	7/16"	-	590.0	833.9	1,319.9	1,869.3	2,634.7

Las espreas son para usarse con gas L.P.
Se pueden surtir quemadores con esprea ciega o para gas natural.

Nota. Quemadores industriales para gas L.P. Obtenido de PYPESA (2021). *Catálogo de productos.* (pp. 29-30.) PYPESA.

Anexo 3.

Especificaciones de ventiladores centrífugos



CARACTERÍSTICAS

- Carcasa en acero electrosoldada.
- Rotor de álabes rectos radiales fabricado en fundición de aluminio.
- Acabado de pintura en polvo poliéster electrostática, con protección anticorrosiva.
- Motor acoplado directamente a la turbina.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m³/hr / CFM	Potencia sonora dB(A)*	Peso aprox. kg
CSB-400	3515	1/2	127 / 220	9.1 / 3.7	400 / 235	73	17
CST-400	3410	1/2	220 / 440	1.9 / 0.9	400 / 235	73	17
CSB-800	3500	3/4	127 / 220	11.5 / 5.0	800 / 471	75	21
CST-800	3470	3/4	220 / 440	2.5 / 1.25	800 / 471	75	21
CSB-1300	3510	1	127 / 220	10.9 / 5.40	1300 / 765	82	24
CST-1300	3460	1	220 / 440	3.0 / 1.5	1300 / 765	82	24
CST-2000	3495	1 1/2	208 -230 / 460	4.0 / 2.0	2,000 / 1,176	84	37
CST-2600	3480	3	208 -230 / 460	7.4 / 3.7	2,600 / 1,529	86	41
CST-3500	3480	5	208 -230 / 460	11.8 / 5.9	3,500 / 2,059	90	66

*Los valores de velocidad, potencia, voltaje e intensidad son nominales

*Nivel sonoro medido de acuerdo con las normas AMCA 300 / 05 y 301 / 05

*Advertencia: Este equipo no debe trabajar a descarga libre. Fabricación con distinta rotación y descarga, bajo demanda programada. Posiciones de rotación 0°, 90° y 180°

CSB-T Centrifugos de álabes radiales

CSB-T 400, 800, 1300, 2000, 2600 y 3500

La serie CS de extractores centrífugos cubre un amplio rango de caudal manejando presiones medias. Su construcción robusta y compacta permite su adaptación a cualquier tipo de instalación.

APLICACIONES

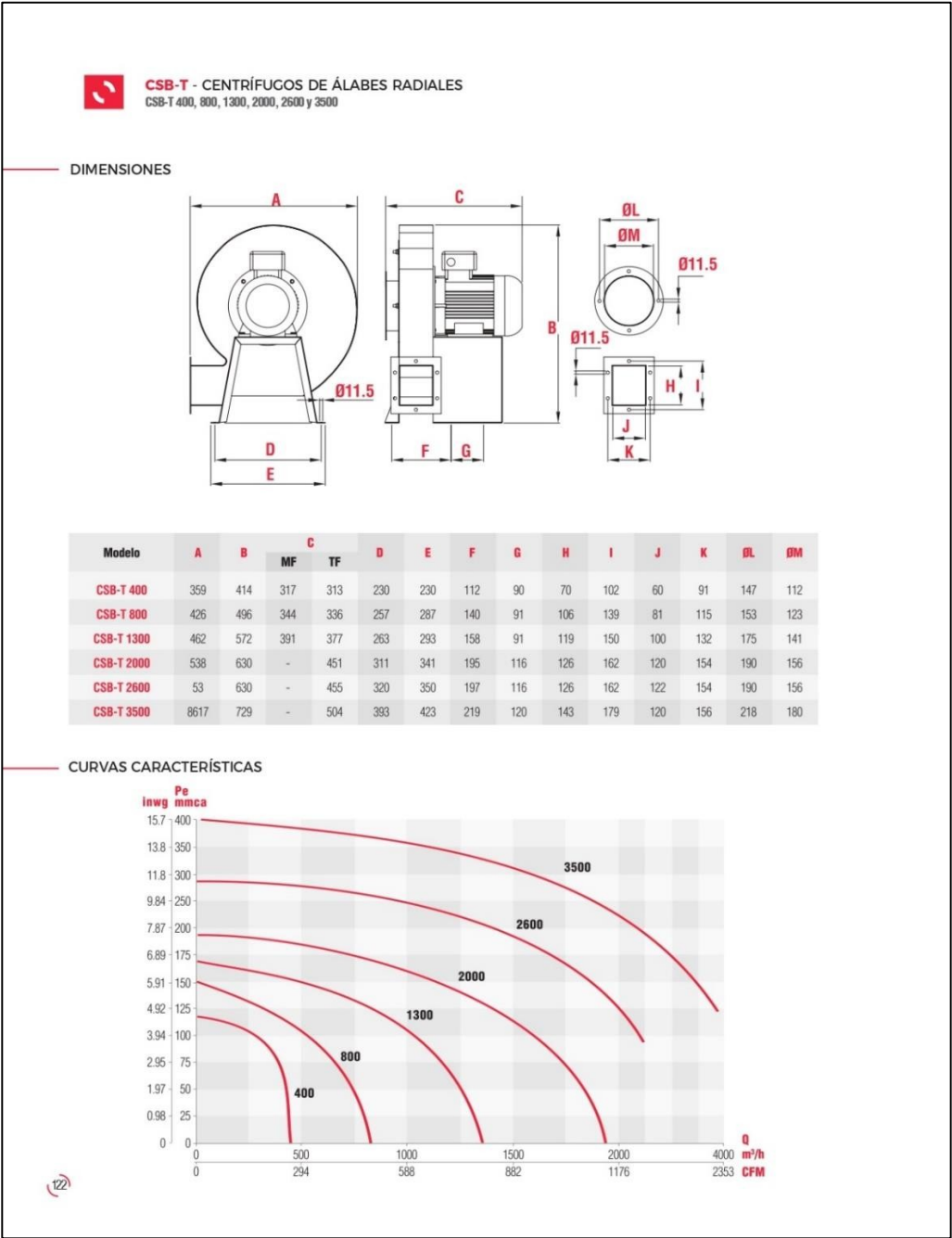


ACCESORIOS

Consultar pág. 145



Continuación anexo 3.



Nota. Ejemplo de centrífugos de álabes radiales. Obtenido de Soler&Palau (2021). *Catálogo general CSB-T. Ventilation Group.* (pp. 121-122.) MOEGSA.