

Prototipo de un sistema de secado artificial de cacao con recámara móvil para la materia prima

Sergio David Cruz Monar, Camilo Andrés Rodríguez Álvarez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

PhD. Ciencia computacional y matemática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a mi madre María De Jesús Álvarez Oliveros y a mi padre Jaime Rodríguez Murgas, las dos personas que más estuvieron y están presentes en mi crecimiento como ingeniero mecánico y como persona. Sin ellos este proyecto no habría sido posible y con orgullo puedo decir, que junto a mi compañero se realizó el proyecto en honor a ellos. ¡Gracias, papás!

Camilo Andrés Rodríguez Álvarez

De la misma manera, yo, Sergio David Cruz Monar. Dedico esta tesis a Emilce Monar, Calixto Cruz, Carolly Saavedra y Carolina Téllez. Quienes estuvieron apoyándome en el proceso y desarrollo de mi carrera profesional, y en el éxito de mi título de ingeniero. Mis más sinceros agradecimientos por su incondicionalidad.

Sergio David Cruz Monar

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerles nuevamente a mis padres, a mi sobrino Samuel Rodríguez, a mis hermanos Linda Rodríguez, Andrés Rodríguez y a mi pareja Rachel Gómez por su apoyo económico y emocional a lo largo de la carrera; a mi amigo Sebastián Fontalvo, a mis mascotas (Luna y Apolo) y en general a mis familiares que siempre estuvieron acompañándome en todo el proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos su conocimiento, herramientas informáticas, talento humano, etcétera. Y, por último, a nuestro director Julián Ernesto Jaramillo, quien nos brindó tiempo y sabiduría para la correcta realización del proyecto.

Camilo Andrés Rodríguez Álvarez

Sergio David Cruz Monar

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. Marco teórico	14
3.1 Procesamiento del cacao	14
3.1.1 Cosecha del fruto	14
3.1.2 Extracción de la almendra.....	15
3.1.3 Fermentación.....	15
3.1.4 Secado	15
3.2 Métodos de secado	15
3.2.1 Secado natural	15
3.2.2 Secado artificial	16
3.2.2.1 Secadores de bandeja	16
3.2.2.2 Secadores rotativos	17
3.2.2.3 Secadores de lecho	18
3.3 Soluciones propuestas y en el mercado	19
3.3.1 Tambor de Secado Mixto UPB.....	20
3.3.2 Secador solar de cacao, maíz y frijol UNAL.....	21
3.3.3 Secadora con intercambiador de calor marca SIRCA.....	22
3.3.4 Secadora de granos VULCANO TEC	22

4. Metodología	24
4.1 Diseño sistema de secado artificial de cacao	24
4.1.1 Alternativas a funciones.....	24
4.1.1.1 Estructura	24
4.1.1.2 Calentamiento del aire	25
4.1.1.3 Control de variables	25
4.1.1.4 Homogenización del secado	26
4.1.2 Requerimientos y requisitos.....	26
4.1.3 Criterios de diseño	27
4.1.4 Matriz QFD	28
4.1.5 Cálculos del diseño térmico.....	30
4.1.5.1 Caídas de presión	38
4.1.5.2 Selección del ventilador.....	44
4.1.5.3 Cálculo del tiempo por medio de la transferencia de masa	47
4.1.5.4 Selección de resistencia eléctrica.....	52
4.2 construcción de prototipo de sistema de secado artificial de cacao a escala de laboratorio...	57
4.3 Estudio de viabilidad del sistema.....	68
5. Conclusiones	74
6. Recomendaciones	75
Referencias Bibliográficas	76
Anexos	79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Criterios de diseño	27
Tabla 2. Quality Function Deployment-QFD	28
Tabla 3. Condiciones ambientales	30
Tabla 4. Propiedades del grano de cacao fermentado.....	30
Tabla 5. Datos de entrada.....	31
Tabla 6. Propiedades del aire a 70°C	32
Tabla 7. Resultados de calor total necesario	34
Tabla 8. Resultados iteración	37
Tabla 9. Valores para ecuación (13)	38
Tabla 10. Cálculos con montaje de ventilador seleccionado	47
Tabla 11. Características técnicas de resistencia eléctrica Haceb.....	53
Tabla 12. Parámetros para coeficiente convectivo en la resistencia.....	55
Tabla 13. Parámetros para calor de radiación	57
Tabla 14. Resultados sistema 3x3	57
Tabla 15. Presupuesto de proyecto y costo de prototipo	58
Tabla 16. Valores necesarios para estudio de viabilidad	68
Tabla 17. Consumo de energía eléctrica	69
Tabla 18. Cálculos del saldo a 8 meses.....	71
Tabla 19. Saldo a 8 meses para secado natural	73

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Secado natural de cacao.....	16
Figura 2. Secadores tipo bandeja	17
Figura 3. Secadores rotativos.....	18
Figura 4. Secadores de lecho fluidizado	18
Figura 5. Tipos de secado para granos de cacao.....	19
Figura 6. Prototipo del Tambor de Secado Mixto.....	21
Figura 7. Secadora SIRCA.....	22
Figura 8. Secadora de granos VULCANO TEC.....	23
Figura 9. Diseño de prototipo estructural	29
Figura 10. Diagrama de flujo procedimiento iterativo.....	37
Figura 11. Puntos de interés en el flujo de aire.....	40
Figura 12. Diámetros de tuberías de acero.....	42
Figura 13. Ventilador SODECA SDBP/F-100-4T-0.25	45
Figura 14. Especificaciones ventilador	45
Figura 15. Dimensiones ventilador	46
Figura 16. Curvas de operación	46
Figura 17. Resistencia eléctrica	53
Figura 18. Conexiones Arduino.....	60
Figura 19. Temperatura y humedad del aire respecto al tiempo.....	61
Figura 20. Temperatura del aire respecto al tiempo	62
Figura 21. Temperatura del aire después del OFF.....	64

Glosario

Convección forzada: Es un proceso de transferencia de calor en el que se utiliza una fuerza externa para inducir el movimiento de un fluido (líquido o gas) y acelerar la transferencia de calor. Esta fuerza externa puede ser proporcionada por un ventilador, una bomba u otro dispositivo mecánico.

Convección natural: La convección natural, también conocida como convección libre, es un proceso de transferencia de calor que ocurre en un fluido (líquido o gas) debido a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperatura. Cuando una parte de un fluido se calienta, se expande y se vuelve menos densa que el fluido más frío circundante, lo que hace que esta parte caliente del fluido tienda a subir. A medida que asciende, se enfría y se vuelve más denso, lo que causa que el fluido más frío circundante se desplace para ocupar su lugar, creando así un movimiento de convección natural.

Lecho compacto: Un lecho compacto se refiere a una capa de partículas sólidas que están estrechamente empaquetadas o comprimidas.

Radiación térmica: es la transferencia de calor a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas, como la luz infrarroja.

Secado convectivo: es un proceso de secado por medio de un gas caliente para eliminar la humedad de un material, como alimentos, productos químicos o productos agrícolas.

Transferencia de calor: La transferencia de calor es el proceso por el cual la energía térmica se transfiere de un cuerpo a otro, o dentro de él, por una diferencia de temperatura.

Transferencia de masa: La transferencia de masa es el proceso por el cual un componente o sustancia se mueve de un lugar a otro, ya sea a través de un medio sólido, líquido o gaseoso. Este proceso puede ocurrir por difusión, convección o una combinación de ambos.

Resumen

Título: Prototipo de un sistema de secado artificial de cacao con recámara móvil para la materia prima*

Autor: Sergio David Cruz Monar, Camilo Andrés Rodríguez Álvarez**

Palabras Clave: Secado de granos de cacao, Convección, Lecho compacto, Transferencia de calor y masa.

Descripción: En Colombia la industria del cacao es de vital importancia, especialmente en el departamento de Santander que presentaba el 38% de la producción nacional para el año 2020, el principal método de secado es el secado natural, exponiendo los granos a radiación directa del sol, este método tiene problemas de dependencia al clima, además del prologado tiempo de secado que puede llegar a ser de 7 días; a fin de la optimización y aporte a la industria se propone el diseño de una máquina de secado artificial mediante convección forzada, que desligue el secado de la inestabilidad del clima y siendo una alternativa de bajo costo en el mercado, de tal manera que un pequeño productor de cacao pueda dar valor agregado al producto con bajo costo de inversión.

El diseño se apoya principalmente en modelos de transferencia de calor y masa para la obtención de parámetros de operación necesarios, con tal de que se cumplan los requerimientos planteados, siendo estos el secado del grano de cacao a una temperatura de $45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 2 horas. Se prioriza tener un costo de compra bajo en el mercado, resultando esto en un tamaño reducido de la máquina.

Finalmente se obtiene un prototipo de una máquina de secado de granos de cacao de bajo costo relativo al mercado, la cual realiza el proceso manteniendo los granos a $45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, en un tiempo de 1 hora 39 minutos y un costo de \$1500000.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico-químicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Ingeniería mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. PhD. Ciencia computacional y matemática.

Abstract

Title: Prototype for artificial cocoa drying system with stirring chamber for cocoa beans *

Author(s): Sergio David Cruz Monar, Camilo Andrés Rodríguez Álvarez**

Key Words: Drying of cocoa beans, Convection, Compact bed, Heat and mass transfer.

Description: In Colombia, the cocoa industry is of vital importance, especially in the department of Santander, which accounted for 38% of the national production in 2020. The main drying method is natural drying, exposing the beans to direct sunlight radiation. This method is problematic due to its dependence on the weather, as well as the prolonged drying time, which can reach up to 7 days. In order to optimize and contribute to the industry, the design of a machine for artificial drying using forced convection is proposed. This would detach the drying process from weather instability, offering a low-cost alternative in the market. This way, small cocoa producers can add value to their product with a low investment cost.

The design is mainly based on heat and mass transfer models to obtain the necessary operating parameters, ensuring that the proposed requirements are met, such as drying the cocoa beans at a temperature of $45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ in 2 hours. Prioritizing a low purchase cost in the market has resulted in a reduced machine size.

Finally, a prototype of a low-cost cocoa bean drying machine is obtained, which maintains the beans at $45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ for a drying time of 1 hour 39 minutes and a cost of \$1500000.

* Degree Work

**Faculty of Physical Chemistry. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. PhD. Computational and Mathematical Science.

Introducción

El cacao es una fruta de origen tropical que proviene del árbol de cacao o cacaotero, en la actualidad, Ghana y Costa de Marfil son los dos mayores productores de cacao a nivel global, con un 19% y 38% de producción respectivamente (Cacao México, 2019).

Colombia es el décimo productor de cacao del mundo, produciendo solo en 2021 unas 70000 toneladas de cacao (Agro negocios, 2021). El departamento de Santander se posiciona como el principal productor de cacao del país, con una participación del 38 % (Clúster Santander, 2020), gracias a 12.000 familias campesinas radicadas en la montaña santandereana, que tienen como principal fuente económica a la producción del fruto (Instituto Colombiano Agropecuario, 2019). Lo cual destaca al cacao como un producto agrícola de la región.

El secado de cacao se puede desarrollar de manera natural, que consiste en el secado del grano por medio de la radiación solar, esto conlleva un proceso de varios días; otro tipo de secado es el secado artificial el cual es sustancialmente más rápido debido a la independencia del clima y del control de las condiciones de secado.

Por la importancia de este producto para la economía de la región y su eficacia productiva implementando técnicas de secados artificiales, se plantea como proyecto de ingeniería, el diseño y construcción del prototipo de un sistema de secado artificial de cacao, cuyas condiciones climáticas se basan en la ciudad de Bucaramanga, además de realizar el proceso manteniendo los granos de cacao a temperatura de $45^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ en un tiempo estimado de 2 horas.

Buscando así una alternativa de secado artificial de cacao económica y al alcance del sector campesino de la región.

El cacao es una fuente importante de ingresos para muchos agricultores en países productores, y la producción de cacao puede tener un impacto significativo en la economía y el sustento de las comunidades locales. Estos impactos económicos se ven reflejados en la generación de ingresos y empleo; en las exportaciones y divisas; en el desarrollo de la industria del chocolate; en el desarrollo de infraestructura y servicios y en la generación de turismo y diversificación económica.

Es importante tener en cuenta que la producción de cacao también enfrenta desafíos, como la volatilidad de los precios, la variabilidad del clima, la deforestación, el trabajo infantil y otros problemas sociales y ambientales. Por lo tanto, promover prácticas de producción sostenible y responsables en la producción de cacao es esencial para asegurar un impacto económico positivo a largo plazo y mejorar la sostenibilidad de la industria del cacao y el chocolate.

Por último y no menos importante, el secado del cacao puede tener varios aportes al sector académico en el campo de la investigación y la formación en disciplinas relacionadas con la agronomía, la ciencia de los alimentos, la tecnología de procesamiento y la industria del cacao y el chocolate. Algunos aportes pueden ser la mejora en la investigación en la calidad del cacao, la realización de estudios sobre la optimización de procesos de secado, la formación en técnicas de secado y el desarrollo de tecnologías y soluciones innovadoras.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar prototipo de un sistema de secado artificial de cacao con recámara móvil, cuyas condiciones de operación se basan en las condiciones climáticas de la ciudad de Bucaramanga.

2.2 Objetivos Específicos

Diseñar una secadora de cacao con capacidad de 2 kilogramos de cacao por carga, a temperatura menor de 80°C.

Elaborar el prototipo funcional del diseño obtenido, a fin de comprobar su funcionamiento.

Evaluar la viabilidad del proyecto teniendo en cuenta el costo total de venta, a fin de obtener la tasa de retorno de inversión.

3. Marco teórico

3.1 Procesamiento del cacao

3.1.1 Cosecha del fruto

La cosecha del cacao que inicia desde 1 año y medio a 2 años después de la siembra se realiza seleccionando los frutos más rojizos o amarillentos dependiendo del tipo de cacao, esta se realiza con herramientas como machetes o cuchillos especializados. Además, es de vital importancia tener cuidado con no dañar la “almohada floral”, la cual es donde tienden agruparse las flores fertilizadas y representa la floración del siguiente año.

3.1.2 Extracción de la almendra

La extracción de las almendras se realiza partiendo a la mitad la vaina para así extraer y depositar en cajas de fermentación, se tiene cuidado de no dañar las almendras al momento de abrir la vaina.

3.1.3 Fermentación

Este paso del proceso se realiza en cajas de fermentación, las cuales tienen perforaciones para permitir la salida de humedad, ya que durante este paso la almendra pierde hasta un 33% del peso húmedo. La fermentación empieza con la concentración de azúcares y el aumento de temperatura, siendo que esta puede llegar a 50°C, los azúcares y almidones se descomponen en ácidos o alcohol.

3.1.4 Secado

Es en este paso donde se extrae la mayor cantidad de humedad del grano de cacao, según la International Cocoa Organization-ICCO debe reducirse hasta un 7% de humedad, para la obtención de granos secos de calidad. Para el proceso de secado existen varios métodos de secado divididos en métodos naturales y artificiales.

3.2 Métodos de secado

3.2.1 Secado natural

El secado natural consiste principalmente en el aprovechamiento de la radiación solar, realizando un secado lento a baja temperatura, por medio de este método el secado dura alrededor de una semana, según las condiciones climáticas, es importante el denominado “volteo” del grano entre 2 y 3 veces por hora, debido a que el secado natural no es uniforme y puede llegar a generar defectos en la calidad final del grano.

Figura 1

Secado natural de cacao



Nota. Adaptado de https://img.freepik.com/fotos-premium/cacao-grano-organico-secado-al-sol-granja_51137-2249.jpg?w=996

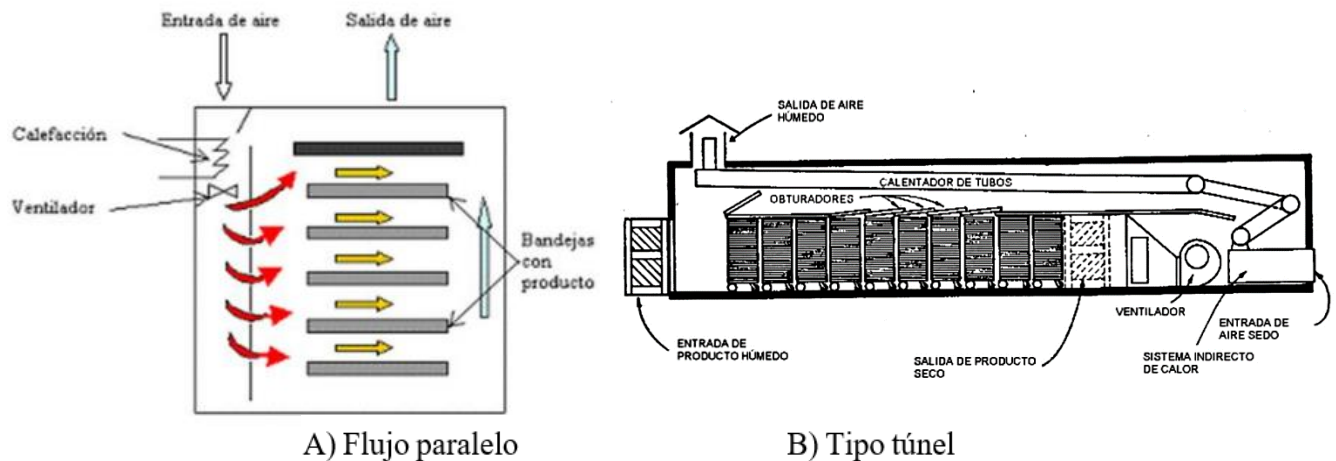
3.2.2 Secado artificial

El secado artificial puede realizarse de forma distinta, resultando en varios tipos de secado artificial usado actualmente en la industria del cacao. siendo los siguientes más utilizados.

3.2.2.1 Secadores de bandeja

Estos consisten en las máquinas de secado que usan bandejas o rejillas para el depósito de los granos de cacao, para posteriormente hacer circular aire caliente, realizando un proceso de convección forzada por medio de ventiladores. El flujo del aire puede darse de flujo paralelo o transversal, siendo este último mejor conocido como tipo túnel.

El secado tipo túnel obtiene mejores resultados de homogeneidad del secado, aunque presentan la desventaja de ser equipos muy largos.

Figura 2*Secadores tipo bandeja*

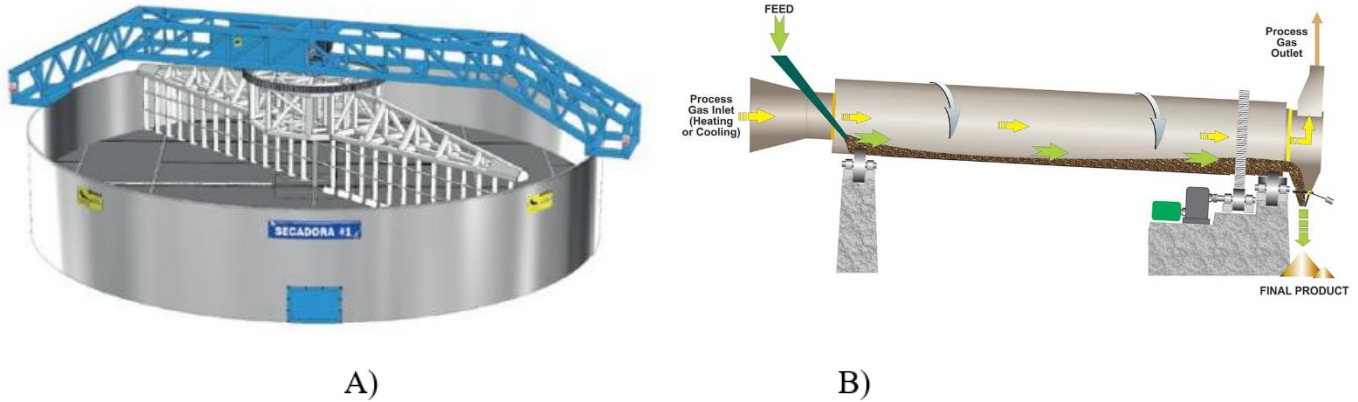
Nota. Adaptado de <https://emjuvi.com/blog/p-secado-de-alimentos-por-secadores-directos-o-por-conveccion-aire-caliente-ndash-alimentos-deshidratados>

3.2.2.2 Secadores rotativos

Estos son especialmente buenos en cuanto a la homogeneidad del secado, por el continuo mezclado de los granos, pueden haberlos de dos tipos rotativos verticales u horizontales, los verticales suelen usar brazos agitadores, y los horizontales, también llamados secadores de tambor, hacen el giro de la cámara o tambor donde se encuentra el material, los secadores rotativos solo permiten secar productos granulares, además de presentar deterioro mecánico con mayor frecuencia que otros tipos de secadores.

Figura 3

Secadores rotativos



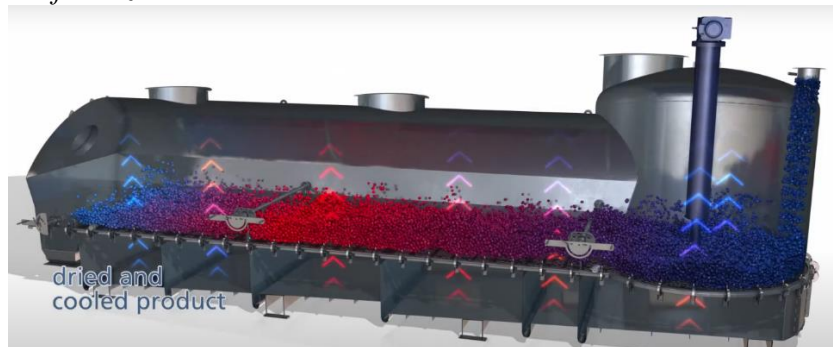
Nota. A) Rotativo vertical adaptado de (Alfonso & Parias, n.d.) B) Rotativo horizontal adaptado de <https://cdn.gea.com/-/jssmedia/migratedfromtridion/products/rotary-dryer-counter-current-drawing-12458.jpg?mw=1280&rev=9ff738873c6c4276a0a4151d82c38477>

3.2.2.3 Secadores de lecho

Este tipo de secado se usa solo para material particulado o granular, puede ser de lecho compacto o fluidizado, y requiere de mayor espacio y normalmente de una altura considerable, los costos suelen ser mayores en los fluidizados porque el aire debe alcanzar una velocidad suficiente para la fluidización del lecho.

Figura 4

Secadores de lecho fluidizado



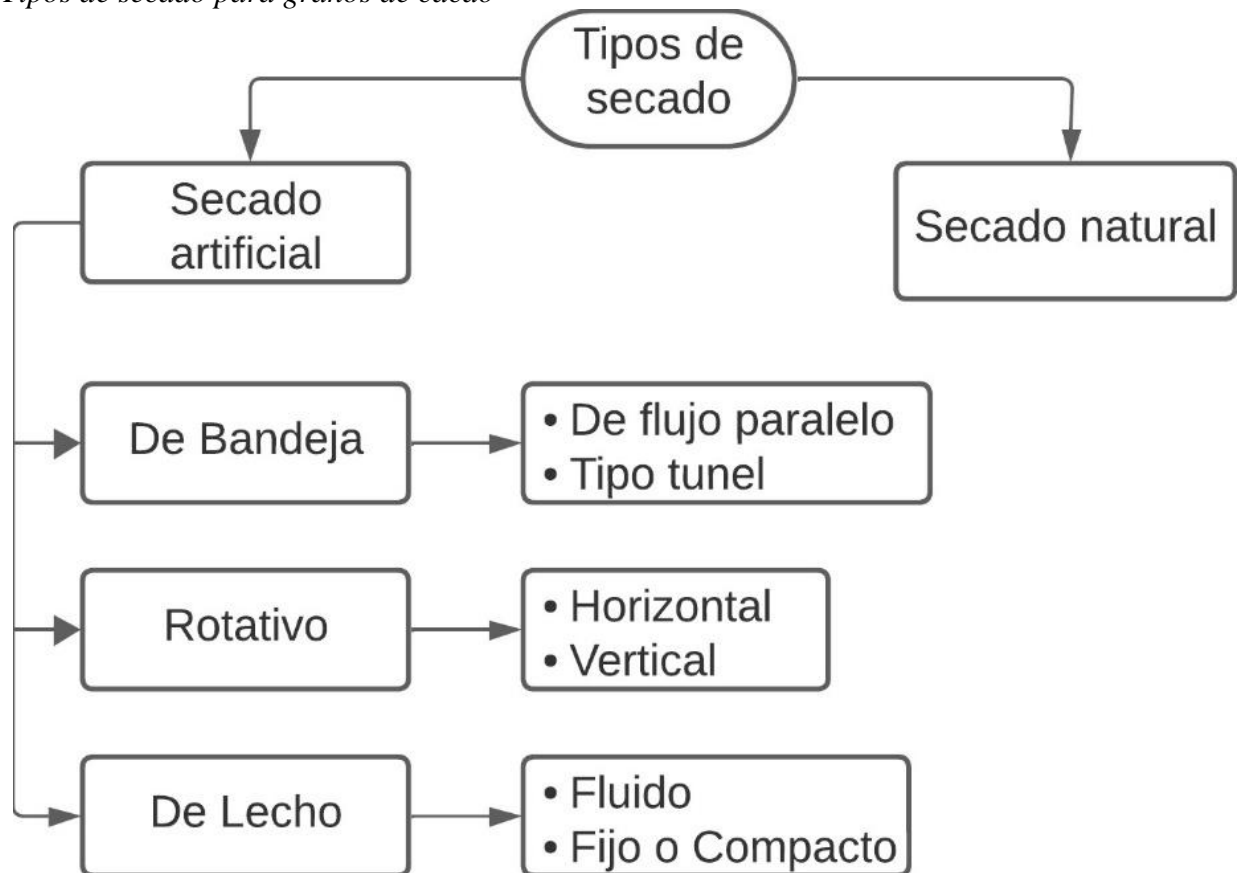
Nota. Adaptado de [https://www.allgaier-process-](https://www.allgaier-process-technology.com/es/Competitividad/Secado/Secador-enfriador%20de%20lecho%20fluidizado)

[technology.com/es/Competitividad/Secado/Secador-enfriador%20de%20lecho%20fluidizado](https://www.allgaier-process-technology.com/es/Competitividad/Secado/Secador-enfriador%20de%20lecho%20fluidizado)

En resumen, los principales tipos de secado empleados para los granos de cacao se pueden ver en el siguiente diagrama.

Figura 5

Tipos de secado para granos de cacao



3.3 Soluciones propuestas y en el mercado

El aumento de la demanda mundial de cacao y la baja productividad en África sugieren que habrá escasez de cacao para los próximos años. Esta situación crea una oportunidad para los proyectos relacionados con el cultivo de cacao en Colombia (ICCO, 2016).

El último informe trimestral realizado por la International Cocoa Organization-ICCO de agosto de 2022, indica que se realizaron revisiones de los pronósticos en la producción de cacao para el periodo 2021/2022, resultando en un aumento del déficit proyectado.

Así, los pronósticos de déficit proyectados anteriormente en 174.000 toneladas aumentaron en un 24.34% hasta 230.000 toneladas. La principal causa definida es la importante caída de producción en Ghana, que disminuyó en 13.875% representando una disminución de 111.000 toneladas en dicho país (Baskett, 2022)

Alrededor del país y del mundo se han desarrollado diferentes proyectos para llevar dispositivos de secado de cacao a diferentes zonas que no cuentan con un método eficaz de secado. Algunos de estos dispositivos se mencionan a continuación:

3.3.1 Tambor de Secado Mixto UPB.

Este dispositivo mecánico utiliza una estrategia de secado que combina aire caliente y radiación térmica para deshidratar granos como el cacao (UPB, 2021)

Los objetivos principales se centran en mejorar la calidad del producto en el proceso, optimizar el uso de fuentes de energía y desarrollar tecnología aplicable para modernizar los métodos de secado utilizados en el sector agrícola. (Castellanos,2021).

De acuerdo con el artículo de la agencia de noticias UPB (2021), el prototipo cumple los objetivos principales planteados. Tales como optimizar el uso de energía y el trabajo de los productores implicados. Además de evitar la dependencia del clima al realizar el proceso de secado en entorno controlado.

El sistema permite controlar parámetros que implican el secado del grano como lo son la temperatura del aire y de manera indirecta controlando la temperatura del grano; la velocidad de rotación del tambor es de igual manera controlable en el prototipo.

Figura 6

Prototipo del Tambor de Secado Mixto.



Nota. Modelo CAD tambor de secado mixto, Recuperado en 2023. Adaptado de: <https://www.upb.edu.co/es/noticias/upb-patente-tambor-rotativo-secado-de-granos-upbbga-2021>

3.3.2 Secador solar de cacao, maíz y frijol UNAL.

El secador solar para granos diseñado en la UNAL tiene una capacidad de 8 kg por carga, el proceso del secado consiste en el secado de aire caliente dirigido hasta un enmallado que funciona de bandeja para el grano, dicha bandeja se encuentra en la parte superior del equipo.

El modelo seca el grano de cacao mediante convección forzada provocada por tres ventiladores ubicados en el área inferior del equipo (Pérez, 2018).

La bandeja de almacenamiento está diseñada para tener un ángulo de inclinación modificable a fin de facilitar la recolección del grano además de optimizar el flujo de aire. El equipo debe ubicarse de la mejor manera posible para obtener radiación directa del sol. (Martínez, 2018)

3.3.3 Secadora con intercambiador de calor marca SIRCA

Es un equipo mecánico con funcionalidad de deshidratar distintos granos como el café, cacao, maíz entre otros. Para cada tipo de grano y condiciones de humedad se obtienen distintas capacidades de secado de 1 a 1,5 toneladas según Sirca.

Por medio de un intercambiador de calor implementado la velocidad de reducción de humedad se da en unos valores entre 2.5% a 3% cada hora. (SIRCA, s.f.)

Además de esto Sirca asegura que los gases de combustión no sean mezclados con el aire de secado, cumpliendo así con criterios de calidad del producto.

Figura 7

Secadora SIRCA



Nota. Secadora SIRCA con intercambiador de calor. Recuperado en 2023. Disponible en: <https://sircaecuador.com/productos/secadora-sirca-con-intercambiador-de-calor/>

3.3.4 Secadora de granos VULCANO TEC

La secadora de granos de Vulcano Tec es otra máquina que consiste en el secado por medio de aire caliente.

El secador está equipado con un agitador que distribuye el grano constantemente, mientras el aire caliente fluye desde la base del secador en dirección ascendente, esto asegura un secado uniforme del grano. (VULCANO TEC, s.f.)

La capacidad del equipo varía dependiendo del tipo de producto y se mide en kilogramos por lote o lo que es lo mismo “batch”. Por ejemplo, para el cacao, la capacidad es de 300 kg por lote. El tiempo de secado necesario para este proceso es de aproximadamente 2 horas. (VULCANO TEC, s.f.)

Figura 8

Secadora de granos VULCANO TEC



Nota. Secadora de granos VULCANO TEC. Disponible en: <https://vulcanotec.com/maquinaria/secadora-de-granos/>.

El aire es calentado por medio de un intercambiador de calor equipado en la máquina, el cuál es alimentado por gas. La cámara de los granos recibe al aire caliente de manera uniforme gracias a un sistema rotor y deflectores internos. Para la extracción de los granos secados existen puertas laterales en la cámara. (VULCANO TEC, s.f.)

4. Metodología

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo del proyecto se divide en tres principales etapas, diseño, construcción y viabilidad respectivamente, y se definen de la siguiente manera.

4.1 Diseño sistema de secado artificial de cacao

En esta etapa se realiza la correspondiente investigación y estudio de sistemas usados actualmente con el propósito de secado de granos, para así posteriormente generar distintos tipos de soluciones a las diferentes partes del sistema, con esto se busca aplicar un método de Quality Function Deployment-QFD con el cual será posible tomar las mejores soluciones a los subsistemas, teniendo en cuenta los requerimientos del usuario final.

4.1.1 Alternativas a funciones

Mediante generación de conceptos e ideas se plantean posibles soluciones que cumplan los requerimientos y funciones de la máquina; tales como:

4.1.1.1 Estructura

La forma general de la máquina que determina las dimensiones y el espacio utilizado para operación, además de restringir los tipos de secado posibles, conociendo que se busca un secado artificial para independizar el secado del clima y reducir el tiempo de secado, se proponen:

- Estructura tipo túnel con banda transportadora. Para secado tipo túnel. Este necesita más espacio por una dimensión relativamente considerable en su longitud, resultando en unas dimensiones mínimas relativamente altas y de más materiales para la construcción.

- Estructura vertical con bandeja. Estructura con menor requerimiento de espacio, pero con necesidad de una mayor altura, compatible con secado tipo lecho fluidizado o fijo, tipo bandeja de flujo paralelo. Menor cantidad de materiales necesarios comparado a tipo túnel.
- Estructura con tambor horizontal. Especial para secado tipo rotativo horizontal, necesita de más espacio que una estructura vertical, pero menos que la estructura tipo túnel. Menor cantidad de materiales necesarios comparado a tipo túnel.

4.1.1.2 Calentamiento del aire

Al ser un secado artificial, comúnmente se usa un secado convectivo mediante aire caliente, para el calentamiento del aire hoy en día se usan las siguientes alternativas:

- Resistencia eléctrica
- Horno a gas con intercambiador
- Caldera con intercambiador

4.1.1.3 Control de variables

Para optimizar el secado, para reducir el tiempo de secado y conservar la calidad del producto, se pueden controlar las principales variables que influyen en el secado; siendo estas la temperatura del secado, la velocidad del aire de convección y la humedad del aire. Siendo que controlar la velocidad del aire y la temperatura es de menor dificultad y costo comparado a un control de humedad. Teniendo esto en cuenta se pueden realizar distintas combinaciones de esta.

- Control ON/OFF de temperatura-Ventilador de velocidad variable-Deshumidificador eléctrico.
- Control PID de temperatura-Ventilador de Velocidad variable-Deshumidificador eléctrico.
- Control ON/OFF de Temperatura-Ventilador de velocidad fija-Deshumidificador eléctrico.
- Control PID de temperatura-Ventilador de velocidad fija-Deshumidificador eléctrico.

- Control ON/OFF de temperatura- Ventilador de velocidad variable-sin deshumidificador.
- Control PID de temperatura-Ventilador de velocidad fija-Sin deshumidificador eléctrico.
- Control ON/OFF de temperatura-Ventilador de velocidad fija-Sin deshumidificador eléctrico.

4.1.1.4 Homogenización del secado

Para mantener una buena calidad del producto final no basta solo con tener control sobre las variables, además es necesario asegurarse de que los granos no sequen durante todo el proceso en la misma dirección, para esto en el secado natural se usa el volteo cada cierto tiempo, de tal manera que los granos estén cambiando de posición durante el secado, buscando un sistema que realice una acción similar se propone usar:

- Agitador interno con acción manual.
Agitador interno automático.
- Realizar manualmente como en secado natural.

4.1.2 Requerimientos y requisitos

En esta etapa se plantean los requerimientos y restricciones del diseño, la selección de los materiales de construcción considerando la normativa para el tratamiento de alimentos definida por el ministerio de salud y protección social.

Teniendo en mente el objetivo general del proyecto, el contexto del problema real y las alternativas actuales del mercado, se plantean los siguientes requerimientos.

Mantener costos de operación bajos, costo de adquisición bajo, uso óptimo y reducido del espacio necesario para la operación, seguridad operacional, fácil operación, fácil mantenimiento del sistema.

Además de contar con requisitos que ya se han definido por cumplimiento de normativas de calidad y manejo de alimentos, o definidos en el diseño. Tales como se pueden ver:

- Temperatura de secado menor a los 80°C a fin de no favorecer la retención de ácidos durante el secado.
- Temperatura exterior de la máquina menor a 45°C en pro de la seguridad.
- Producto final con humedad de entre 6%-8%.
- Materiales que entren en contacto con el alimento deben ser de acero inoxidable.

4.1.3 Criterios de diseño

Son estos criterios los que determinan que alternativas resultan más convenientes, en pro del objetivo de la máquina, por eso los criterios deben aclarar a lo que se busca llegar, considerando los requerimientos y requisitos del diseño, además hay que indicar que criterios son más importantes.

Tabla 1

Criterios de diseño

#	Criterio	Descripción	Valor [%]
1	Costo de adquisición	Valor total que debe invertir el cliente en la adquisición del producto	30
2	Consumo de energía	Criterio que afecta directamente a los costos de operación	15
3	Tamaño	En relación con el volumen que aporta al tamaño final de la maquina	5
4	Impacto ambiental	Criterio vital en la actualidad, donde se debe buscar el menor impacto	10
5	Costo de mantenimiento y repuestos	Un factor vital que tienen en cuenta los clientes e inversores	10
6	Seguridad	Debido a ser una máquina térmica, es importante la seguridad del cliente	15
7	Automatización	A fin de buscar liberar tiempo de atención a la operación	15

Debido al mercado al que se quiere llegar y el enfoque de obtener una maquina económica y al alcance de pequeños productores, el porcentaje más importante lo tiene el criterio de costo de adquisición.

4.1.4 Matriz QFD

Finalmente se obtiene la matriz QFD o casa de la calidad para direccionar el diseño y seleccionar las soluciones más acertadas.

Tabla 2

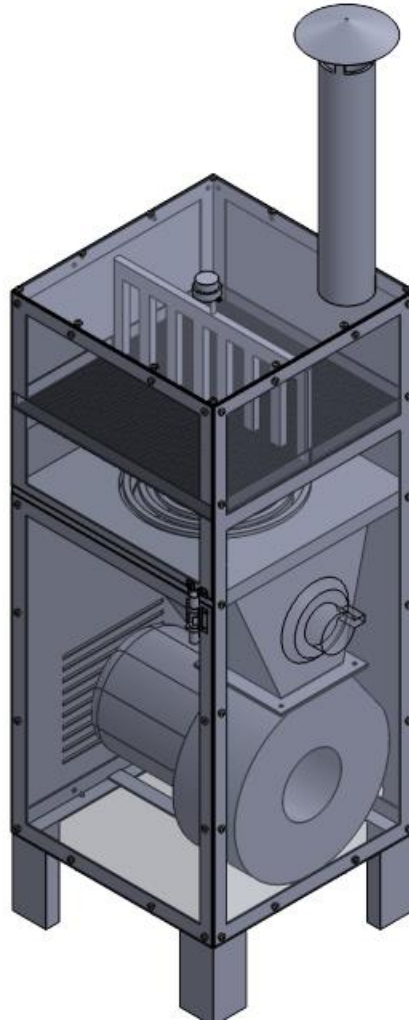
Quality Function Deployment-QFD

	CRITERIO	1	2	3	4	5	6	7	
ALTERNATIVA	Valor	0,3	0,15	0,05	0,1	0,1	0,15	0,15	TOTAL
ESTRUCTURA									
ESTRUCTURA TIPO TÚNEL		2	3	1	4	3	5	5	3,3
ESTRUCTURA VERTICAL		5	5	5	5	5	3	5	4,7
ESTRUCTURA DE TAMBOR HORIZONTAL		4	3	4	4	3	3	5	3,75
CALENTAMIENTO DEL AIRE									
RESISTENCIA ELÉCTRICA		5	3	5	4	5	5	5	4,6
HORNO A GAS CON INTERCAMBIADOR		3	3	3	2	3	4	4	3,2
CALDERA CON INTERCAMBIADOR		2	3	3	4	3	4	4	3,1
CONTROL DE VARIABLES									
CONTROL ON/OFF TEMPERATURA, VELOCIDAD Y HUMEDAD		2	3	5	5	3	5	5	3,6
CONTROL PID TEMPERATURA, VELOCIDAD Y HUMEDAD		1	3	5	5	3	5	5	3,3
CONTROL ON/OFF TEMPERATURA Y HUMEDAD		3	4	5	5	4	5	5	4,15
CONTROL PID TEMPERATURA Y HUMEDAD		2	4	5	5	4	5	5	3,85
CONTROL ON/OFF TEMPERATURA Y VELOCIDAD.		4	4	5	5	5	5	5	4,55
CONTROL PID TEMPERATURA.		4	5	5	5	5	5	5	4,7
CONTROL ON/OFF TEMPERATURA.		5	5	5	5	5	5	5	5
HOMOGENIZACIÓN									
AGITADOR CON ACCIÓN MANUAL		4	5	3	5	4	3	1	3,6
AGITADOR AUTOMÁTICO		3	4	5	4	3	5	5	3,95
REALIZAR MANUALMENTE		5	5	5	5	5	1	1	3,8

Una vez se tiene definido el diseño conceptual se plantea un diseño estructural teniendo en cuenta los fines y objetivo del proyecto.

Figura 9

Diseño de prototipo estructural



Siendo un diseño para secado convectivo de lecho compacto, donde los granos de cacao se cargan en la bandeja mientras una resistencia ubicada en la parte inferior calienta el aire de secado.

Para establecer las condiciones de secado se debe realizar el cálculo térmico a fin de cumplir los objetivos planteados.

Se desea realizar el secado a una temperatura menor de 80 °C para evitar la retención de ácidos, se propone secar con aire a 70°C, además se busca que tiempo de secado sea de alrededor de 2 horas para una carga de 2 kg. Las condiciones externas se diseñan teniendo en cuenta la ubicación geográfica de Bucaramanga-Santander.

Así se plantea los datos de entrada para el diseño térmico.

4.1.5 Cálculos del diseño térmico

Partiendo de la ubicación seleccionada para el diseño (Bucaramanga), se definen las condiciones ambientales a las que se encuentra el equipo. Además de las propiedades del grano de cacao fermentado (listo para secar).

Tabla 3

Condiciones ambientales

T_{ambiente}	25	°C
Humedad_{relativa}	87	%
Presión_{atmosférica}	101.5	kPa

Nota. Datos promedio anuales.

Tabla 4

Propiedades del grano de cacao fermentado

Densidad (ρ_c)	737.32	Kg/m ³
Calor específico (C_{pc})	2684.45	J/kg-K
Humedad	55	%
Largo	23.2	mm
Ancho	12.93	mm
Alto	8.88	mm

Nota. Extraídos de (Eugenio & Ingeniero Agrícola Profesor, n.d.).

Se identifica los requerimientos del proceso de secado que se quieren llevar a cabo, para esto se tiene que se desea realizar el secado de 2 kilogramos de grano húmedo en un tiempo de 2

horas, por medio de convección forzada a temperatura de 70 °C. deseando tener una temperatura del grano constante a 45°C ±3 °C. llevando así el grano hasta una humedad entre 8% y 6%.

Tabla 5

Datos de entrada

Masa de cacao	2	Kg
Tiempo de secado	2	Horas
Temperatura entrada_{aire}	70	°C
Temperatura de grano	45	°C
Humedad final_{cacao}	7	%

La transferencia de calor del aire a los granos de cacao se calcula a partir de.

$$q = hA_p\Delta T_{ml} \quad (1)$$

Donde:

h es el coeficiente de transferencia de calor

A_p es el área superficial total del grano de cacao

ΔT_{ml} es la diferencia media logarítmica de la temperatura

Para obtener el coeficiente h se usa un modelo de lecho compacto, para esto se usa el procedimiento explicado en el capítulo 7 de Fundamentos de transferencia de calor Frank, P. Incropera.

La ecuación descrita es:

$$\epsilon j_H = \epsilon j_m = 2.06 Re_D^{-0.575} [90 \leq Re_D \leq 4000] \quad (2)$$

Una vez sustituido el factor de Colburn y despejado el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{2.06}{\epsilon} \rho_a V_a C p_a Re_D^{-0.575} Pr^{-2/3} \quad (3)$$

Donde:

ρ_a es la densidad del aire

V_a es la velocidad del aire en el canal sin el compactado

C_{p_a} es el calor específico del aire

Re_D el número de Reynolds en términos del diámetro de esfera

Pr número de Prandt

ε es la fracción de vacío para el compactado

Evaluando las propiedades del aire a $T=70^\circ\text{C}$ y presión 101.5 kPa

Tabla 6

Propiedades del aire a 70°C

ρ_a	1.031	Kg/m^3
C_{p_a}	1040	J/kg-K
Pr	0.7177	N/A

Como se puede ver de la ecuación (3) el único valor que no se dispone es la velocidad del aire. Como dicha velocidad del aire afecta directamente al flujo de calor que se transfiere del aire a los granos de cacao, y además a esto, el flujo de calor presente determina el tiempo que tardarán los granos de cacao en evaporar su contenido de humedad, partimos del tiempo definido para encontrar el punto deseado de la velocidad del aire.

Para ello se define la cantidad total de calor necesaria para secar los granos. Tomando en cuenta tanto el calor sensible como el latente necesarios para ello. El calor total necesario se define a partir de:

$$Q_{total} = m_C C_{p_C} (T_{sec} - T_{amb}) + m_{vap} h_{fg} + E_a \quad (4)$$

Donde:

m_C corresponde a la masa de cacao a secar

C_{p_C} el calor específico del cacao

T_{sec} temperatura de grano

T_{amb} temperatura ambiente

m_{vap} masa de vaporización (masa total de agua que se evapora)

h_{fg} entalpia de vaporización del agua

E_a es la energía de activación para que inicie la difusión

La energía de activación para el proceso de secado de granos de cacao es estimada por (Macmanus Chinenye et al., n.d.) como:

E_a	39.94	kJ/mol
-------	-------	--------

Para conocer la energía total necesaria es pertinente multiplicar por el número de moles en un grano de cacao, como a mayor número de moles de agua la energía requerida será mayor, se toma el punto con mayor humedad (55%) para el cálculo de los moles. Donde el número de moles se calcula tal como:

$$n = \frac{masa}{M_a} \quad (5)$$

Donde

M_a es la masa molar del agua

La masa de agua en un grano de cacao al 55% de humedad es la razón entre cantidad de agua en la carga de 2kg y el número de granos. Resultando

$$n = \frac{1100g}{1535 * \frac{18.015g}{mol}} = 0.039778 mol$$

Por tanto, la energía de activación necesaria es de

$$E_{at} = \frac{39.94kJ}{mol} * 0.039778 mol = 1.5887 kJ$$

Ahora, se define la entalpia de vaporización del agua a 57.5°C y presión atmosférica indicada (Tabla 3) de 101.5 kPa.

h_{fg}	2364	kJ/kg
----------------------------	------	-------

En el caso de la masa total de agua evaporada se establece que corresponde a la diferencia de la cantidad de agua inicial y la cantidad de agua al final del secado, tal como:

$$m_{vap} = ma_e - ma_s \quad (6)$$

La masa de agua a la entrada puede ser determinada fácilmente como:

$$ma_e = m_c * \varphi_c \quad (7)$$

Siendo φ_c la humedad del cacao inicial, la cual es definida en la Tabla 4, $\varphi_c=55\%$;

Entonces:

$$ma_e = 2[kg] * 0.55 = 1.1 [kg]$$

La cantidad de agua a la salida es producto de la masa de cacao a la salida por la humedad final del grano, definida como un 7%.

La masa de cacao a la salida se define por la ecuación:

$$m_{c_s} = \frac{m_c * (1 - \varphi_c)}{1 - 0.07} \quad (8)$$

Resultando en:

$$m_{c_s} = \frac{2*(1-0.55)}{1-0.07} = 0.9677 [kg] \text{ y } ma_s = 0.9677[kg] * 0.07 = 0.067739 [kg]$$

De tal manera:

$$m_{vap} = 1.1 - 0.067739 = 1.032261 [kg]$$

Teniendo todos los valores necesarios, de la ecuación (4) se halla el calor necesario total para el secado.

Tabla 7

Resultados de calor total necesario

m_{c_s}	0.9677	kg
ma_s	0.067739	kg

m_{vap}	1.032261	kg
Q_{total}	2549	kJ

La relación del tiempo con el flujo de calor y el calor total se entiende como:

$$Tiempo = \frac{Q_{total}}{q} \quad (9)$$

Como el tiempo es un requerimiento establecido en 2 horas (7200 segundos), se tiene que:

$$q = 354 \left[\frac{J}{s} \right]$$

Se define un factor de seguridad de 1.2, para asegurar el tiempo de secado en las distintas condiciones climáticas que varían durante el año.

$$Q = q * 1.2 = 353.8 * 1.2 = 424.8 \left[\frac{J}{s} \right]$$

Con esto tenemos el flujo de calor que es necesario para secar el grano en 2 horas. El área A_p se define:

$$A_p = \frac{Vol_C}{Vol_e} * A_s \quad (10)$$

Donde:

Vol_C es el volumen total de cacao

Vol_e es el volumen de un grano de cacao

A_s es el área superficial de un grano de cacao

El volumen total de cacao es $Vol_C = \frac{m_C}{\rho_C} = \frac{2}{737.32} = 0.002713 [m^3]$

Para el volumen de un grano de cacao se idealiza como una esfera donde su diámetro es el promedio de las 3 dimensiones del grano descritas en la tabla 2.

D_e	0.015	m
----------------------	-------	---

Por tanto, el volumen de una esfera es de:

$$Vol_e = \frac{4}{3}\pi * \left(\frac{D_e}{2}\right)^3 = 0.000001768 [m^3]$$

A su vez el área superficial de una esfera se halla de la siguiente manera:

$$A_s = \pi D_e^2 = 0.0007072 [m^2]$$

Así, por medio de la ecuación (10)

A_p	1.085	m ²
----------------------	-------	----------------

ΔT_{ml} corresponde a:

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_e - T_{sec} - (T_s - T_{sec})}{\ln \left(\frac{T_e - T_{sec}}{T_s - T_{sec}} \right)} \quad (11)$$

Donde:

T_e es la temperatura de entrada del aire

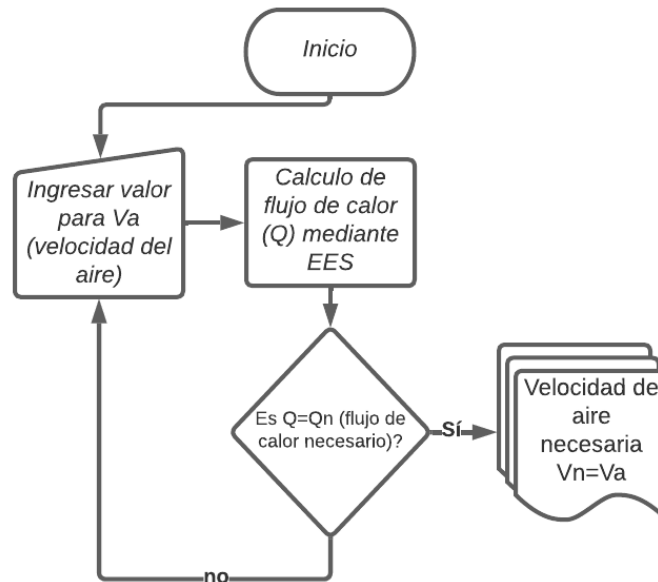
T_s temperatura de salida del aire

La temperatura de salida del aire aun es desconocida, para definirla se usa una de las ecuaciones relacionadas al modelo de lecho compacto, el cual define la temperatura de salida tal como:

$$T_s = T_{sec} + [(T_e - T_{sec}) * e^{\left(\frac{-hA_p}{\rho_a V_a A_t C_p a}\right)}] \quad (12)$$

Como se puede ver la temperatura es una variable dependiente de la velocidad del aire y del coeficiente h, que a su vez también es dependiente de la velocidad del aire por el ducto, el ducto por donde fluye el aire tiene un área transversal $A_t = 0.09 \text{ m}^2$.

Como el valor “q” debe ser igual a 338.4[J/s] se realiza un proceso de iteración hasta llegar a la velocidad del aire necesaria para cumplir la igualdad.

Figura 10*Diagrama de flujo procedimiento iterativo***Tabla 8***Resultados iteración*

T_s	45.31	$^{\circ}\text{C}$
V_a	0.1783	m/s
h	69.86	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
Q	424.8	W

A partir de la velocidad del aire se conoce el valor CFM que debe tener el ventilador siendo este de

CFM	34	cfm
------------	----	-----

Se realiza la búsqueda de un ventilador que cumpla la condición de caudal, además de vencer la caída de presión que representa principalmente la cama de compactado y la reducción súbita al ducto de la chimenea.

4.1.5.1 Caídas de presión

Caída de presión de la cama compacta es hallada a partir de la ecuación de Carman-Kozeny para lechos compactados.

$$\Delta P = \frac{180\mu V_a L_c (1 - \varepsilon)^2}{\epsilon^2 D^2 \epsilon^3} \quad (13)$$

Donde:

μ la viscosidad del fluido (aire)

V_a la velocidad del aire antes del compactado

L_c la longitud del compactado

ε la fracción de vacío

ϵ la esfericidad del grano

Tabla 9

Valores para ecuación (13)

μ	0.00002049	Kg/m-s
ε	0.42	N/A
ϵ	0.55	N/A
V_a	0.1783	m/s

Nota. Valores de fracción de vacío y esfericidad del grano de cacao de: (Ramos, Augusto et al., 2022).

La longitud de la cama de vacío corresponde al volumen aparente de los dos kilogramos de cacao entre el área transversal de la cama que es $A_t=0.09 \text{ m}^2$.

$$L_c = \frac{Vol_{ap}}{0.09} \quad (14)$$

El volumen aparente puede ser hallado a partir del volumen real de los granos y la fracción de vacío, tal como.

$$Vol_{ap} = \frac{Vol_c}{(1 - \varepsilon)} \quad (15)$$

De tal forma que $Vol_{ap} = \frac{0.002581}{(1-0.42)} = 0.004677 \text{ m}^3$ y $L_c = \frac{0.004677}{0.09} = 0.05196 \text{ m} \approx$

5.2 cm

Finalmente

ΔP_c	2.279	Pa
--------------	-------	----

Nota. Se observa un valor bajo en la caída de presión, debido a una velocidad de aire baja y una longitud de compactado baja, los dos factores directamente relacionados con la caída de presión, la longitud baja gracias a la mayor área transversal de los granos de cacao.

El análisis de un fluido gaseoso puede ser de gran complejidad al ser compresibles, por lo que se opta por modelar mediante la ecuación de Bernoulli, lo que es posible si el cambio del peso específico es mínimo.

Para comprobar el peso específico se debe determinar a partir de:

$$\gamma = \frac{p}{RT} \quad (16)$$

Donde

p Presión absoluta del gas

γ Peso específico del gas

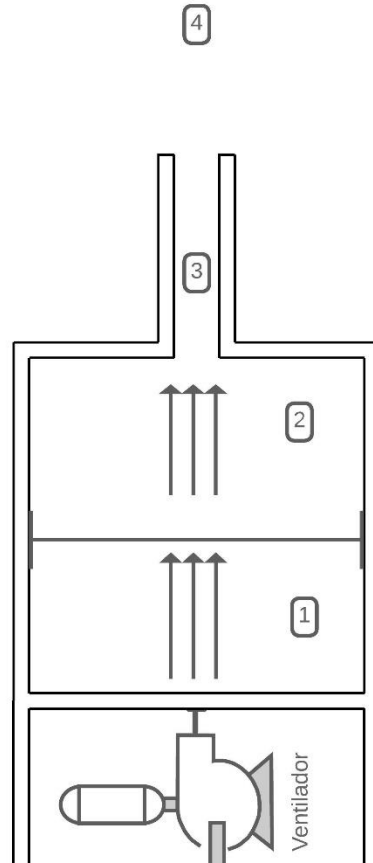
T Temperatura absoluta del gas, es decir, sobre el cero absoluto

R Constante del gas en consideración

Se identifican los puntos de interés en la siguiente figura

Figura 11

Puntos de interés en el flujo de aire



Nota. La caída de presión de la cama compactada se da entre 1 y 2, la caída por reducción súbita, entre 2 y 3.

La presión en 2 es aproximadamente igual a la presión de la atmósfera, debido a que un ventilador para el caudal deseado difícilmente genera más de 500 pascales de presión, siendo que 500 pascales representan un 0.49% de la presión atmosférica.

Como la presión debe ser absoluta, la presión en el punto 2 es:

$$P_2 = 101500 \text{ Pa}$$

La temperatura en 2 es la temperatura de salida del aire después de intercambiar calor con los granos de cacao, esta se encuentra en la Tabla 8.

Además, la constante de gas del aire se obtiene del apéndice N de (Mott, 2006).

R	29.2	N-m/N-K
----------	------	---------

De tal manera que

$$\gamma_2 = \frac{101500 \text{ N/m}^2}{\frac{29.2 \text{ Nm}}{\text{NK}} * 318.31 \text{ K}} = 10.92 \text{ N/m}^3$$

El otro punto seleccionado es el punto 4, debido a que en el punto 3 la presión es desconocida, de hecho, es esta la variable que se desea hallar para conocer la caída de presión por la reducción súbita del conducto.

Así los parámetros necesarios y el peso específico en el punto 4 son:

P₄	101500	Pa
T₄	298	K
γ₄	11.66	N/m ³

Representando una diferencia de 6.3% entre el punto 2 y 4; es posible identificar que el peso específico en el punto 3 será más cercano a γ_2 puesto que tiene una temperatura y presión más cercanas al punto 2, por tanto, es posible suponer $\gamma_3 \approx \gamma_2$.

Por tanto, es posible usar la ecuación de Bernoulli para fluidos incompresibles debido al comportamiento similar que tiene el aire al no variar en gran medida γ .

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = (Z_3 - Z_2) + \frac{(V_3^2 - V_2^2)}{2g} + h_L \quad (17)$$

Donde

Z corresponde a la altura del punto (2 y 3) indicados en la Figura 11

V la velocidad del aire

g la aceleración de la gravedad

γ peso específico del aire

ΔP la caída de presión entre los puntos 2 y 3

h_L son las pérdidas por fricción

A partir del supuesto, el valor de γ será el peso específico del punto 2 debido a que se demostró que el punto 3 no tendrá un cambio importante en su peso específico.

La velocidad del aire en el punto 2 es la misma Velocidad de aire en contacto con el compactado, se define un cambio de 20 cm de altura entre los puntos 2 y 3.

De la ecuación (17) hace falta la velocidad del punto 3 a fin de obtener la caída de presión por contracción súbita, esta velocidad está definida por:

$$V_3 = \frac{\dot{V}_A}{A_{chi}} \quad (18)$$

Donde

\dot{V}_A es el caudal de aire en el ducto, siendo este de 34 CFM \approx 0.01605 m³/s.

A_{chi} es el área transversal de la chimenea.

El área de la chimenea se diseña a partir de dimensiones de tuberías estándar, las dimensiones estándar según el apéndice F de (Mott, 2006).

Figura 12

Diámetros de tuberías de acero

Tamaño nom. de tubería (pulg)	Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Flujo de área	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(pies)	(mm)	(pies ²)	(m ²)
1/8	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660 \times 10 ⁻⁵
1/4	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717 \times 10 ⁻⁵
3/8	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236 \times 10 ⁻⁴
1/2	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960 \times 10 ⁻⁴
3/4	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437 \times 10 ⁻⁴
1	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574 \times 10 ⁻⁴
1 1/4	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653 \times 10 ⁻⁴
1 1/2	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314 \times 10 ⁻³
2	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168 \times 10 ⁻³
2 1/2	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090 \times 10 ⁻³
3	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768 \times 10 ⁻³
3 1/2	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381 \times 10 ⁻³
4	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213 \times 10 ⁻³

Nota. Adaptado del apéndice F de (Mott, 2006). Mecánica de fluidos.

Se elige un diámetro nominal de 2 pulgadas para la chimenea, por tanto, el diámetro interno de la chimenea es de 52.5 mm.

De aquí que $A_{chi} = \frac{\pi}{4} D_{chi}^2$ resultando en

$$A_{chi} = \frac{\pi}{4} 0.0525^2 = 0.002165 \text{ m}^2$$

$$\text{Entonces } V_3 = \frac{0.01605}{0.002165} = 7.413 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se consideran las pérdidas por fricción, para las que se tomará en cuenta solo la sección de la chimenea, ya que es la única sección del flujo del aire con una velocidad considerable, sabiendo que velocidades tan bajas presentarán caídas de presión despreciables.

$$h_L = f \frac{L_T}{D_T} \left(\frac{V_3^2}{2g} \right) \quad (19)$$

Donde

f es el factor de fricción de la tubería

L_T la longitud de tubería (chimenea)

D_T diámetro de tubería (chimenea)

g aceleración de la gravedad

El factor de fricción se halla a partir de la ecuación desarrollada por P. K. Swamee y A. K.

Jain.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D_T}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (20)$$

Donde

ϵ es la rugosidad de la tubería

N_R es el número de Reynolds

El número de Reynolds corresponde a $N_R = \frac{VD_T}{\nu} = \frac{7.414 \cdot 0.0525}{0.00001991} = 19600$

Mientras que la rugosidad se toma de la tabla 8.2 de (Mott, 2006) resultando ser $4.6 \cdot 10^{-5}$ m.

Por tanto, el factor de fricción

f	0.028	Adimensional
Así		

$$h_L = 0.028 \frac{0.3}{0.0525} \left(\frac{7.414^2}{2 * 9.81} \right) = 0.448 \text{ m}$$

Y finalmente por medio de la ecuación de Bernoulli (17) la caída de presión por reducción súbita es

$\Delta P_{\text{Chimenea}}$	37.64	Pa
Y la caída de presión total en el sistema es		
ΔP	39.92	Pa

4.1.5.2 Selección del ventilador

Teniendo ahora los dos requerimientos para la selección del ventilador (caudal y presión), se procede a una búsqueda en el mercado. Encontrando así el ventilador por medio de catálogo de la marca SODECA, para uso en hornos.

Figura 13

Ventilador SODECA SDBP/F-100-4T-0.25



Nota. Extraído de catalogo Sodeca “ventiladores para hornos”.

https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/SODECA_CT25_VENTILADORES_PARA_HORNOS_ES.pdf

Figura 14

Especificaciones ventilador

MOD.	kW	r.p.m	dB/A	CAPACIDAD (m³/s)											
				0,008	0,017	0,03	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12	0,13	0,16	0,17	
SDBP/F-100-2T-0.25	0,18	2680	58			30	32	33	34	35	36	36	30	24	
SDBP/F-100-4T-0.25	0,18	1340	48	6	6	7	7	8	7						

Margen sobre el caudal ±5%
Margen del nivel sonoro +3...5 db

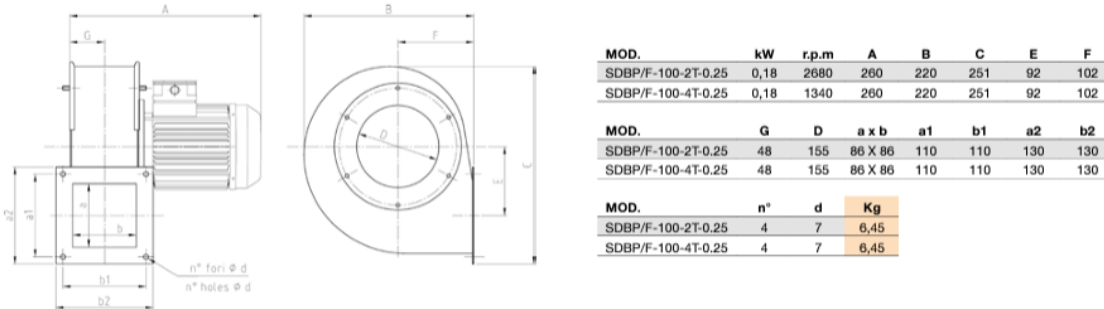
Nota. Extraído de catalogo Sodeca “ventiladores para hornos”.

https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/SODECA_CT25_VENTILADORES_PARA_HORNOS_ES.pdf

Figura 15

Dimensiones ventilador

Dimensiones mm



Nota. Extraído de catalogo Sodeca “ventiladores para hornos”.

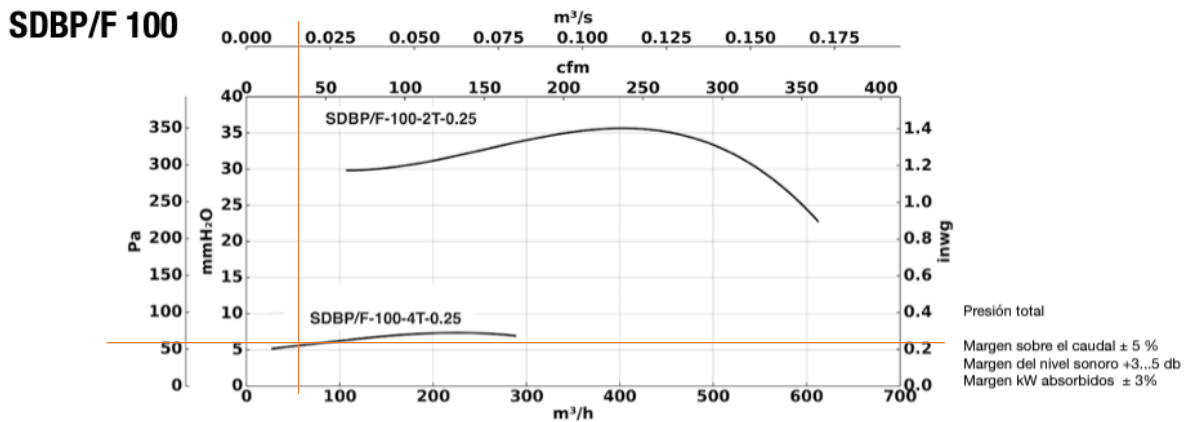
https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/ES/SODECA_CT25_VENTILADORES_PARA_HORNOS_ES.pdf

El caudal de operación seleccionado en el ventilador es de $0.17 \text{ m}^3/\text{s} \approx 36 \text{ CFM}$, generando una presión de $6 \text{ mmH}_2\text{O} \approx 58.83 \text{ Pascales}$, siendo estos suficientes para vencer las caídas de presión.

Figura 16

Curvas de operación

Curvas Características



Ahora es necesario realizar un ajuste de los cálculos anteriores por medio de un procedimiento similar, pero partiendo desde la velocidad de aire que brinda el ventilador seleccionado, dando esto los valores reales teóricos de la operación térmica de la máquina.

Tabla 10

Cálculos con montaje de ventilador seleccionado

V_a	0.1888	m/s
h	71.34	W/m ² K
A_p	1.085	m ²
T_e	70	°C
T_{sec}	45.08	°C
T_s	45.31	°C
ΔP	44.31	Pa
q	407.8	W
Tiempo	6252	s

El tiempo de secado con el montaje resulta en 6252 segundos correspondientes a 1 hora 44 minutos aproximadamente.

4.1.5.3 Cálculo del tiempo por medio de la transferencia de masa

Como la concentración de masa cambia con el tiempo porque se evaporará el agua del grano, se usan modelos de transferencia de masa transitorios, para lo que es imprescindible conocer si es un modelo de sistema concentrado o en su defecto como sólido con efectos espaciales.

Para ello se usa analogía entre la formulación de conducción transitoria de calor y la difusión transitoria de masa, para ello se deben tomar las siguientes suposiciones según (*CENGEL - Transferencia de Calor*, n.d.)

1. El coeficiente de difusión es constante. Esto es válido para un medio isotérmico, ya que D_{AB} varía con la temperatura (corresponde a la difusividad térmica constante).
2. No hay reacciones homogéneas en el medio que generen o agoten la especie A en difusión (corresponde a no generación de calor).

3. Inicialmente ($t = 0$) la concentración de la especie A es constante en toda la extensión del medio (corresponde a temperatura inicial uniforme).

El criterio para definir si es sistema concentrado o con efectos espaciales es que $Bi < 0.1$ donde,

$$Bi = \frac{h_{masa} * L_c}{D_{AB}} \quad (21)$$

h_{masa} es el coeficiente de transferencia de masa

L_c corresponde a la longitud característica

D_{AB} es el coeficiente de difusión binaria

Según los resultados obtenidos por (Koua et al., 2019) el coeficiente de transferencia de masa y el coeficiente de difusión para el proceso de secado de cacao son definidos por las siguientes ecuaciones:

$$h_m = 7.75 * 10^{-4}t^2 - 2.05 * 10^{-4}t + 4.23 * 10^{-3} \quad (22)$$

$$D_{AB} = 1.3 * 10^{-10} \frac{x}{x_0} + 4.18 * 10^{-10} \quad (23)$$

Donde t es el tiempo de secado en horas, y $\frac{x}{x_0}$ se refiere a la humedad del grano; y sabiendo que t fue definido en 2 horas, y la humedad se toma como 31% siendo el promedio entre la humedad inicial y final (55% y 7% respectivamente). De las ecuaciones (22) y (23):

h_{masa}	$1.922 * 10^{-6}$	m/s
D_{AB}	$4.583 * 10^{-10}$	m ² /s

La longitud característica para una esfera según (CENGEL - *Transferencia de Calor*, n.d.)

es $\frac{r_0}{3}$, por tanto

$$L_c = \frac{0.015}{6} = 0.0025 [m]$$

De aquí que por medio de (21)

$$Bi = \frac{1.922 * 10^{-6} * 0.0025}{4.583 * 10^{-10}} = 10,49 > 0.1$$

Así que la difusión interna no es despreciable respecto a la convectiva. Por tanto, la ecuación descrita por Cengel para un sistema con efectos espaciales es la siguiente:

$$\frac{C_t - C_\infty}{C_{t=0} - C_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (24)$$

Donde A_1 y λ_1 son unas constantes descritas en la tabla 4-2 de (*CENGEL - Transferencia de Calor*, n.d.) o de igual forma en la tabla 5.1 de (*INCROPERA - Transferencia de calor*, n.d.).

τ es la constante de tiempo o número de Fourier definido como:

$$\tau = \frac{D_{AB} * t}{L_C^2} \quad (25)$$

Las constantes para la ecuación (24) correspondientes a un $Bi=10.49$ son:

A_1	1.9249
λ_1	2.8363

Las concentraciones “C” son definidas como el número de moles por unidad de volumen del medio, la concentración en el tiempo $t=0$ será entonces la razón entre el número de moles de agua que contiene el grano de cacao y el volumen del grano de cacao. Mientras que el número de moles es la masa sobre la masa molar del componente.

$$C_{t=0} = \frac{n}{Vol_e} \quad (26)$$

$$n = \frac{masa}{M_a} \quad (27)$$

Como es conocido que inicialmente entran 2 kg de cacao con una humedad relativa en base seca de 55%, el contenido de agua inicial es de 1.1 kg, dividiendo entre el número de granos de cacao en la carga se sabrá la masa de agua por cada grano.

El número de granos no es más que... $\#granos = \frac{Vol}{Vol_e} = \frac{0.002713}{0.000001768} = 1534.5 \cong$

1535 *granos*

Así la masa de agua que contiene un grano es de $masa = \frac{1100 g}{1535} = 0.7166 g$ como la masa molar de agua es conocida el número de moles ahora es conocido, seguidamente $C_{t=0}$ también es será conocido.

$$n = \frac{0.7166 g}{18.015 \frac{g}{mol}} = 0.03978 mol$$

$$C_{t=0} = \frac{0.03978 mol}{0.000001768 m^3}$$

M_a	18.015	g/mol
n_{t=0}	0.03978	mol
C_{t=0}	22500	mol/m ³

Siguiendo el mismo procedimiento se encuentra la concentración final deseada, correspondiente a una humedad del grano de 7 %.

n_t	$2.45 \cdot 10^{-3}$	mol
C_t	1386	mol/m ³

Para la concentración del medio C_{∞} se tiene que hallar la masa de agua por unidad de masa de aire, partiendo de la humedad relativa conocida de 87%, la presión ambiente de 101.5 kPa y la temperatura ambiente 25 °C, se tiene que la humedad absoluta es de $\omega=0.01737$.

Esta corresponde a la humedad absoluta del aire ambiente, sabemos que esta humedad absoluta no cambia con el calentamiento de aire a 70°C siendo esta la condición de aire justo antes del contacto con los granos de cacao, este es el aire que tiene la concentración del medio.

La humedad absoluta es descrita como la masa de vapor de agua por kg de aire tal como:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \left[\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ aire}} \right] \quad (28)$$

Entonces la masa de agua del medio $m_m = 0.01737 \text{ kg} \approx 17.37 \text{ g}$ y el número de moles será

$$n_m = \frac{17.37 \text{ g}}{18.015 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0.964 \text{ mol}$$

El volumen de aire correspondiente a 1 kg es de $V = \frac{1 \text{ kg}}{1.031 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.9699 \text{ m}^3$ finalmente la concentración del medio:

$$C_\infty = \frac{0.964 \text{ mol}}{0.9699 \text{ m}^3} = 0.994 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Resumiendo, los valores para la ecuación (24):

$C_{t=0}$	22.5	Kmol/m ³
C_t	1.386	Kmol/m ³
C_∞	0.000994	Kmol/m ³
A_1	1.9249	N/A
λ_1	2.8363	N/A

Como resultado:

$$\frac{1.386 - 0.000994}{22.5 - 0.000994} = 1.9249e^{-2.8363^2\tau}$$

τ	0.428	N/A
--------	-------	-----

Como indica la ecuación (19): $0.428 = \frac{4.583 \cdot 10^{-10} \cdot t}{0.0025^2}$ donde t es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar la concentración deseada, correspondiente a 7% de humedad del grano.

t	5837	s
-----	------	---

Tiempo que es igual a 1 hora 37 minutos. En un tiempo similar al hallado con condiciones de transferencia de calor, concluyendo que el tiempo mínimo para el secado lo restringe la transferencia de calor y es igual a 1 hora 44 minutos.

4.1.5.4 Selección de resistencia eléctrica

Todo el proceso calculado anteriormente se ha dado con la suposición “el aire de entrada al secado tiene una temperatura de 70°C”, ahora, si bien es una temperatura que se define para el diseño, hay que seleccionar una resistencia eléctrica que caliente el aire de entrada desde la temperatura ambiente hasta 70°C. Con un factor de seguridad de 1.2.

La potencia eléctrica que debería tener la resistencia es equivalente al flujo de calor que requiere el aire para elevar su temperatura. Tal como:

$$Pot = \dot{m}_a * C_{pa} * (T_e - T_{amb}) * FS \quad (29)$$

Donde

\dot{m}_a es el flujo masico de aire

C_{pa} el calor especifico del aire

T_e la temperatura de entrada de aire (70°C)

T_{amb} la temperatura ambiente

FS el factor de seguridad

El flujo masico de aire se halla a partir del caudal de aire que da el ventilador seleccionado, como indica la ecuación:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{\rho_a} \quad (30)$$

Las especificaciones del ventilador de la Figura 14 indican un caudal de, $0.017 \frac{m^3}{s}$ por tanto:

$$\dot{m}_a = \frac{0.017 \frac{m^3}{s}}{1.069 \frac{kg}{m^3}} = 0.01589 \frac{kg}{s}$$

De aquí que:

$$Pot = 0.01589 * 1039 * (70 - 25) * 1.1 = 815.7 \text{ W}$$

Luego de una búsqueda en el mercado se decide seleccionar una resistencia eléctrica para estufa de la marca Ge modelo WB30M1 por un precio de \$177.630 COP.

Figura 17

Resistencia eléctrica



Nota. Adaptado de: https://www.amazon.com/-/es/Quemador-horno-para-superficie-WB30M1/dp/B003BNZ4ZE/ref=sr_1_4?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&sr=8-4

Donde sus principales características se observan en la siguiente tabla.

Tabla 11

Características técnicas de resistencia eléctrica Haceb

Potencia	1325	W
Material	Acero inoxidable	AISI 304
Diámetro	6	Pulgadas
Espiras o giros	5	Pulgadas
Diámetro de espira	10.16	mm

La potencia que consume la resistencia se transfiere por convección y radiación, el flujo de calor irradiado eleva en muy pocos grados la temperatura del aire, debido a que los gases poseen un valor muy bajo de absorptividad. Por tanto, la mayor parte del calor transferido por radiación serán pérdidas de calor.

Por el contrario, el calor transferido por convección afecta directamente la temperatura del aire, de tal manera que el calor de convección debe ser mayor a 815.7 W que es la potencia necesaria para elevar la temperatura del aire con un factor de seguridad de 1.1, hasta los 70 °C.

El calor de convección está definido por:

$$Q_C = h_C * A_S * (T_R - T_A) \quad (31)$$

Donde

T_R es la temperatura superficial de la resistencia

T_A la temperatura del aire (temperatura ambiente)

A_S el área superficial de contacto con el aire

h_C el coeficiente de transferencia de calor convectivo

el área superficial se halla a partir de la resistencia seleccionada, conociendo características geométricas presentes en la Tabla 11. El área superficial corresponde a:

$$A_S = P_e * L_e \quad (32)$$

Donde

P_e es el perímetro del área transversal de la espiral

L_e la longitud de la espiral (equivalente a desenrollar la espiral)

La longitud de la espiral se puede determinar a partir de:

$$L_e = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \frac{a}{2\pi} \sqrt{1 + \varphi^2} d\varphi \quad (33)$$

Donde

a es la distancia entre espiras

φ el ángulo de rotación

Para efectos prácticos se usa la calculadora virtual de Planetcalc a fin de hallar la longitud de la espiral, siendo esta:

L_e	1.6	m
-------	-----	---

Mientras que el perímetro de la espira corresponde a:

$$P_e = \pi D_e \quad (34)$$

Siendo que

D_e es el diámetro de la espira

Así, $P_e = \pi * 0.01016 = 0.03191858 \text{ m}$ y finalmente:

$$A_s = 0.03191858 * 1.6 = 0.05107 \text{ m}^2$$

El coeficiente convectivo en la resistencia se halla como un modelo de convección externa forzada, para lo cual se definen los siguientes parámetros:

Tabla 12

Parámetros para coeficiente convectivo en la resistencia

Velocidad de aire	0.749	m/s
Diámetro de espira	0.01016	m
Viscosidad del aire	0.00001845	Kg/m-s
Densidad del aire	1.174	Kg/m ³
Prandtl	0.7477	Adimensional
Conductividad del aire	0.02559	W/m-K

Iniciando con el cálculo del número de Reynolds tal y como se describe:

$$Re = \frac{V_A D_S \rho}{\mu} \quad (35)$$

Donde

V_A es la velocidad del aire en contacto con la resistencia

D_S el diámetro de espira

ρ densidad del aire

μ viscosidad del aire

$$\text{así, } Re = \frac{0.749 * 0.01016 * 1.174}{0.00001845} = 484.2$$

A partir del número de Reynolds, y según la tabla 7-1 de Cengel-Transferencia de calor.

El número de Nusselt es tal y como sigue:

$$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} \quad (36)$$

De tal manera que:

$$Nu = 0.683 * 484.2^{0.466} * 0.7477^{\frac{1}{3}} = 11.05$$

Finalmente aplicando la ecuación:

$$h_c = \frac{Nu * k}{D_S} \quad (37)$$

Siendo k la conductividad térmica del aire

$$\text{Por tanto, } h_c = \frac{11.05 * 0.02559}{0.01016} = 27.84 \frac{W}{m^2 K}$$

Es fácil observar de la ecuación (31) que la única variable aun desconocida es la temperatura superficial de la resistencia, siendo esta una temperatura que varía dependiendo de las condiciones a las que trabaje la resistencia, por esto se plantea un sistema de ecuaciones 3x3 donde la segunda ecuación es la siguiente:

$$Q_R = e\sigma A_S(T_R^4 - T_A^4) \quad (38)$$

e es la emisividad del material de la resistencia

σ la constante de Stefan-Boltzmann

cuyos valores son:

Tabla 13

Parámetros para calor de radiación

Emisividad acero AISI 304	0.2787	Adimensional
Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \cdot 10^{-8}$	W/m^2K^4

Y la tercera ecuación del sistema, que indica que la suma de los flujos de calor convectivo y de radiación corresponden a la potencia de la resistencia.

$$Q_C + Q_R = 1325 [W] \quad (39)$$

Las temperaturas de la resistencia y del aire se manejan en grados Kelvin, a favor de la consistencia en la ecuación (38)

La solución del sistema 3x3 obtiene como resultados

Tabla 14

Resultados sistema 3x3

T_R	886	K
Q_C	836	W
Q_R	489	W

Nota. Se puede analizar que el flujo de calor convectivo es mayor a la potencia calculada (815.7 W), por tanto, la resistencia seleccionada cumple con el FS de 1.1, además la temperatura de la resistencia que es de 612.85 °C es un valor razonable para una resistencia eléctrica.

4.2 construcción de prototipo de sistema de secado artificial de cacao a escala de laboratorio

Para lograr la ejecución del proyecto, primero se realizó el estudio a fondo para tener la información suficiente de la materia prima que se escogió (cacao) con la cual se estará trabajando

y/o manipulando. Tras indagar sobre las especificaciones y requisitos necesarios para su secado correcto, se hizo el diseño de la máquina. Se analizó todos los parámetros necesarios para poder lograr un secado de cacao exitoso con el menor tiempo posible y de manera segura. Luego se estudió la viabilidad, costo total, entre otros, para poder empezar a la construcción del proyecto, que sería la parte final.

En esta última etapa (construcción del prototipo), se cotizó el material para utilizar y localizar talleres con apoyo para mano de obra, herramientas y espacio de trabajo.

Para esta parte se utilizaron los materiales de la Tabla 15, que cuenta con la cotización total del proyecto.

Tabla 15

Presupuesto de proyecto y costo de prototipo

ANÁLISIS DE PRESUPUESTO						
Ítem	Unidad de medida	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Fuente de financiación	
					Institución	Otro
Talento humano						
Ingeniero Mecánico	Hora	50	\$ 14.000	\$ 700.000	\$ 700.000	
Director/Supervisor	Hora	10	\$ 390.000	\$ 3.900.000	\$ 3.900.000	
Mano de obra	Producción	N/A	\$ 300.000	\$ 300.000		\$ 300.000
Materiales						
Bastidor	Unidad	1	\$ 400.000	\$ 400.000		\$ 400.000
Resistencia	Unidad	1	\$ 178.411	\$ 178.411		\$ 178.411
Ventilador Industrial	Unidad	1	\$ 450.000	\$ 450.000		\$ 450.000
Relé	Unidad	1	\$ 15.000	\$ 15.000		\$ 15.000
Arduino uno	Unidad	1	\$ 40.000	\$ 40.000		\$ 40.000
Motorreductor 9V	Unidad	1	\$ 15.000	\$ 15.000		\$ 15.000
Sensor T/H	Unidad	1	\$ 38.000	\$ 38.000		\$ 38.000
Software						
SolidWorks	Licencia	1	\$7.500.000	\$ 7.500.000	\$ 7.500.000	
TOTAL					\$12.100.000	\$1.436.411

Nota. El precio final de venta se establece en \$1.500.000 COP.

El tiempo aproximado de construcción del prototipo fue de 3 meses, realizando las respectivas pruebas reales con la materia prima, programas, etcétera.

En estas pruebas, se utilizó la máquina completamente finalizada y gracias a ayudas tecnológicas como el software “Arduino IDE”, se logró crear un código para que conjunto al relé, la resistencia y el ventilador; se pueda lograr el objetivo que fue sostener la temperatura en un rango determinado (60-75°C). El código utilizado en el Arduino que controlará la temperatura es:

```
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 2      // Pin donde está conectado el sensor DHT
#define DHTTYPE DHT22 // Cambiar a DHT11 si usas ese modelo
#define RELAY_PIN 3   // Pin donde está conectado el relé

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Apaga el relé al inicio
}

void loop() {
  float temperature = dht.readTemperature();
  float humidity = dht.readHumidity();

  if (isnan(temperature) || isnan(humidity)) {
    Serial.println("Error al leer el sensor!");
    return;
  }

  Serial.print(temperature);
  Serial.print(",");
  Serial.println(humidity);

  if (temperature > 77) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Enciende el relé
  } else if (temperature < 75) {
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Apaga el relé
  }
}
```

```

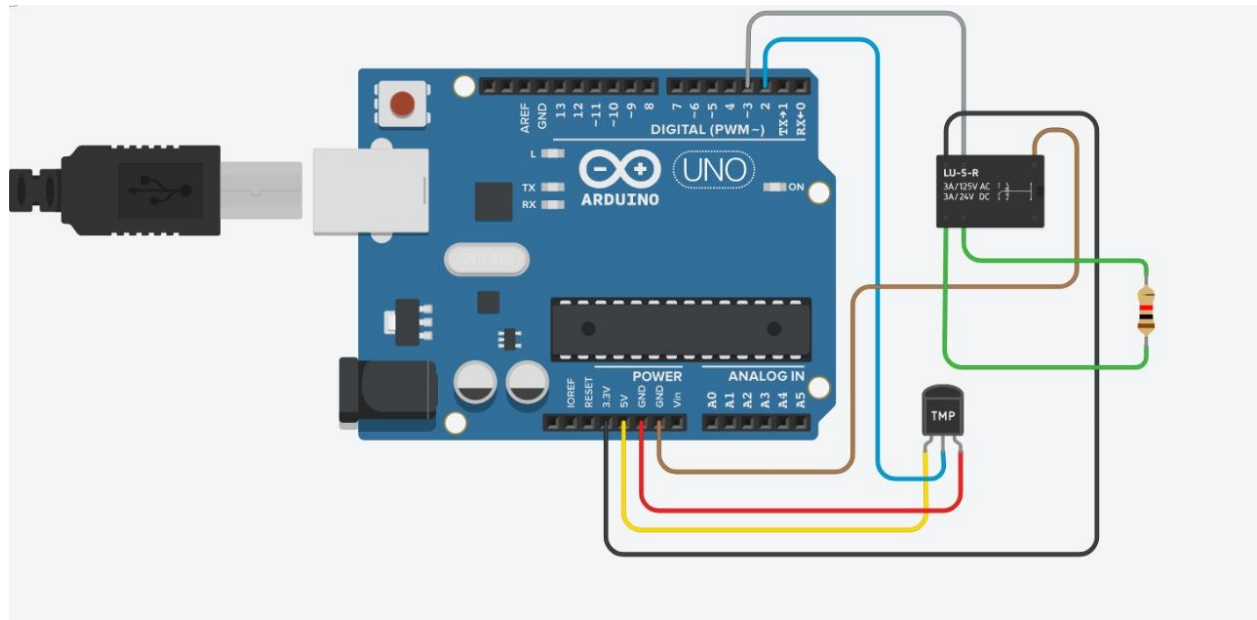
}
delay(5000); // Espera 5 segundos antes de la siguiente lectura
}

```

Una vez es montado el sistema de control que corresponde principalmente al Arduino, sensor de temperatura y humedad, un relé y una resistencia; tal y como describe la siguiente figura.

Figura 18

Conexiones Arduino

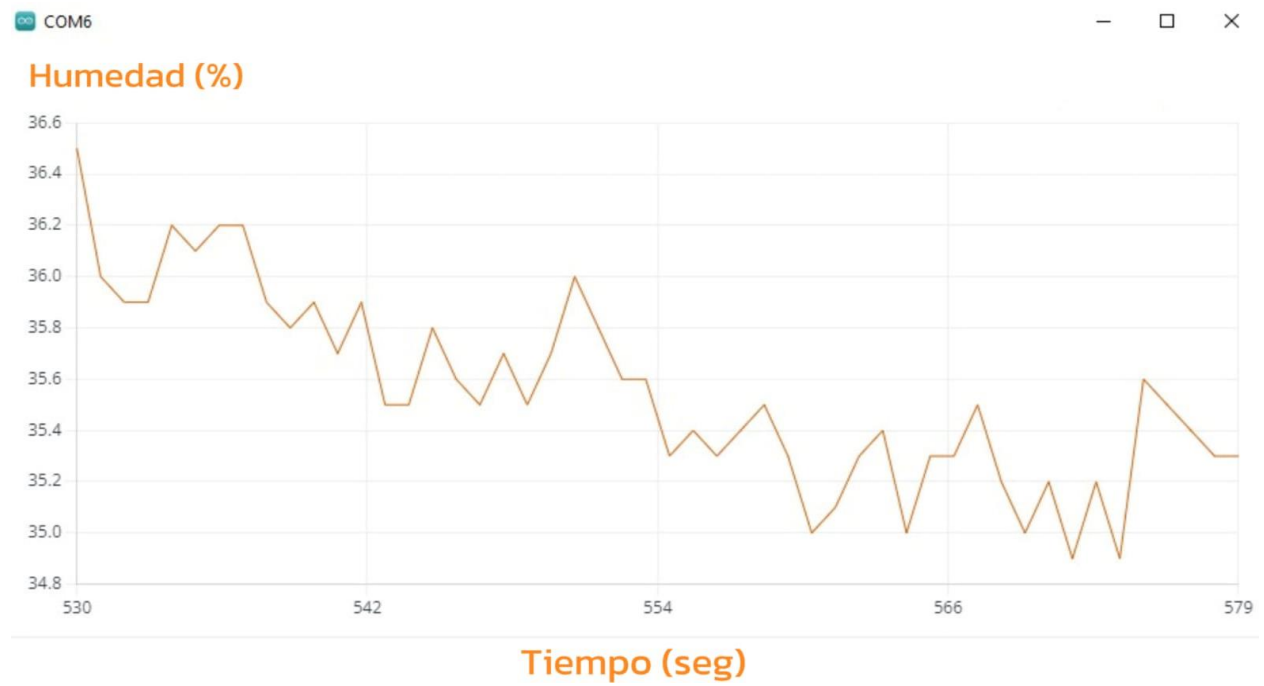


Se realiza una prueba piloto del prototipo funcional construido, de tal manera que se obtienen las siguientes graficas de operación. Cabe resaltar que los datos obtenidos y mostrados en las gráficas fueron tomados en tiempo real con el mismo programa “Arduino IDE”.

En las gráficas, en el eje Y, se evidencia la temperatura en grados centígrados y porcentaje de humedad respectivamente. En el eje X se muestra el tiempo en unidades de segundos.

Figura 19

Temperatura y humedad del aire respecto al tiempo



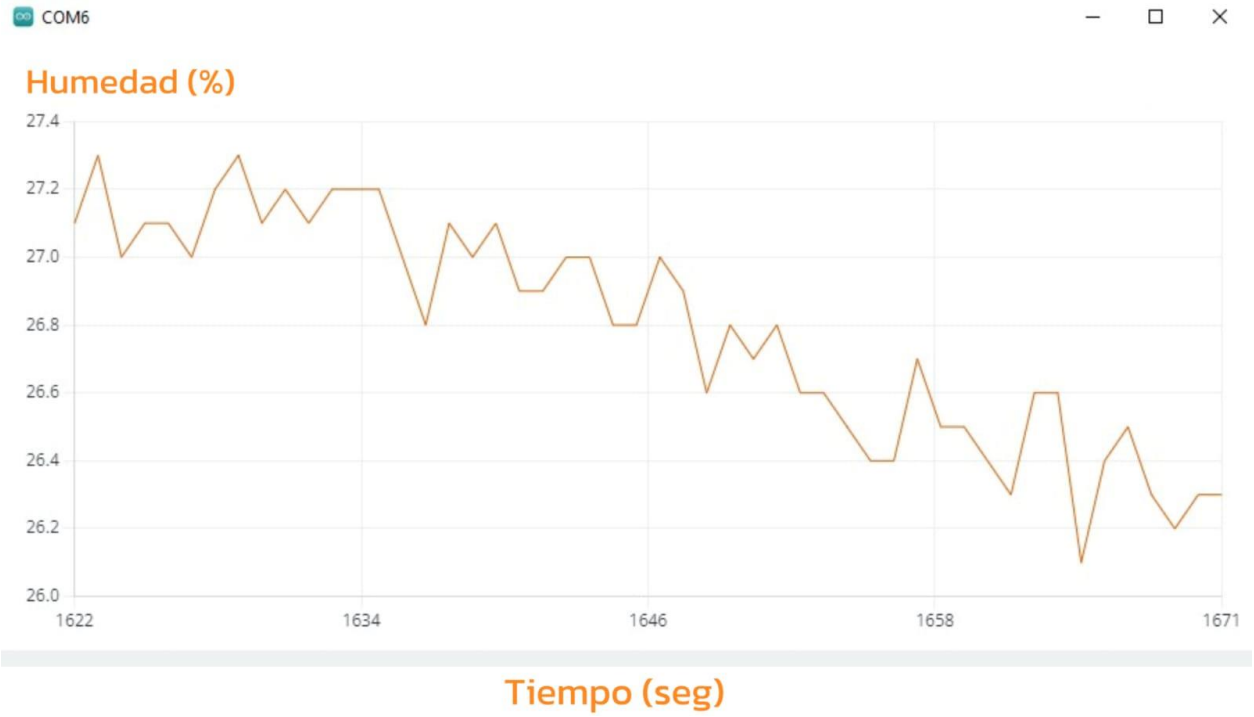
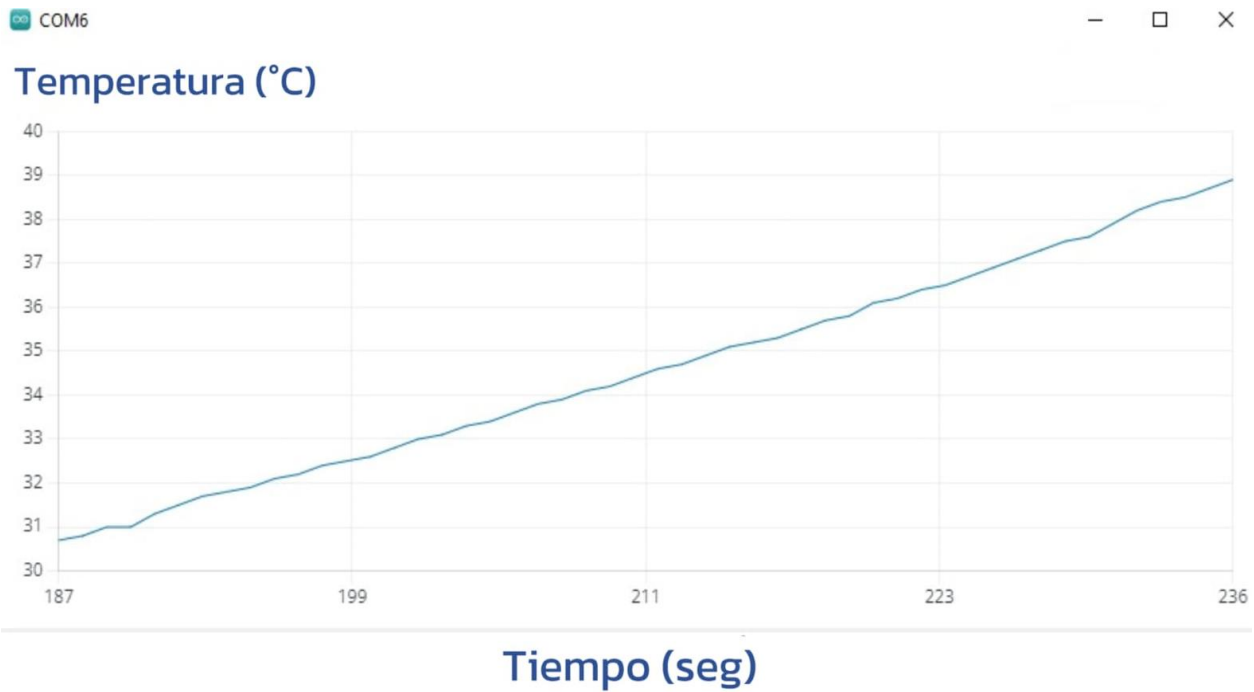
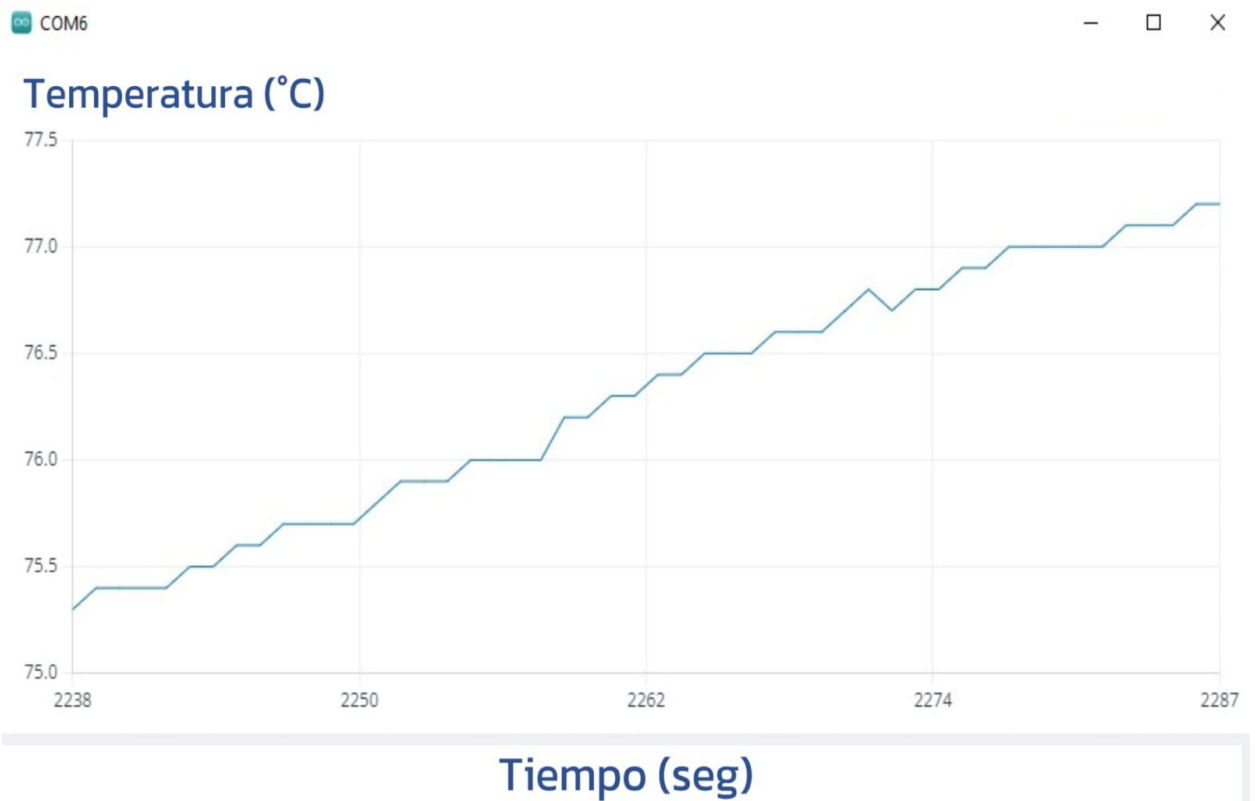


Figura 20

Temperatura del aire respecto al tiempo



Continuación- Figura 20



En las imágenes se puede apreciar el incremento de la temperatura y la disminución del porcentaje de humedad a medida que va pasando el tiempo.

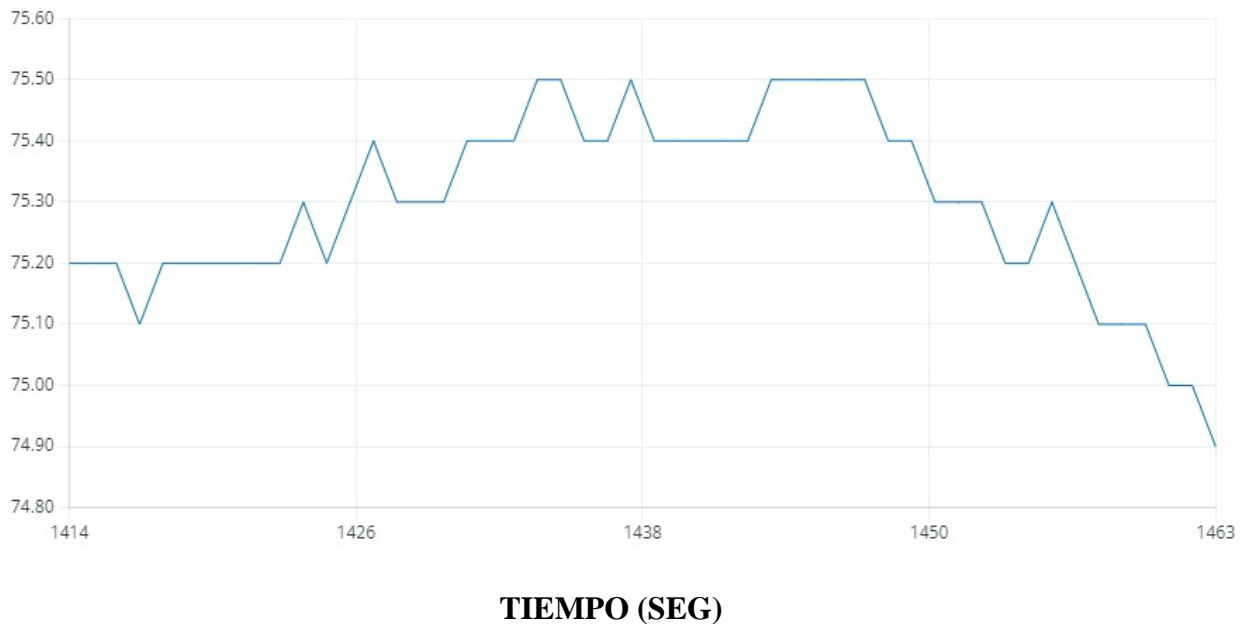
Se observó durante la prueba que, el tiempo de calentamiento (tiempo que toma hasta alcanzar el primer OFF de la resistencia) es aproximadamente de 1445 segundos, lo que es equivalente a 24 minutos con 5 segundos. Este tiempo es adicional al tiempo de secado, por lo tanto, el tiempo entre la carga y descarga del grano será realmente de 7697 segundos o 2 horas con 8 minutos y 17 segundos aproximadamente.

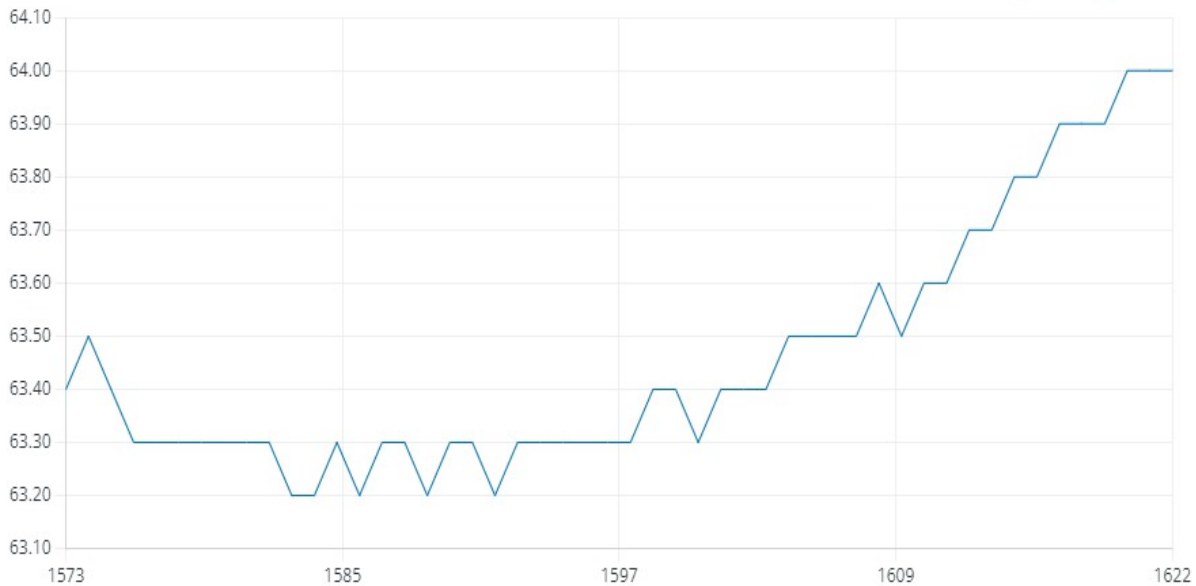
En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de la temperatura una vez ocurre el OFF en el sistema.

Figura 21

Temperatura del aire después del OFF

TEMPERATURA (°C)



TEMPERATURA (°C)**TIEMPO (SEG)**

La temperatura del aire alcanza un máximo de 75.5 °C, luego decae inercialmente hasta un mínimo de 63.2 °C. El sistema ON/OFF mantiene una ventana de aproximadamente 12°C durante el secado.

En el siguiente link se demuestra el funcionamiento de la máquina en un ciclo de secado:

<https://youtu.be/31dE21t2nEo>

Finalmente, para comprobar que el producto final alcanza un porcentaje de humedad cercano al 7%, se realiza una prueba de comparación entre el peso real del grano seco a la salida, y el peso teórico que debe tener el producto a un porcentaje de humedad de 7%, para lo cual se utiliza la ecuación (8):

$$m_{c_s} = \frac{m_c * (1 - \varphi_c)}{1 - 0.07} \quad (8)$$

Donde

m_{c_s} es la masa de cacao a la salida (a 7% de humedad)

m_c es la masa de cacao que se ingresa (a 55% de humedad)

Así, para la primera prueba se ingresan 225 g de cacao fermentado, por tanto

$$m_{c_s} = \frac{225 \text{ g} * (1 - 0.55)}{1 - 0.07} = 108,87 \text{ g}$$

El peso teórico del producto a la salida a un 7% de humedad debe ser de 108.87 gramos, como se puede ver en la siguiente figura la salida real fue de 109 gramos.

Por medio del peso de salida real y usando la ecuación (8) el porcentaje de humedad a la salida corresponde a:

$$\%h = \left(1 - \frac{225 \text{ g} * (1 - 0.55)}{109 \text{ g}}\right) = 7.11\%$$

Por tanto, cumple el estándar de entre 6% y 8%.

Figura 21

Diferencia de masas, ingreso y egreso (gramos).

Prueba 1



Prueba 2

Entrada

Salida



Prueba 3

Entrada

Salida



Realizando el proceso descrito anteriormente para las distintas pruebas realizadas, se aglomera los resultados en la siguiente tabla:

Peso Ingresado [g]	Peso de salida teórico [g]	Peso de salida real [g]	%humedad real de salida
225	108.87	109	7.11%
237	114.67	116	8.06%
262	126.77	123	4.146%

4.3 Estudio de viabilidad del sistema

Se busca el estudio económico de la inversión y su tasa de retorno de inversión para el comprador, tomando en cuenta costos de construcción (estimados) y ganancias al producto, como a su vez el costo de funcionamiento en valores mensuales a fin de determinar si la inversión es viable y en debido caso cual será la tasa interna de retorno-TIR.

Para ello es necesario estimar los materiales de construcción con su cotización de costos actuales en Bucaramanga, además del precio de la mano de obra justo y adecuado a los costos actuales. Por otra parte, el costo de funcionamiento es mayormente eléctrico, para lo cual se tiene de fácil manera el costo eléctrico suministrado por la electrificadora de Santander S.A-ESSA.

Un estudio de viabilidad puede variar según el uso y producción que se le dé a la máquina, para este caso se supone una producción de 4 cargas/días correspondientes a unas 8 horas de producción. Hay que considerar otros valores que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 16

Valores necesarios para estudio de viabilidad

Precio de cacao seco/kg	\$13.890,83	COP
Tarifa eléctrica estrato 1	383.53	\$/kWh
Costo de adquisición	\$1.500.000	COP
Inflación anual	12.75	%

Nota. Precios proporcionados por Fedecacao y ESSA, el precio de cacao es el promedio de los últimos 12 meses, se toma tarifa de estrato uno asumiendo el uso en sectores rurales.

Hay que conocer los ingresos y los egresos mensuales relacionados con el uso de la máquina. Iniciando por los ingresos que corresponden a la venta de cacao seco.

Por la suposición mencionada, se hacen 4 cargas diarias de 2 kg de cacao a 55 % humedad, se obtiene por carga 0,96777 kg de cacao a 7 % humedad; por tanto, diariamente se produce 3.8708 kg de cacao seco, en 30 días equivaldría a 116.124 kg mensuales.

Los ingresos de ventas entonces serían:

$$\text{Ingresos} = 116.124 \text{ kg} * \$13.890,83 = \$1.613.058,74 \text{ COP}$$

Los egresos corresponden principalmente al consumo eléctrico, el consumo eléctrico se resume en la siguiente tabla.

Tabla 17

Consumo de energía eléctrica

Equipo	Potencia [kW]	Horas operación	Energía [kWh]
Resistencia	1.325	240	240
Ventilador	0.18	240	43.2
Moto-reductor	0.145	240	34.8
Sistema de control	0.012	240	2.88
TOTAL	1.662	240	398.88

Sabiendo el valor de la tarifa eléctrica en Bucaramanga, el costo del consumo eléctrico corresponde a:

$$\text{Costo} = 398.88 \text{ kWh} * 383.53 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$152.982,45 \text{ COP}$$

Se asume además el costo de la materia prima que se ingresa, También durante el primer mes el costo de adquisición de la máquina corresponde a egresos.

El costo de la materia prima que se ingresa corresponde a 240 kg de cacao a un precio estimado de \$4.000 COP.

$$\text{Siendo así } \textit{Costo materia prima} = 240\text{kg} * 4.000 \frac{\$}{\text{kg}} = \$960.000 \textit{ COP}$$

Se procede a calcular la diferencia entre ingresos y egresos mensuales, para posteriormente calcular el valor presente por medio de la ecuación:

$$VP = VF / (1 + i)^n \quad (40)$$

Donde

VP es el valor presente

VF es el valor de la diferencia de cada mes

i es el porcentaje de inflación mensual

n es el número de mes correspondiente

El valor i se calcula a partir del porcentaje de inflación anual nominal de la Tabla 16 por medio de la ecuación:

$$i_m = (1 + i_A)^{\frac{1}{m}} - 1 \quad (41)$$

Donde

i_m es la inflación mensual

i_A es la inflación anual

m es el número de veces que cabe el periodo corto (meses) en el periodo largo (años)

Así

$$i_m = (1 + 0.1275)^{\frac{1}{12}} - 1 = 1.00504\%$$

Teniendo el valor de la inflación mensual es posible calcular el valor presente de cada mes y así el saldo mensual. El procedimiento realizado hasta ahora se puede observar en la siguiente tabla de cálculos:

Tabla 18

Cálculos del saldo a 8 meses

Meses	0	1	2	3	4
Unidades		116,124	116,124	116,124	116,124
Precio unitario		\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83
Ventas		\$1.613.058,74	\$1.613.058,74	\$1.613.058,74	\$1.613.058,74
Inv inicial	\$ 1.500.000				
Tarifa eléctrica		\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53
Energía de producción		398,88	398,88	398,88	398,88
Costo de producción		\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45
Gastos adicionales		\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00
Egresos totales	-\$1.500.000,00	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45
Diferencia	-\$1.500.000,00	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30
V presente	-\$1.500.000,00	\$ 495.100,34	\$ 490.173,89	\$ 485.296,47	\$ 480.467,58
Saldo	-\$1.500.000,00	-\$1.004.899,66	-\$ 514.725,77	-\$ 29.429,30	\$ 451.038,28

Tabla 18-Continuación

Meses	5	6	7	8
Unidades	116,124	116,124	116,124	116,124
Precio unitario	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83
Ventas	\$1.613.058,74	\$1.613.058,74	\$1.613.058,74	\$1.613.058,74
Inv inicial				
Tarifa eléctrica	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53
Energía de producción	398,88	398,88	398,88	398,88
Costo de producción	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45
Gastos adicionales	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00
Egresos totales	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45	\$1.112.982,45
Diferencia	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30
V presente	\$ 475.686,73	\$ 470.953,46	\$ 466.267,29	\$ 461.627,74
Saldo	\$ 926.725,01	\$ 1.397.678,48	\$1.863.945,77	\$2.325.573,51

Nota. Valores en pesos colombianos. Se puede observar que a partir del cuarto mes el saldo ya es positivo, por tanto, ya se ha recuperado la inversión.

0	1	2	3	4
	116,124	116,124	116,124	116,124
	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83
	\$ 1.613.058,74	\$ 1.613.058,74	\$ 1.613.058,74	\$ 1.613.058,74
\$ 1.500.000				
	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53
	398,88	398,88	398,88	398,88
	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45	\$ 152.982,45
	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00	\$ 960.000,00
-\$ 1.500.000,00	\$ 1.112.982,45	\$ 1.112.982,45	\$ 1.112.982,45	\$ 1.112.982,45
-\$ 1.500.000,00	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30	\$ 500.076,30

-\$	\$	\$	\$	
1.500.000,00	495.100,34	490.173,89	485.296,47	480.467
-\$	-\$	-\$	-\$	
1.500.000,00	1.004.899,66	514.725,77	29.429,30	451.038

A partir de la Tabla 18, y por medio de la hoja de cálculo, la tasa de retorno de inversión corresponde a:

TIR	28.99	%
------------	-------	---

En comparación se realiza un análisis de producción a la misma capacidad de carga (2kg de cacao húmedo), a fin de comparar el rendimiento, reflejado en el dinero adicional producido al final de los 8 meses.

Tabla 19

Saldo a 8 meses para secado natural

Meses	1	2	3	4
Unidades	5,8062	5,8062	5,8062	5,8062
Precio unitario	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83
ventas	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94
Inv. inicial				
Tarifa eléctrica	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53
Energía de producción	0	0	0	0
Costo de producción	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo materia prima	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00
Egresos totales	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00
Diferencia	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94
V presente	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94

saldo	\$ 32.652,94	\$ 65.305,87	\$ 97.958,81	\$130.611,75
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Tabla 19 -Continuación

Meses	5	6	7	8
Unidades	5,8062	5,8062	5,8062	5,8062
Precio unitario	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83	\$ 13.890,83
ventas	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94	\$ 80.652,94
Inv. inicial				
Tarifa eléctrica	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53	\$ 383,53
Energía de producción	0	0	0	0
Costo de producción	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo materia prima	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00
Egresos totales	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00	\$ 48.000,00
Diferencia	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94
V presente	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94	\$ 32.652,94
saldo	\$ 163.264,69	\$ 195.917,62	\$ 228.570,56	\$ 261.223,50

5. Conclusiones

Se ha obtenido finalmente un prototipo de máquina de secado de cacao, que usa una metodología de secado convectivo, el proceso de secado toma 1 hora y 47 minutos para llevar el cacao hasta la humedad establecida para los granos de cacao seco (7%), además de realizar el secado manteniendo los granos a una temperatura de $45^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ evitando la retención de ácidos y cumpliendo con estándares de calidad del producto final.

Se cumple también la finalidad de obtener una máquina de bajo costo, asegurando así el fácil acceso por parte de los pequeños productores de cacao, mejorando la industria del cacao y

derivadas de esta. Aportando al desarrollo industrial de la región por medio de opciones viables y económicas de secado artificial del cacao.

Se aporta una alternativa en el ámbito académico como base de diseño y mejora a futuros prototipos de soluciones de la agroindustria, para que el estudio académico en el sector siga evolucionando.

El prototipo ha alcanzado una alta viabilidad debido a los altos costos actuales del cacao, provocados por la baja producción e inestabilidad del mercado mundial. Siendo que el prototipo alcanza una tasa de retorno de inversión de 28.99%.

Recuperando para el cuarto mes la inversión de \$1.500.000 COP, empezando a generar ganancias mensuales por \$ 451.038,28 COP.

En comparación al secado natural (tiempo de secado de 5 días aproximadamente) y tomando en cuenta una cantidad igual de producción por secado o carga (2 kg de grano húmedo), el prototipo genera \$2.064.350,01 COP de ventas adicionales al final del octavo mes; correspondiente a casi 9 veces las ventas por secado natural.

6. Recomendaciones

Se pueden calcular el tiempo de secado para distintos kg de carga (teniendo en cuenta las limitaciones físicas), para obtener una curva de tiempo vs carga y definir el tamaño de la carga ideal para optimizar el uso del prototipo.

El diseño estructural puede cambiarse para tener forma cilíndrica, de forma que puede reducirse el precio por materiales de construcción.

Es posible realizar la creación de un manual operativo que incluya el procedimiento de uso, indicaciones de mantenimiento recomendado etc. Siempre enfocado en el entendimiento por parte del cliente y teniendo en cuenta su perfil.

Referencias Bibliográficas

Alfonso, J., & Parias, A. (s/f). *DISEÑO DE UN SECADOR CONVECTIVO PARA EL SECADO DEL GRANO DE CACAO Autor(es)*.

Andrade-Almeida, Rivera-García, Chire-Fajardo, Ureña-Peralta. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares.

Barbecho, A., & Juan, L. (2019). Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura. Cuenca: Universidad politécnica salesiana sede Cuenca.

Baskett, P. (2022). ICCO AUMENTA PRONÓSTICO DE DÉFICIT MUNDIAL DE CACAO 2021/2022. Obtenido de Bartalks: <https://bartalks.net/es/icco-aumenta-pronostico-para2021-2022-deficit-mundial-de-cacao/>

Castillo, A., & Pinto, O. (2019). Diseño de controlador PID para prototipo de máquina de secado de café y/o cacao para la empresa Penagos y hermanos. Bucaramanga: Universidad autónoma de Bucaramanga.

CENGEL - Transferencia de calor. (s/f).

De, C., Mecánica, I., Fabián, A., Guailas, B., Carlos, J., & Juca, L. (s/f). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE*

MÁQUINA HÍBRIDA DE SECADO DE GRANOS DE CACAO CON SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA” Autores.

ESSA. (2022). Tarifa de consumo de energía eléctrica. Obtenido de www.essa.com.co:
https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mifactura/tarifas/2022/Tarifa_ESSA_202212.pdf

Eugenio, J., & Ingeniero Agrícola Profesor, H. H. (s/f). *Determinacion de parametros.*

INCROPERA_-_Transferencia_de_calor. (s/f).

ISO. (1947). ISO/TC food products. Obtenido de ISO: <https://www.iso.org/committee/47858.html>

Issuu. (22 de Enero de 2014). Guía para el cultivo de cacao. Obtenido de Issuu:
<https://issuu.com/pnudcol/docs/cartilla-final/6>

Koua, B. K., Koffi, P. M. E., & Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 72–82.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.002>

Macmanus Chinenye, N., Ogunlowo, A. S., & Olukunle, O. J. (s/f). COCOA BEAN (Theobroma cacao L.) DRYING KINETICS. En *CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH* (Vol. 70, Número 4).

Martínez, P. (17 de Abril de 2018). Prototipo de secador solar optimiza secado de maíz, frijol y cacao. Obtenido de El campesino: <https://elcampesino.co/prototipo-de-secador-solaroptimiza-secado-de-maiz-frijol-y-cacao/>

Martínez-Méndez, E. J., Vázquez-Rodríguez, R., Torijano-Cabrera, E., & Hernández-Escoto, H. (2006). *SMALL LENGTH SCALE ANALYSIS OF THE HEAT TRANSPORT PROCESS IN A SEMI-POROUS REGION OF A GEOTHERMAL WELL* (Vol. 5).

- Maupoey, P. F., Grau, A., Sorolla, A., & Baviera, J. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente.
- Mercedes Naranjo-Vargas, E. I., Renato Moyano-Arévalo, J. I., Jazmín Zamora-Solorzano III, Y., & Fernando Balseca-Sampedro, O. I. (2021). *Optimización del tiempo de secado a través del diseño de una secadora de cacao con movimiento rotatorio Optimization of drying time through the design of a rotary movement cocoa dryer Otimização do tempo de secagem através do projeto de um secador de cacau de movimento rotativo Ciencias técnicas y aplicadas Artículos de investigación*. 6(5), 864–878. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i5.2714>
- Nogales, J. R. (Agosto de 2017). Metodos de secado de cacao. Obtenido de Blogspot.com: <https://poscosechacacao.blogspot.com/2017/08/metodos-de-secado-de-cacao.html>
- Ortiz Daniela, E., Rodriguez Jhon Alexander, B., Martínez Julián Marcelo, A., & Ruales Carlos Frank, H. (s/f). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR DE CACAO A PEQUEÑA ESCALA PARA DISMINUIR EL TIEMPO DE SECADO Y CONSERVAR LAS PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS EN EL CONSEJO COMUNITARIO LAS VARAS TUMACO (NARIÑO)*.
- Parra Rosero, P. (s/f). *Secado artificial de cacao. Estado del arte*. <http://www.anecacao.com/es/>
- Pumacahua-Ramos, Augusto, Vega-Loaiza, Angie Sharon, Gonzales-Sánchez, Rosibeth, Marconi-Quispe, Paco Wilson, & Carrión-Sánchez, Hilka Mariela. (2022). *Uso de sensores para modelamiento matemático durante el tostado de granos de cacao (Theobroma cacao) de la variedad Chuncho. Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(2), 84-93. Epub 16 de mayo de 2022. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2022.419>
- Rosero, P. P. (2017). Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara giratoria cilíndrica y flujo de aire caliente. Piura, Perú: Universidad de Piura.

SIRCA. (s.f.). SECADORA SIRCA CON INTERCAMBIADOR DE CALOR. Obtenido de sircaecuador.com: <https://sircaecuador.com/productos/secadora-sirca-conintercambiador-de-calor/>

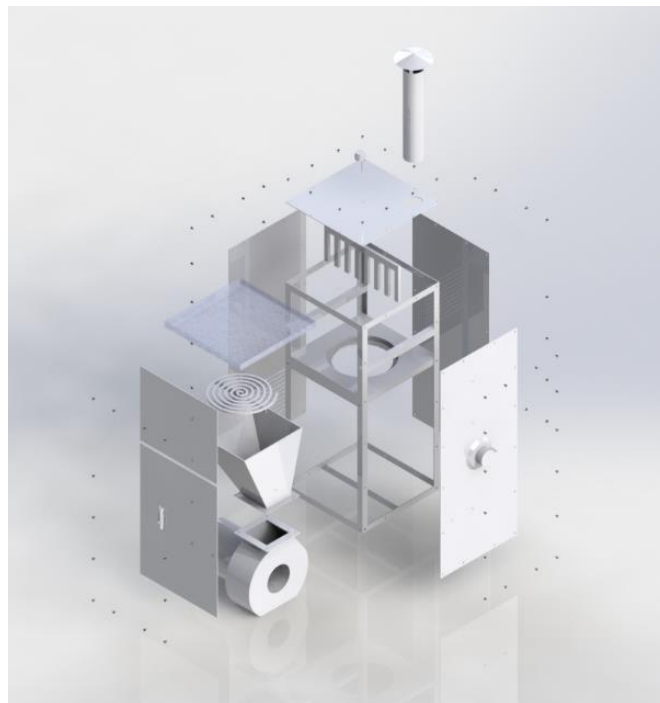
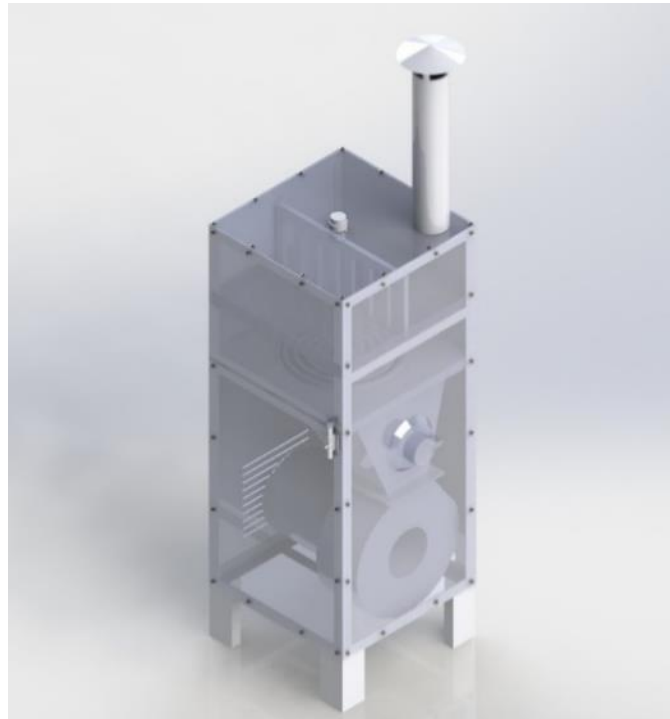
Umich.Mx. (s.f.). Ecuación de Bernoulli. Obtenido de Umich.Mx: <https://fim.umich.mx/teach/gsolorio/notas/PERDIDAS-1.pdf>

UPB. (5 de febrero de 2021). UPB Bucaramanga celebra cuarta patente de invención en menos de un año. Agencia de noticias UPB.

VULCANO TEC. (s.f.). Secadora de granos. Obtenido de vulcanotec.com: <https://vulcanotec.com/maquinaria/secadora-de-granos>

Anexos

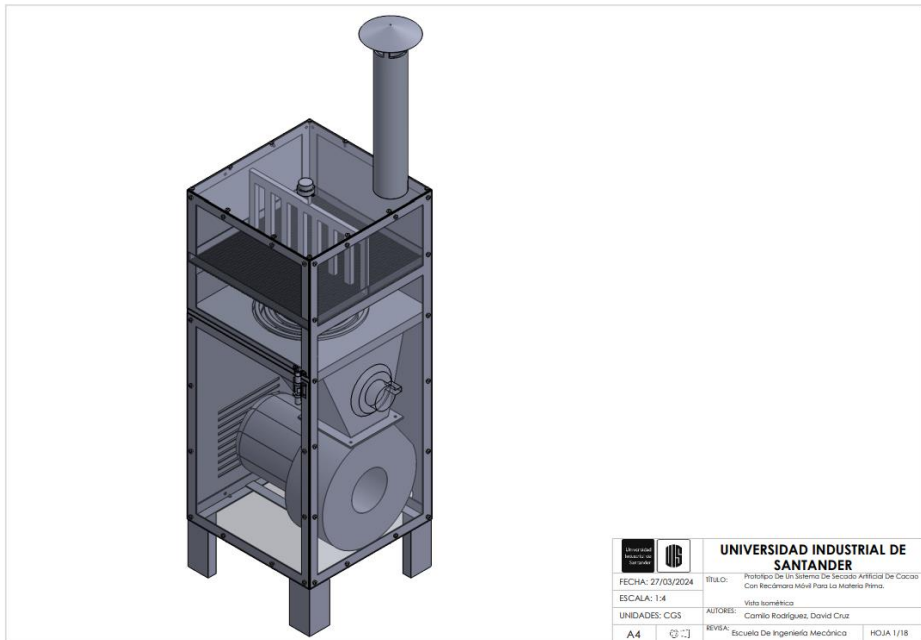
Renders CAD final.



Prototipo construcción física de secador de cacao.



Planos de Prototipo de un sistema de secado artificial de cacao con recámara móvil para la materia prima:



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

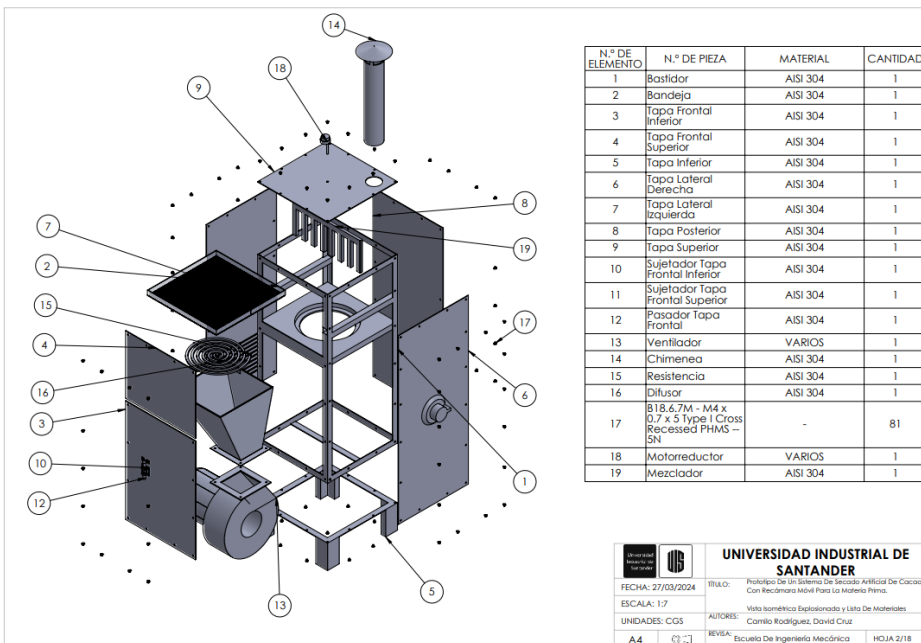
FECHA: 27/03/2024 TÍTULO: Prototipo De un Sistema De Secado Artificial De Cacao Con Recámara Móvil Para La Materia Prima.

ESCALA: 1:4 VISTA ISOMÉTRICA

UNIDADES: CGS AUTORES: Camilo Rodríguez, David Cruz

A4 REVISOR: Escuela De Ingeniería Mecánica HOJA 1/18

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Bastidor	AISI 304	1
2	Bandeja	AISI 304	1
3	Tapa Frontal Inferior	AISI 304	1
4	Tapa Frontal Superior	AISI 304	1
5	Tapa Inferior	AISI 304	1
6	Tapa Lateral Derecha	AISI 304	1
7	Tapa Lateral Izquierda	AISI 304	1
8	Tapa Posterior	AISI 304	1
9	Tapa Superior	AISI 304	1
10	Sujetador Tapa Frontal Inferior	AISI 304	1
11	Sujetador Tapa Frontal Superior	AISI 304	1
12	Posador Tapa Frontal	AISI 304	1
13	Ventilador	VARIOS	1
14	Chimenea	AISI 304	1
15	Resistencia	AISI 304	1
16	Difusor	AISI 304	1
17	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 5 Type I Cross Recessed PHMS - SN	-	81
18	Motoreductor	VARIOS	1
19	Mezclador	AISI 304	1

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

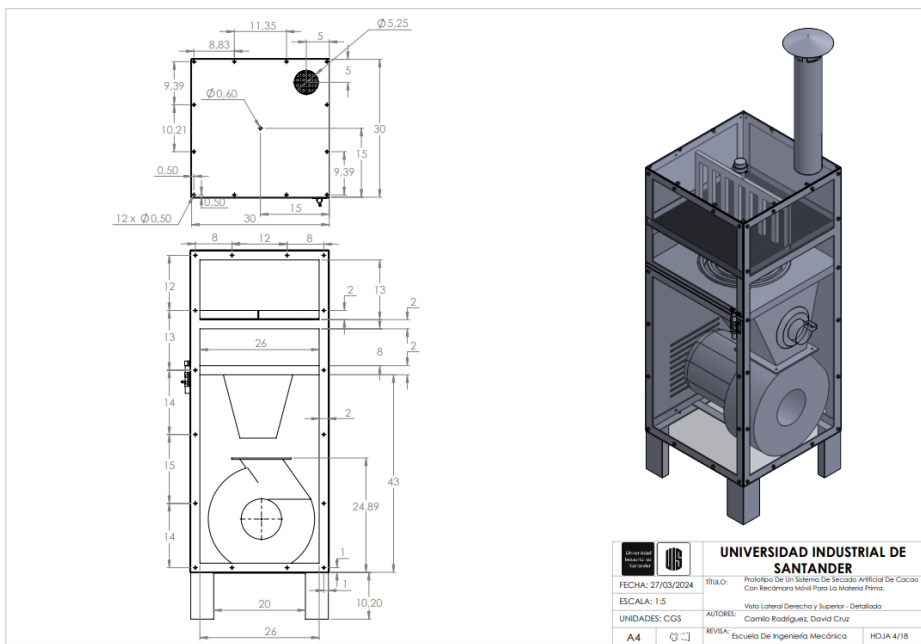
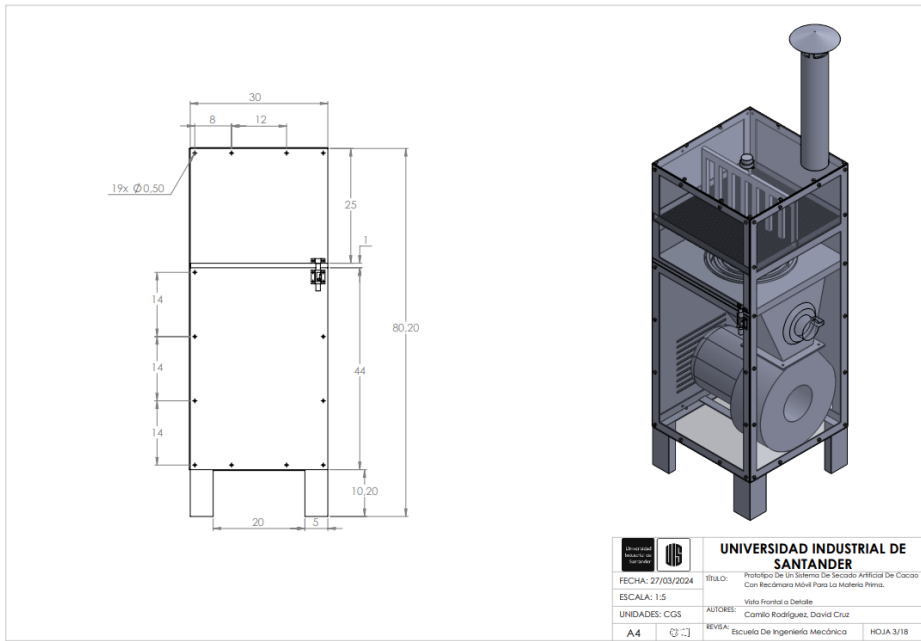
FECHA: 27/03/2024 TÍTULO: Prototipo De un Sistema De Secado Artificial De Cacao Con Recámara Móvil Para La Materia Prima.

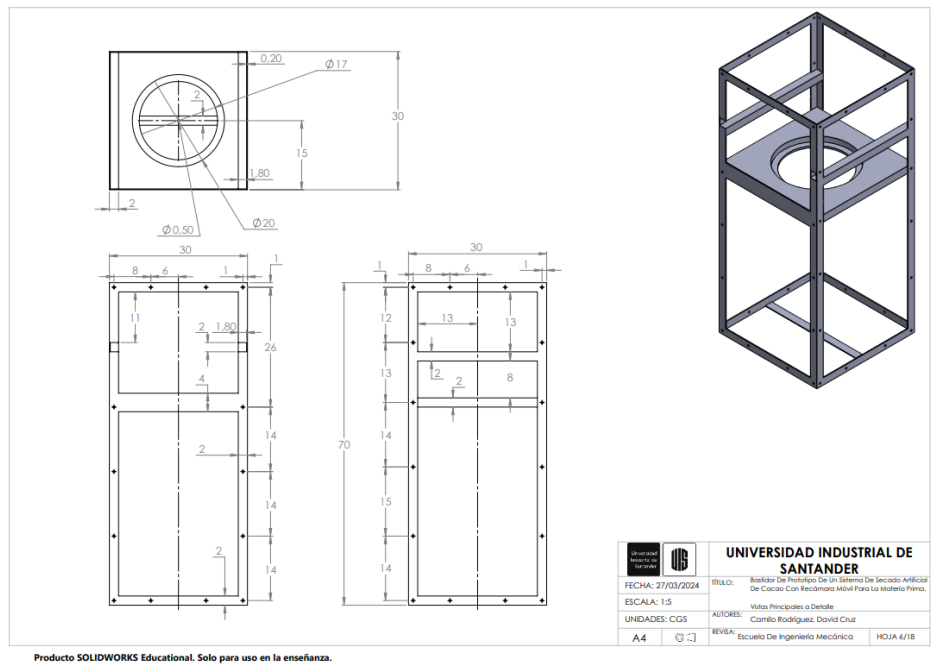
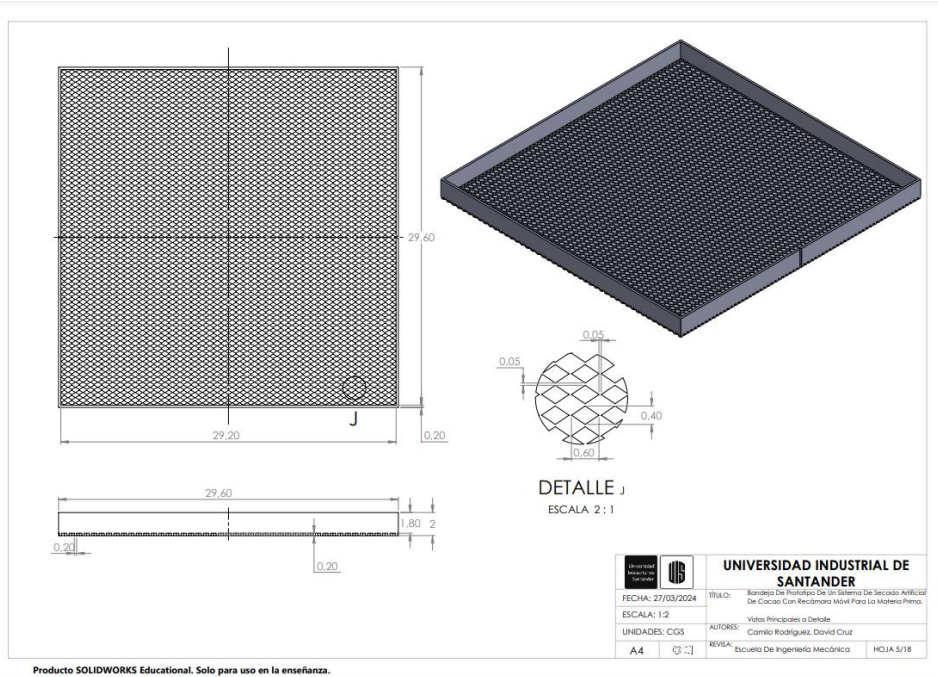
ESCALA: 1:7 VISTA ISOMÉTRICA Exploración y Lista De Materiales

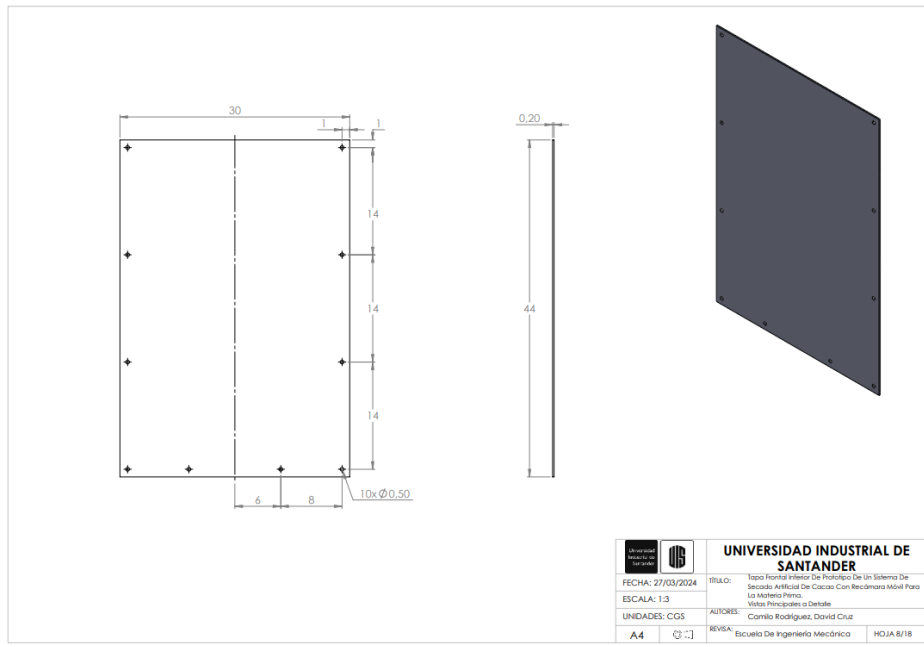
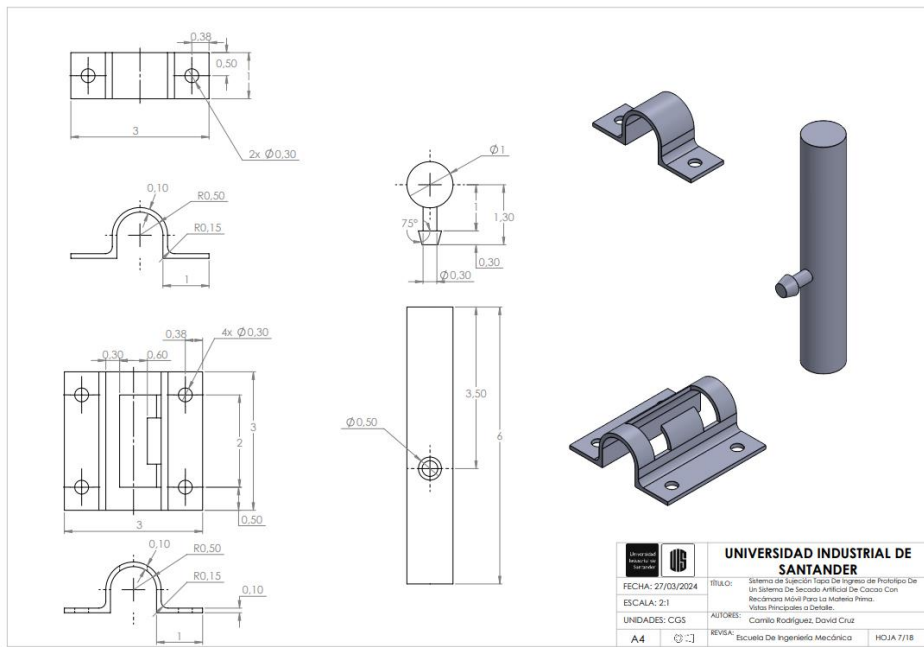
UNIDADES: CGS AUTORES: Camilo Rodríguez, David Cruz

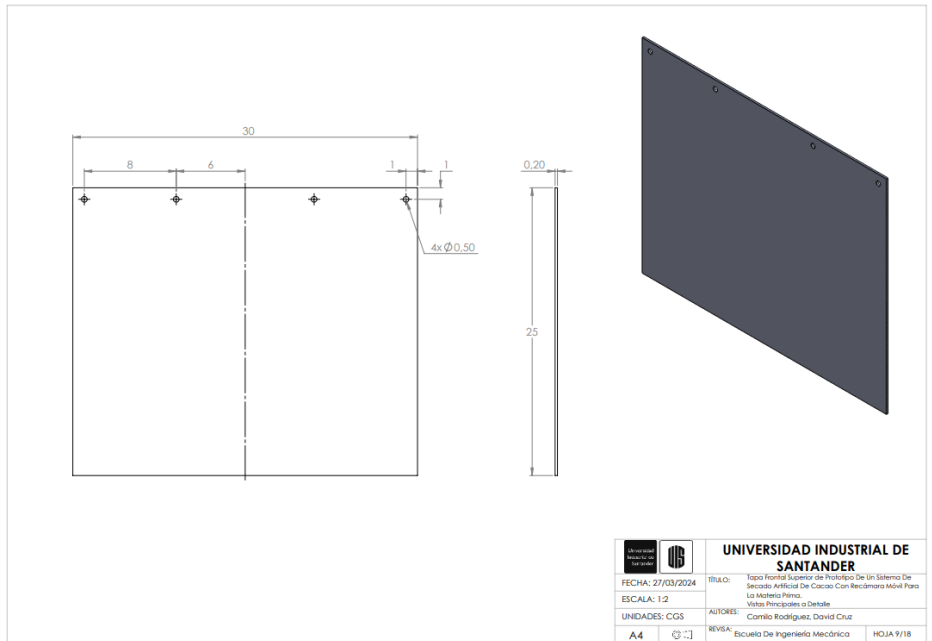
A4 REVISOR: Escuela De Ingeniería Mecánica HOJA 2/18

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

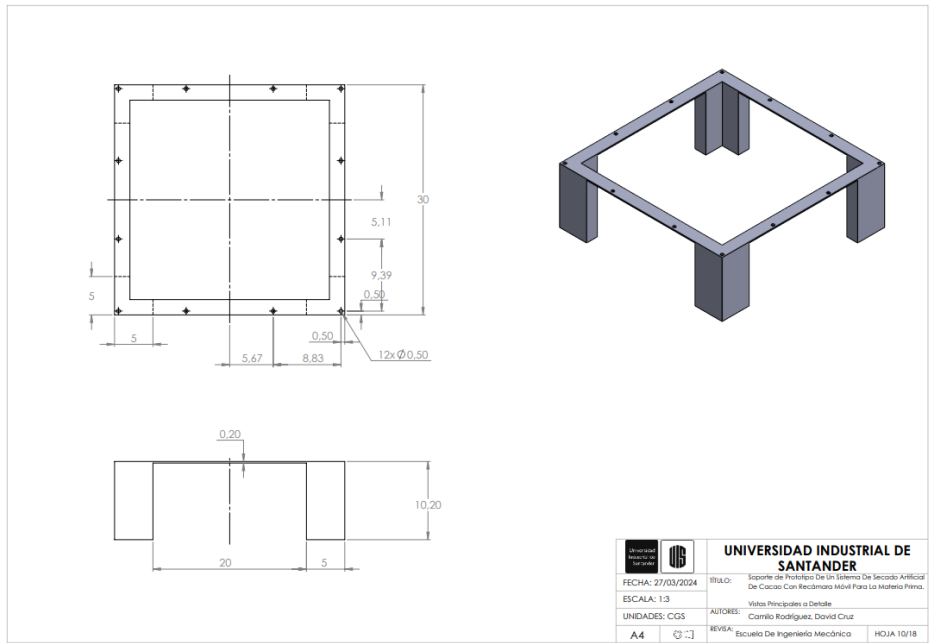




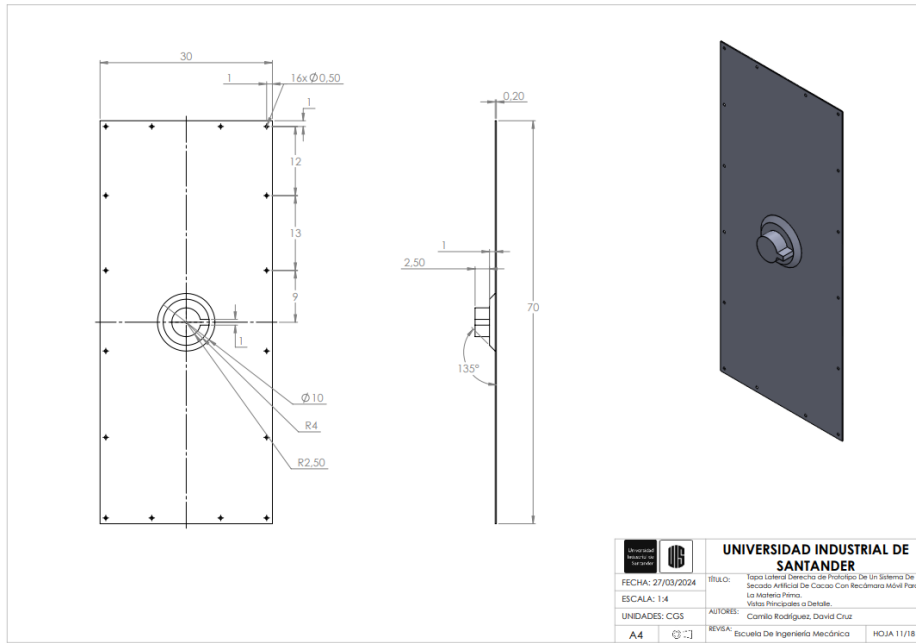




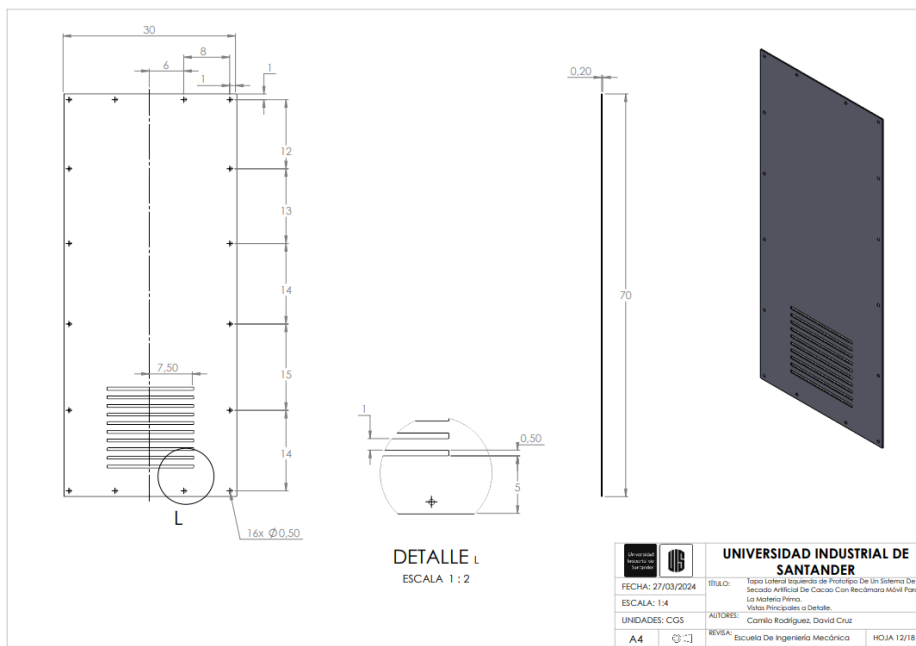
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



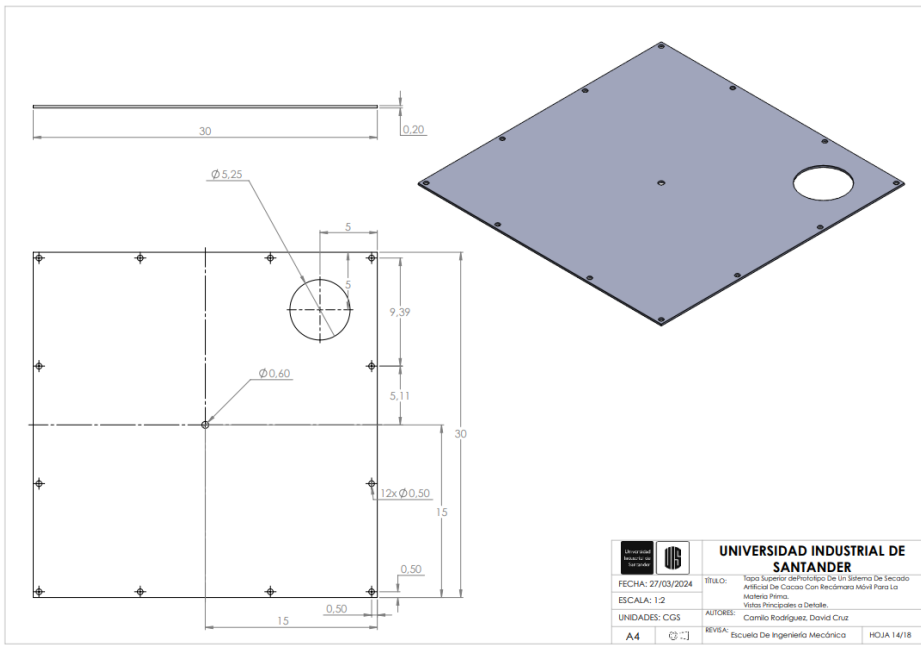
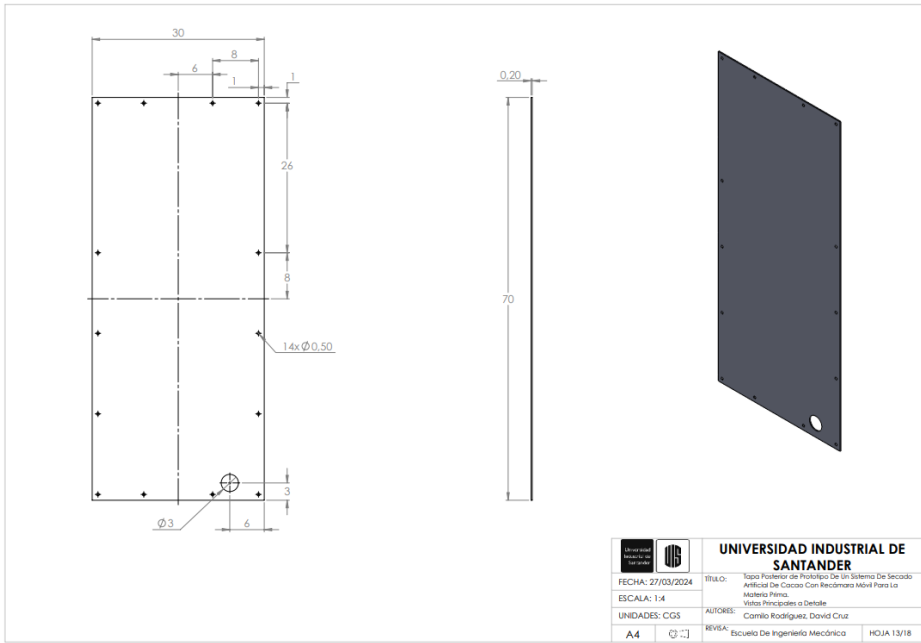
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

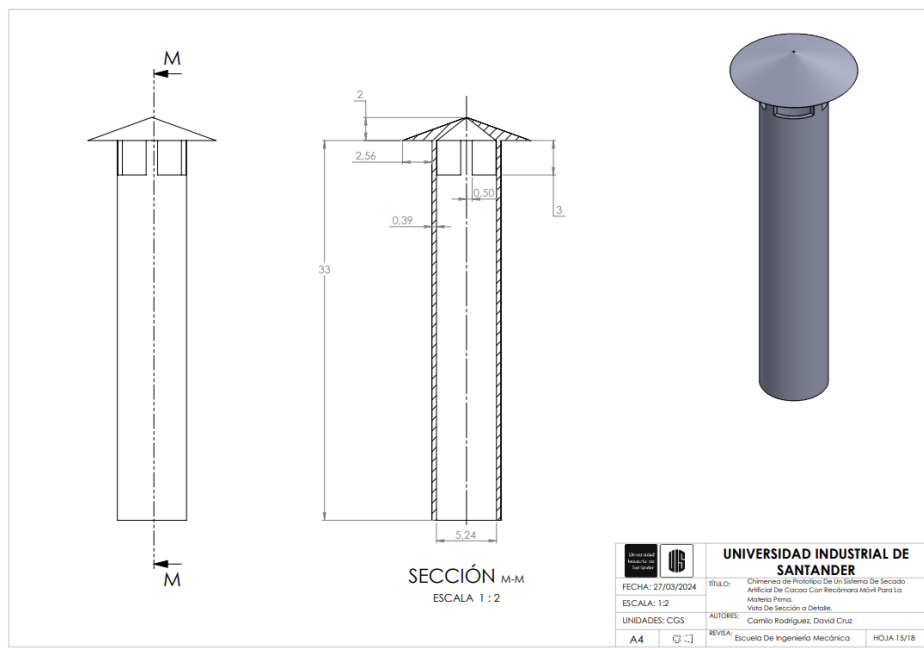
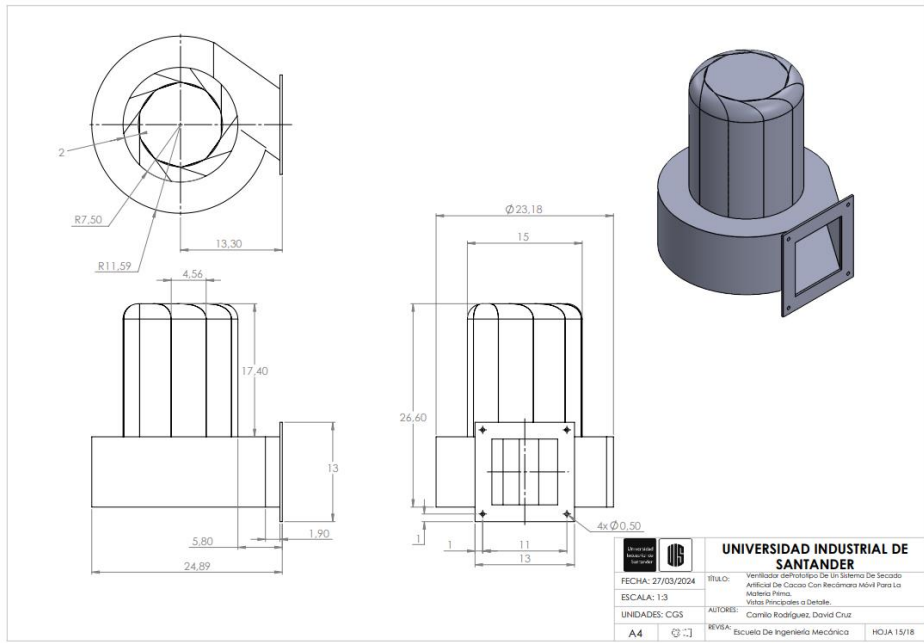


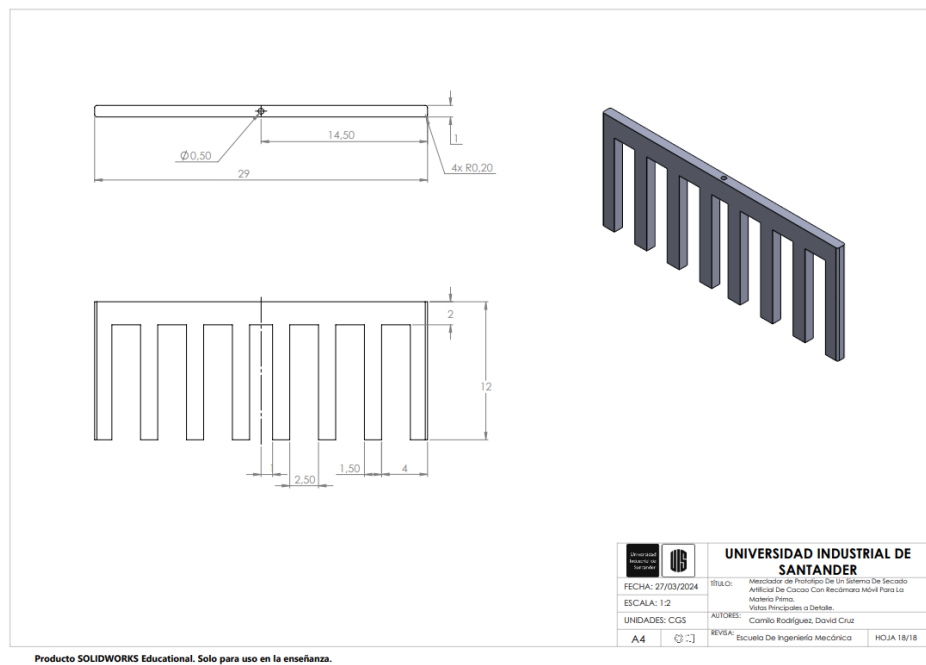
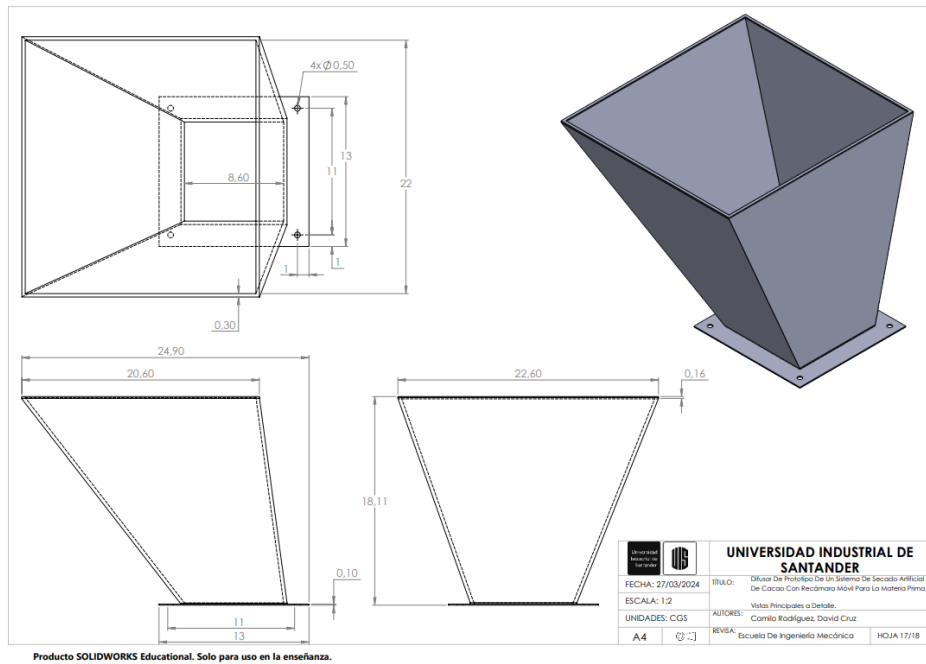
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.







En el siguiente link se puede apreciar un video del ensamblaje y funcionamiento de la máquina. <https://youtu.be/dJgIZXSGk9c>