

Diseño y Construcción de una Tostadora de Café a Leña para la Comunidad Rural no
Interconectada de la Vereda Suacia

Carlos Alexis Puerto Puerto, Miguel Ángel Siza Dueñas

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Juan Pablo Flórez Mera

PhD. En Ingeniería Mecánica

Codirector

PhD. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Con gran gratitud dedico a Dios primeramente por darme la bendición de poder cumplir un sueño anhelado desde niño, a mis padres Elda Dueñas Díaz Y José Miguel Siza Báez por todo el amor, esfuerzo y apoyo incondicional que día a día me brindan para lograr mis metas, gracias por encomendarme a Dios todos los días y confiar en mí.

A mis hermanos y hermanas gracias por todo el apoyo que me brindaron, en especial a mi hermano Idelfonso por ser ese segundo papá que siempre creyó en mí y en mis capacidades, este es el fruto de todos sus esfuerzos.

Agradezco a mi director de tesis, Ing. Juan Pablo Flores Mera, por la guía brindada a lo largo del proceso, su acompañamiento permanente y las observaciones que me compartió, las cuales aportaron de manera importante al desarrollo de este trabajo.

Miguel Ángel Siza Dueñas

A mi madre, Sonia Margareth Puerto Corredor, por su amor incondicional, por creer siempre en mí y sostenerme con sus oraciones. Su fe y apoyo fueron mi fortaleza en los momentos más difíciles de este camino.

A mi padre, a mis hermanas y hermano, a mi tío y tía de la familia Acosta Puerto, quienes de distintas formas me acompañaron, alentándome y recordándome siempre la importancia de seguir adelante.

A Ledis Dayana, quien llegó a mi vida en un momento inesperado pero necesario, y cuya presencia me dio inspiración, compañía y alegría, acompañando también un valioso crecimiento personal y emocional.

A mi amigo Luis Ángel Poveda, por su compañía sincera, sus palabras de aliento y su apoyo moral, que me despejaron en momentos de incertidumbre. A mi compañero de tesis, Miguel Ángel, con quien compartí largas jornadas de trabajo, aprendizajes y una amistad que valoro profundamente. Y a mi director de tesis, el profesor Juan Pablo, por su guía y dedicación, que marcaron la diferencia en la culminación de este proyecto.

Finalmente, a todas aquellas personas que, aunque no pueda nombrar una por una, dejaron huellas con sus gestos, palabras o acciones, y que de una u otra manera hicieron posible que este sueño se hiciera realidad.

Carlos Alexis Puerto Puerto

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Conceptos Básicos del Café.....	17
2.2.1 <i>El Café</i>	17
2.2.2 <i>Tipos de Café</i>	17
2.2.3 <i>Procesamiento</i>	17
2.3 Tueste	18
2.3.1 <i>Fases del Proceso de Tostado</i>	18
2.3.2 <i>Grados de Tueste del Café</i>	19
2.3.3 <i>Parámetros del Tostado</i>	20
2.4 Tipos de Tostadoras	20
3. Metodología	22
3.1 Enfoque del Proyecto	22
3.2 Selección Parámetros de Temperatura y Tiempo de Tostado.....	23
3.2.1 <i>Parámetros</i>	23
3.3 Caracterización de la Leña.....	24

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TOSTADORA DE CAFÉ	4
3.3.1 Selección del Tipo de Leña	24
3.4 Etapas del Desarrollo	25
3.4.1 Diseño Conceptual.....	25
3.4.1.1 Requerimientos del Sistema.....	25
3.4.1.2 Caja Negra del Proceso.....	26
3.4.1.3 Funciones del Equipo.....	26
3.4.1.4 Relación de Elementos en el Equipo	27
3.4.1.5 Matriz Morfológica.....	27
3.4.1.6 Evaluación de Alternativas.....	29
3.4.1.7.1 Criterios.....	29
3.4.1.8 Diseño Seleccionado.....	31
3.5 Cálculos.....	32
3.5.1 Diseño de la Cámara de Combustión	32
3.5.1.1 Estequiometría.....	32
3.5.1.2 Aislamiento Térmico.....	33
3.5.2 Diseño de la Cámara de Cocción.....	36
3.5.3 Selección Sistema de Transmisión de Potencia.....	38
3.5.3.1 Longitud de la Cadena.....	38
3.6 Dimensionamiento del Eje.....	39
3.7 Selección de Otros Componentes	41
3.7.1 Chumacera.....	41
4. Resultados.....	41
4.1 Parámetros Temperatura y Tiempo.....	41

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TOSTADORA DE CAFÉ	5
4.2 Cámara de Combustión.....	44
4.2.1 Estequiometria.....	44
4.2.2 Aislamiento Térmico.....	49
4.3 Cámara de Cocción.....	52
4.3.1 Dimensiones Mínimas de Cámara de Cocción.....	52
4.3.2 Balance de Energía Cámara de Cocción.....	52
4.3.3 Transferencia de Calor.....	53
4.3.4 Cálculo de Masa de Leña.....	55
4.4 Trasmisión de Potencia.....	56
4.4.1 Selección de los Componentes.....	56
4.4.2 Longitud de la Cadena.....	58
4.5 Dimensionamiento del Eje.....	59
4.6 Selección de Otros Componentes.....	68
4.6.1 Chumacera.....	68
4.7 Construcción y Ensamble.....	70
5. Discusión de Resultados.....	74
6. Costos de Diseño y Construcción.....	79
7. Conclusiones.....	81
8. Recomendaciones.....	82
Referencias.....	83
Apéndices.....	86

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Principios básicos en la tecnología moderna de tostado</i>	21
Tabla 2. <i>Matriz morfológica</i>	27
Tabla 3. <i>Criterios de evaluación de las alternativas</i>	29
Tabla 4. <i>Matriz de decisión de alternativas</i>	30
Tabla 5 <i>Recopilación de resultados obtenidos en referentes</i>	42
Tabla 6 <i>Caracterización de la madera</i>	44
Tabla 7. <i>Recopilación de resultados</i>	47
Tabla 8. <i>Resultados transferencia de calor entre llama y cámara de cocción</i>	55
Tabla 9. <i>Componentes del sistema de transmisión de potencia</i>	57
Tabla 10. <i>Propiedades mecánicas acero 304</i>	65
Tabla 11, <i>Selección de chumacera Timken</i>	70
Tabla 12. <i>Proceso de construcción y ensamblaje</i>	71
Tabla 13. <i>Registro de tiempo y temperatura en pruebas</i>	74
Tabla 14. <i>Costos de materiales y fabricación</i>	79

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Curva de tueste</i>	19
Figura 2. <i>Escala Agtron</i>	20
Figura 3. <i>Caja negra del proceso</i>	26
Figura 4. <i>Relación de elementos en el equipo</i>	27
Figura 5 <i>Modelo del diseño seleccionado</i>	31
Figura 6 <i>Reacción en cámara de combustión</i>	32
Figura 7. <i>Aislante del equipo</i>	34
Figura 8. <i>Modelo de resistencias en el aislante</i>	34
Figura 9. <i>Distribución de fuerzas sobre el eje</i>	40
Figura 10. <i>Balace de energía en superficie externa del equipo</i>	49
Figura 11. <i>Conductividad térmica lana de roca</i>	50
Figura 12. <i>Valores térmicos calculados en aislamiento</i>	51
Figura 13. <i>Modelo de resistencias térmicas desde llama hasta granos de café.</i>	53
Figura 14. <i>Modelo de elementos en contacto con eje</i>	59
Figura 15. <i>Distribución de elementos en contacto con eje</i>	60
Figura 16. <i>DCL del eje</i>	60
Figura 17. <i>Fuerzas y reacciones sobre el sprocket</i>	61
Figura 18. <i>Fuerza ejercida por el sprocket al eje</i>	62
Figura 19. <i>Distribución de la carga sobre el eje en plano XY</i>	62
Figura 20. <i>Diagramas cortante y flector</i>	63

Figura 21. <i>Fuerzas del eje en plano XZ</i>	63
Figura 22. <i>Diagramas de cortante y momento flector</i>	64
Figura 23. <i>Codificación chumaceras Timken</i>	69
Figura 24. <i>Montaje del equipo para pruebas.</i>	74
Figura 25. <i>Grafica temperatura vs tiempo en pruebas</i>	76
Figura 26- <i>Termómetro bimetálico instalado</i>	76
Figura 27. <i>Nivel de tueste final y muestras tomadas durante el proceso</i>	77
Figura 28. <i>Consumo de leña</i>	78
Figura 29. <i>Equipo en operación</i>	78

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Tablas de propiedades de gases ideales.</i>	86
Apéndice B. <i>Caracterización de la madera</i>	91
Apéndice C. <i>Propiedades del agua saturada.</i>	92
Apéndice D. <i>Valores de K, longitud de cadena</i>	93
Apéndice E. <i>Factor de superficie</i>	94
Apéndice F. <i>Factor de temperatura</i>	95
Apéndice G. <i>Factor de confiabilidad</i>	96
Apéndice H. <i>Factor de esfuerzos varios</i>	97
Apéndice I. <i>Planos</i>	98

Resumen

Título: Diseño y construcción de una tostadora de café a leña para la comunidad rural no interconectada de la vereda Suacia*

Autores: Carlos Alexis Puerto Puerto y Miguel Angel Siza Dueñas**

Palabras Clave: Tostado, Transferencia de calor, cámara de cocción, leña

Descripción:

Este proyecto se desarrolla el diseño y construcción de una tostadora de café con capacidad de 2 kg, pensada principalmente para comunidades rurales donde el acceso a servicios públicos es limitado especialmente la energía eléctrica. Como punto de partida, se realizó una revisión bibliográfica que permitió definir los parámetros de tiempo y temperatura necesarios para lograr un tostado adecuado de 2 kilogramos de café. La máquina emplea la leña de encenillo como fuente de energía en la cámara de combustión y cuenta con un sistema de transmisión mecánica mediante cadena y sprockets, similar al de una bicicleta, que se encarga de hacer girar el tambor. Para el diseño se tuvieron en cuenta los principios de transferencia de calor entre las cámaras de combustión y cocción, lo que permitió calcular el consumo de leña y establecer las dimensiones mínimas de la cámara de cocción. Asimismo, se consideraron criterios de resistencia de materiales y selección de componentes mecánicos. Como resultado, se obtuvo una máquina funcional, validada a través de pruebas de tostado, capaz de realizar el proceso de manera controlada, eficiente y accesible, reduciendo el tiempo de tostado y la exposición al calor de la persona que lo realiza.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Programa académico. Director: Juan Pablo Flórez Mera. PhD. Codirector: Jabid Eduardo Quiroga Méndez PhD

Abstract

Title: Design and Construction of a Wood-Fired Coffee Roaster for the Non-Interconnected Rural Community of Suacia*

Author(s): Carlos Alexis Puerto Puerto and Miguel Angel Siza Dueñas**

Key Words: Roasting, Heat transfer, Roasting chamber, Firewood

Description

This project focuses on the design and construction of a coffee roaster with a 2 kg capacity, mainly intended for rural communities where access to public services, particularly electricity is limited. As a starting point, a bibliographic review was carried out to define the time and temperature parameters required to achieve an adequate roast of 2 kilograms of coffee. The machine uses encenillo firewood as the energy source in the combustion chamber and incorporates a mechanical transmission system with a chain and sprockets, similar to a bicycle, which drives the rotation of the drum. The design was based on heat transfer principles between the combustion and roasting chambers, which made it possible to calculate firewood consumption and establish the minimum dimensions of the roasting chamber. In addition, criteria of material strength and mechanical component selection were considered. As a result, a functional machine was obtained, validated through roasting tests, capable of carrying out the process in a controlled, efficient, and accessible manner, while reducing roasting time and the operator's exposure to heat.

* Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic Program. Director: Juan Pablo Flórez Mera, PhD. Co-Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez PhD

Introducción

El café es un cultivo de gran relevancia en la economía global, destacándose por su alta demanda en diversos mercados (Despistecafé, 2022). Su producción se concentra principalmente en países de la franja ecuatorial, donde las condiciones climáticas favorecen su desarrollo (Cafestes, 2022). En este contexto, Colombia se ha consolidado como un actor clave en la industria cafetera mundial, con una producción significativa que abarca aproximadamente 590 municipios y una extensión cultivada cercana a los 11 millones de hectáreas dedicadas a este grano (Gómez Posada, 2018).

Dentro de la cadena de valor del café, el proceso de tostado representa una etapa fundamental, ya que determina las características organolépticas del producto final, como su aroma, sabor y color (Club del Café, 2023). Durante este proceso, los granos de café verde son sometidos a altas temperaturas, lo que provoca diversas transformaciones físicas y químicas, como la caramelización de azúcares y la formación de compuestos aromáticos. Estas reacciones influyen en el desarrollo del perfil sensorial del café tostado, generando una variedad de matices que pueden ir desde notas frutales y florales hasta sabores más intensos y achocolatados (Cafestes, 2022).

En muchas regiones cafetaleras, especialmente en zonas rurales, el acceso a tecnología avanzada para el tostado es limitado debido a restricciones económicas y a la falta de infraestructura eléctrica. Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas accesibles y sostenibles que permitan a pequeños productores mejorar la calidad de su café sin depender de equipos industriales de alto costo (Noesis, 2021).

Esta tesis se centra en el diseño y construcción de una tostadora de café con capacidad de 2 kg, que emplea leña como fuente de calor y utiliza un mecanismo de tracción mecánica humana

para su funcionamiento. La elección de estos principios responde a la necesidad de proporcionar una solución eficiente y adaptable a comunidades con recursos limitados.

El objetivo de este equipo es optimizar el proceso de tostado mediante un sistema que garantice una distribución uniforme del calor y un mecanismo de agitación que asegure la homogeneidad del tostado. Asimismo, el diseño prioriza el uso de materiales accesibles y de fácil mantenimiento, lo que permite su implementación y operación en entornos rurales con mínimas necesidades de infraestructura.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar y construir una tostadora de café con sistema de combustión de leña y una capacidad de 2 Kg de grano para operar en entornos rurales con recursos energéticos limitados movido por tracción humana en la comunidad de la vereda Suacia.

1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar los parámetros requeridos de temperatura y tiempo del proceso térmico necesario para lograr el tostado de café.

Analizar la transferencia de calor desde la cámara de combustión hacia la cámara de cocción empleando modelos analíticos para definir el consumo de leña y asegurar el tostado de los 2 Kg de café.

Desarrollar un proceso de diseño integral que abarque desde la fase conceptual hasta la construcción, siguiendo un enfoque sistemático que incluya el diseño conceptual, los cálculos de los componentes de la tostadora y la selección de materiales.

Realizar la construcción y ensamblaje de la tostadora de acuerdo con el diseño establecido

2. Marco Teórico

Este capítulo aborda los conceptos clave para el desarrollo del presente trabajo de investigación. En primer lugar, se presentan los antecedentes y diversos trabajos relacionados con el diseño y la fabricación de tostadoras de café. Posteriormente, se introduce una base conceptual mediante definiciones y parámetros importantes sobre el tostado del café y equipos utilizados, destacando factores importantes como el tiempo y la temperatura para obtener un café de excelente calidad.

2.1 Antecedentes

A lo largo del tiempo, la tecnología empleada en el proceso del tostado del café ha evolucionado desde métodos básicos hasta sistemas automatizados de alta eficiencia. Diversos estudios y proyectos han analizado y desarrollado mejoras en los equipos y técnicas utilizadas en este proceso, optimizando la calidad del producto final y la eficiencia del proceso.

Como en el trabajo "Influencia del perfil de tostado del café en la calidad en taza para una tostadora de 2 kg" (De la Cruz, 2018). Donde realizó un estudio sobre la influencia del perfil de tostado en la calidad sensorial del café, esto empleando una tostadora de 2 kg. La investigación destacó la importancia del control de variables como la temperatura, el tiempo de exposición al calor y la velocidad del flujo de aire, determinando que variaciones en estos parámetros pueden afectar significativamente el sabor, el aroma y la acidez del café. Se identificó que temperaturas superiores a 220°C y tiempos de tostado de 12 a 15 minutos mejoran los atributos sensoriales del café Arábica.

Siguiendo esta línea de investigación, otro estudio relevante es el "Diseño y construcción de una tostadora de café semiautomática con una capacidad de 8 kg" (Tituana, 2023). En el cual

se diseñó y construyó una tostadora semiautomática con capacidad de 8 kg. El proyecto se centró en la implementación de un sistema de control automático para regular la temperatura y la velocidad de rotación del tambor. Además, incluyó sensores de humedad para evitar la sobrecocción del grano, lo que mejoró la eficiencia del proceso y la homogeneidad del producto final. La temperatura óptima identificada fue de 175 °C inicialmente, hasta los 195 °C, con un tiempo de tostado de aproximadamente 8 minutos para un nivel de tueste medio.

Por otro lado, en el proyecto "Diseño de una planta de café tostado y molido" Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC, 2015), se enfoca en el diseño de una planta de café tostado y molido, analizando las técnicas utilizadas en el proceso y las propiedades físico-químicas del grano. El estudio incluyó pruebas de laboratorio para evaluar la degradación de compuestos volátiles durante el tostado y su impacto en la calidad sensorial del café. Se trabajó con café Arábica y se determinó que temperaturas entre 180°C y 210°C preservaban mejor los compuestos aromáticos.

En un enfoque más amplio, la Universidad Nacional de Colombia (UNAL, 2017) realizó el estudio "Estudio de la influencia del método de tosti3n en la calidad sensorial del café", comparando el tostado por tambor y por aire caliente. Se determinó que el aire caliente ofrecía mayor uniformidad y resaltaba mejor las cualidades sensoriales del café, con temperaturas óptimas entre 185°C y 205°C y tiempos de tostado de 10 a 13 minutos.

Finalmente, un estudio publicado en CORE (2012) titulado "Propuesta de automatización del proceso de tostación de café", exploró distintos métodos de tostado, concluyendo que la automatización mejora la eficiencia y la repetibilidad del proceso, reduciendo el margen de error en la producción.

Estos estudios reflejan la constante evolución tecnológica del tostado de café, estacando la

importancia de la innovación en la mejora de la calidad y eficiencia del proceso.

2.2 Conceptos Básicos del Café

2.2.1 El Café

El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo y proviene de los granos de las especies del género *Coffea*. Su cultivo se ha expandido globalmente, con América Latina, África y Asia como principales regiones productoras. El café es apreciado por su contenido de cafeína y su complejidad aromática, la cual se desarrolla a través de su proceso de cultivo, cosecha, secado y tostado (Pendergrast, 2010).

2.2.2 Tipos de Café

Existen diversas variedades de café, pero las dos especies más comercializadas son:

- *Coffea arábica*: Representa aproximadamente el 60-70% de la producción mundial. Se cultiva a altitudes y posee un perfil sensorial complejo con notas dulces y afrutadas.
- *Coffea canephora* (Robusta): Se cultiva a altitudes más bajas, tiene un mayor contenido de cafeína y un sabor más amargo y terroso, lo que lo hace ideal para mezclas y cafés instantáneos (Illy & Viani, 2005).

Además, existen cafés diferenciados según su origen, métodos de procesamiento y clasificación en categorías como café de especialidad, orgánico y comercial (Mussatto et al., 2011).

2.2.3 Procesamiento

El procesamiento del café es clave para preservar su calidad y desarrollar su perfil de sabor. El más usado es el método húmedo (Lavado). Este método es ampliamente utilizado en cafés de especialidad debido a su capacidad de resaltar la acidez y la claridad de la bebida final. El proceso comienza con el despulpado, en el que se retira la cáscara exterior del grano mediante máquinas despulpadoras. Posteriormente, los granos son sometidos a un proceso de fermentación en agua,

que puede durar entre 12 y 48 horas dependiendo de temperatura ambiente y condiciones del café.

Durante esta etapa, las enzimas naturales descomponen el mucílago restante en el grano, facilitando su remoción. Después de la fermentación, los granos son lavados con agua limpia para eliminar cualquier residuo de mucílago y luego se secan al sol en camas africanas o en secadoras mecánicas hasta alcanzar una humedad de aproximadamente 10-12%. Este proceso genera cafés con un perfil sensorial limpio, brillante y con notas afrutadas o florales (Wintgens, 2004).

Cada proceso influye en el desarrollo de compuestos aromáticos y en la calidad del café final, lo que lo convierte en una variable determinante para la industria del café.

2.3 Tueste

El tueste del café consiste en la adición de calor a los granos de café verde, transformándolos en un producto frágil y fácil de moler, desde donde se prepara la bebida de café (infusión en agua). Este proceso se hace para intensificar los aromas del café y facilitar su disolución en agua.

Al someter los granos al calentamiento durante un tiempo específico, se desencadenan reacciones físicas y químicas que modifican sus propiedades originales, formando nuevos compuestos. Durante esta transformación, el grano pierde humedad, aumenta su tamaño y adquiere un nuevo color CEFA (2020, p. 5).

2.3.1 Fases del Proceso de Tostado

Fase de secado (endotérmica): El grano pierde agua, cambia de color de verde a amarillo, aumenta de volumen y comienza a emitir aromas similares al pan horneado.

Fase de caramelización (exotérmica): Los azúcares se funden, el grano aumenta su tamaño, se vuelve de color café claro y pierde cerca del 5% de su peso.

Fase de transición térmica (primer crack): A medida que la temperatura aumenta, el agua

dentro del grano comienza a evaporarse, generando una presión interna. Esto provoca que el grano se agriete, produciendo un sonido característico, muy parecido al de una palomita de maíz al reventar.

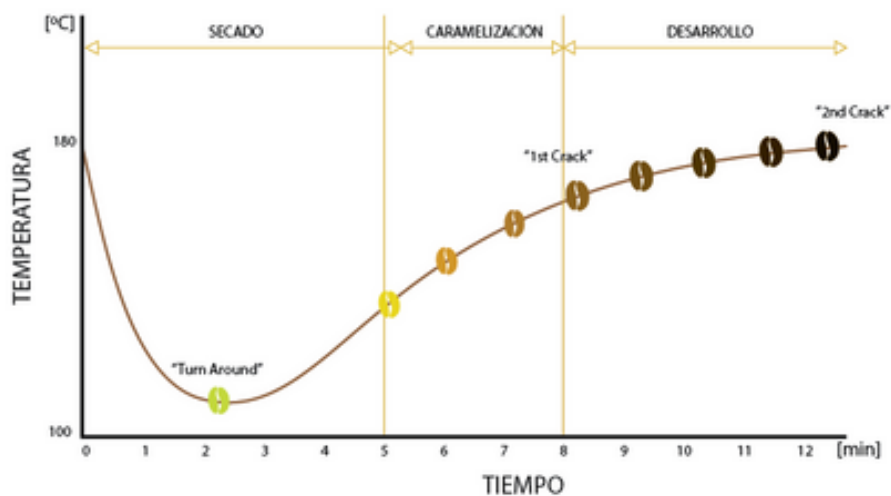
Fase de desarrollo: El grano continúa adquiriendo un tono café medio, perdiendo un 13% de su peso y emitiendo gases como el CO₂, acompañado por un segundo "crack".

Fase de enfriamiento: Las células del grano se cristalizan, sellando aromas y sabores.

Fase de desgasificación: El grano libera lentamente los gases generados, principalmente dióxido de carbono, en los días posteriores al tueste. CEFA (2020, p. 7)

Figura 1.

Curva de tueste



Nota. Tomado de Heymycoffee. (2025). *Tostado de café de especialidad*. (<https://heymycoffee.com/pages/tostado-de-cafe-de-especialidad>)

2.3.2 Grados de Tueste del Café

La Asociación Americana de Cafés Especiales (SCAA) ha desarrollado un sistema de puntuación para evaluar el color de distintos niveles de tueste en el café. El color exterior de los granos de café cambia desde un tono claro hasta un marrón oscuro en función del grado de tueste,

este color se determina evaluando la reflexión de la luz sobre los granos o mediante inspección visual directa.

La escala tiene un rango desde 95 donde el tostado es el más claro hasta 25 donde el tostado es el más oscuro (Saballos 2018, p. 21).

Figura 2.

Escala Agtron



Nota. CEFA. (2020). *Sistema de puntos para clasificar el grado - color - de diferentes tipos de tostado.* Manual básico del catador de café V5.

2.3.3 Parámetros del Tostado

El proceso de tostado del café depende de varios parámetros críticos que afectan su calidad final. Entre los más importantes se encuentran:

Temperatura de tostado: Generalmente oscila entre 180°C y 230°C, dependiendo del tipo de tueste y el perfil de sabor deseado (Illy & Viani, 2005).

Tiempo de tostado: Varía entre 8 y 15 minutos, influenciando la caramelización de azúcares y la degradación de ácidos orgánicos (Clarke & Macrae, 1988).

Curva de tostado: Define la relación entre temperatura y tiempo para lograr un desarrollo uniforme del café y evitar defectos como el subdesarrollo o sobrecalentamiento (Wintgens, 2004).

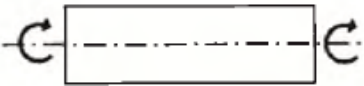
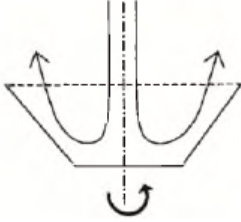
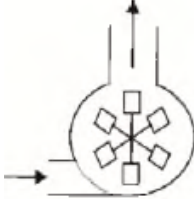
2.4 Tipos de Tostadoras

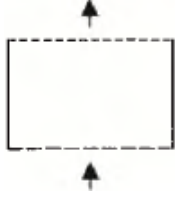
Para llevar a cabo este proceso, se han desarrollado distintos tipos de tostadoras, cada una

con un mecanismo específico para aplicar calor de manera uniforme. La elección de la tostadora depende de factores como la capacidad de producción, la eficiencia térmica y el perfil de sabor deseado en el café final. A continuación, se presentan los principales tipos de tostadoras utilizadas en la industria y sus características.

Tabla 1.

Principios básicos en la tecnología moderna de tostado

Tipo	Principio	Características
Cilindro rotativo <i>(Rotating cylinder)</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal/Vertical. • Con/Sin pared perforadas. • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Calentamiento indirecto por las paredes del cilindro. • Operación por lotes. • Operación continua por el transporte interno. • Temperatura del aire: 400 a 500 °C. • Tiempos de tostado: 8,5 a 20 min.
Tazón (Bowl)		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Operación continua a través de la corriente del aire; efecto rotativo. • Temperatura del aire: 480 a 550 °C. • Tiempos de tostado: 3 a 6 min.
Tambor fijo <i>(Fixed drum)</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Operación por lotes.

		<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del aire: 400 a 450 °C. • Tiempo de tostado: 3 a 6 min.
Lecho fluidizado <i>(Fluidized bed)</i>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo de aire. • Operación por lotes. • Temperaturas del aire: 240 a 270 °C. • Tiempo de tostado: 5 min.

Nota. Principales tipos de tostadoras en el mercado y sus características. Adaptado de *Espresso coffee: The science of quality* por *Illy & Viani, 2005*.

3. Metodología

3.1 Enfoque del Proyecto

En este proyecto se desarrolla el diseño y construcción de una tostadora de café con una capacidad de 2 kg, utilizando biomasa (leña) como fuente de calor y un sistema de tracción humana. Este diseño busca ofrecer una alternativa accesible para pequeños productores de café, de comunidades aisladas donde la principal fuente energética se basa en los residuos vegetales proporcionados por el entorno. Un ejemplo de estas comunidades es la vereda Suacia, perteneciente al municipio de Labranzagrande, ubicado al este del departamento de Boyacá, en Colombia.

Para ello, se aplicará la dinámica de mecanismos, principios termodinámicos y de transferencia de calor, con el fin de dirigir correctamente la fuerza ejercida por la persona que opere la máquina, a la vez que se disminuye el consumo de leña y se protege la integridad del usuario.

3.2 Selección Parámetros de Temperatura y Tiempo de Tostado

La temperatura y el tiempo son parámetros clave en el proceso de tostado, ya que determinan la formación de compuestos aromáticos y la percepción sensorial del café. Un ajuste adecuado de estos parámetros permite lograr un tostado uniforme, resaltando las particularidades de cada variedad de grano. Si la temperatura no es la apropiada, pueden generar sabores indeseados o incluso afectar la estructura química del café. Asimismo, un tiempo de tostado demasiado corto puede resultar en un café con una acidez pronunciada, mientras que un tiempo excesivo puede generar notas amargas y una pérdida de atributos esenciales (Illy & Viani, 2005).

Teniendo en cuenta la importancia de estos factores en la calidad del café, se han revisado diversas investigaciones para identificar aquellas que mejor se alinean con las condiciones del entorno a emplear la tostadora.

3.2.1 Parámetros

Durante la revisión bibliográfica, se recopilarán y analizarán diversos estudios con el objetivo de facilitar la selección de los parámetros óptimos para el proceso de tostado. Para ello, se extrajeran los siguientes datos clave:

- Título del trabajo
- País de origen
- Tipo de café
- Temperatura de tostado
- Tiempo de tostado
- Grado de tueste
- Tipo de tostadora empleada

Estos datos serán seleccionados con el propósito de identificar cuáles parámetros se alinean

mejor con las condiciones y requerimientos específicos del presente proyecto, permitiendo una fundamentación sólida en la definición del proceso térmico de la tostadora.

3.3 Caracterización de la Leña

En esta etapa, se realiza una revisión bibliográfica, que junto con el conocimiento de uno de los autores se establecen los tipos de madera que se encuentran en la región, la cual se caracteriza por una diversidad de ecosistemas que incluyen bosques andinos y de niebla. En estos bosques predominan especies arbóreas que han sido utilizadas tradicionalmente como fuente energética debido a sus propiedades combustibles, resistencia y disponibilidad. Entre ellas, el yarumo (*Cecropia sp.*) es una de las especies más utilizadas, ya que su rápido crecimiento permite un aprovechamiento sostenible sin afectar significativamente la cobertura forestal. Así mismo, el encenillo (*Weinmannia rollotii*) y el arboloco (*smallanthus pyramidalis*) son valorados por su madera densa y buena capacidad calórica, lo que los hace ideales para la combustión en sistemas tradicionales (Carreño 2021).

Esto se realiza con el objetivo de seleccionar el tipo de madera que se va a emplear en el proceso de tostado del café, así como determinar el consumo.

3.3.1 Selección del Tipo de Leña

La selección se realiza en función de la mayor cantidad de madera disponible en la zona y su poder calorífico.

3.4 Etapas del Desarrollo

3.4.1 *Diseño Conceptual*

3.4.1.1 Requerimientos del Sistema. Con base en la experiencia de uno de los autores, comentarios informales de personas pertenecientes a la comunidad de Suacia, costumbres de la población y los recursos disponibles para el desarrollo del proyecto, se han determinado algunos parámetros básicos que se listan a continuación.

- Capacidad de carga de café verde: 2 kg
- Nivel de tueste: Oscuro
- Mecanismo de tracción: Humana
- Combustible: Leña

Teniendo estos requerimientos básicos se determinan los requerimientos técnicos para cumplirlos. Adicionalmente, se establece que de los tipos de tostadoras expuestos en la tabla 1, la de cilindro rotatorio es la más adecuada para cumplir con los requerimientos básicos.

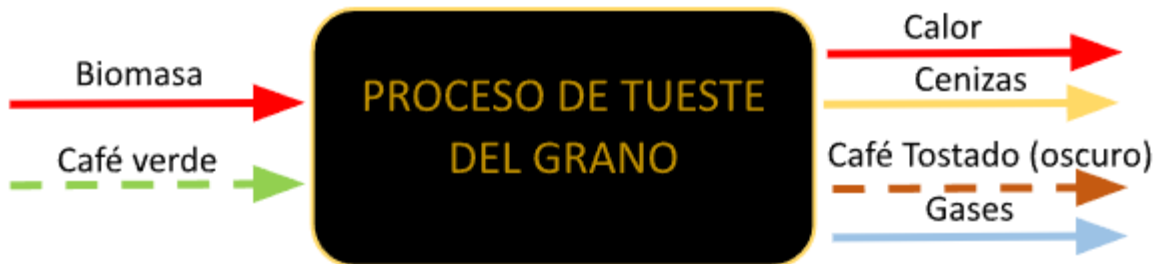
Partiendo de la capacidad de procesamiento, se calcularán las dimensiones requeridas para el tambor y a su vez el resto del equipo. Estos cálculos se presentarán en capítulos posteriores.

En cuanto a la terminación o nivel de tueste, en esta comunidad se acostumbra a dejarlo en un nivel oscuro y basándose en la teoría de los niveles de tueste, explicada en la sección 3 del marco teórico, el tueste se debe terminar cuando los granos de café lleguen a un nivel de 35 o 25 en la escala Agrón.

3.4.1.2 Caja Negra del Proceso

Figura 3.

Caja negra del proceso



3.4.1.3 Funciones del Equipo. Para garantizar un diseño económico y funcional, se utilizará una metodología basada en la identificación y descomposición de las funciones del equipo, seguida de una exploración de alternativas y evaluación de opciones. A continuación, se establecen las funciones secundarias que debe cumplir el equipo, así como lo que se debe hacer para cumplirlas:

Girar el tambor: Diseñar un mecanismo de accionamiento manual, ergonómico que permita un giro continuo.

Permitir el ingreso y salida del café: Diseñar un sistema de carga y descarga del grano.

Revisar el nivel de tueste durante el proceso: Incluir un mecanismo que permita extraer pequeñas muestras de café sin afectar la temperatura.

Visualizar la temperatura: Incorporar un sistema para monitorear la temperatura interna del tambor.

Quemar correctamente el combustible: Diseñar un hogar para la quema de leña

Disponer las cenizas generadas por la combustión: Implementar un sistema para la recolección y eliminación de residuos.

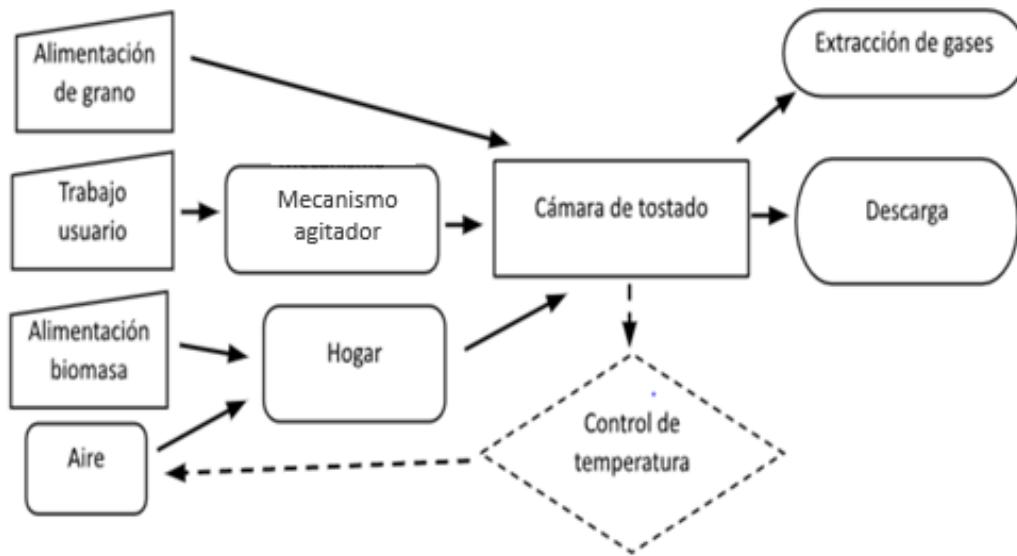
Agitar el café: Diseñar mecanismo de agitación, garantizando uniformidad en el tueste

Aislar térmicamente: Seleccionar alternativas para aislar térmicamente el equipo.

3.4.1.4 Relación de Elementos en el Equipo

Figura 4.

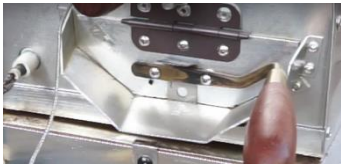


Relación de elementos en el equipo



3.4.1.5 Matriz Morfológica. A continuación, se muestra la tabla con 3 alternativas de mecanismos, donde cada columna representa un sistema completo.

Tabla 2.

Matriz morfológica

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Entrada del grano	 Compuerta con bisagra	 Tolva	 Compuerta deslizante

Mecanismo
transmisión
de potencia



Manivela



Pedal



Motorreductor

Fuente de
calor



Gas Propano



Leña



Resistencia eléctrica

Supervisión
del estado del
grano



Ventana con vidrio



Tubo deslizante



Tubo deslizante

Visualizar
temperatura



Termopar con pantalla

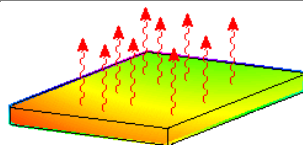


Termómetro bimetalico

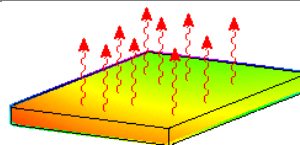


Pirómetro óptico

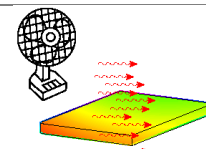
Entrada
Aire



Convección natural



Convección natural



Convección forzada

Salida de los granos			
	Compuerta deslizante	Compuerta con bisagra	Compuerta deslizante
Aislante			
	Aislamiento al vacío	Fibra aislante entre carcasa metálica	Manta aislante

3.4.1.6 Evaluación de Alternativas. A partir del análisis hecho en la sección anterior, se han definido tres configuraciones completas para el equipo de tostado de café. Para seleccionar la mejor alternativa, se empleará una matriz de decisión en la que cada configuración será evaluada según criterios técnicos y económicos (Ver Tabla 3).

Adicionalmente, cada criterio tendrá un peso específico según su importancia dentro del diseño. La alternativa con la mejor puntuación global será seleccionada como la opción óptima para el desarrollo del sistema. En la tabla 4 se muestran estos datos.

3.4.1.7.1 Criterios

Tabla 3.

Criterios de evaluación de las alternativas

Criterio	Peso (%)
Economía	15
Facilidad de fabricación	13

Criterio	Peso (%)
Mantenibilidad	10
Facilidad de instalación	14
Seguridad	10
Medio Ambiente	9
Facilidad de operación	10
Durabilidad	9
Confiabilidad	10
Total	100

Para seleccionar la solución más adecuada, se utilizará una matriz de decisión, donde cada alternativa será puntuada de 1 a 10 según los parámetros definidos. La opción con la mejor puntuación será implementada en el diseño final.

Tabla 4.

Matriz de decisión de alternativas

Criterio	A		B		C	
	Evaluación	Equivalencia	Evaluación	Equivalencia	Evaluación	Equivalencia
Economía (15%)	4	0,6	6	0,9	5	0,75
Facilidad de fabricación (13%)	3	0,39	8	1,04	8	1,04
Mantenibilidad (10%)	6	0,6	5	0,5	5	0,5
Facilidad de instalación (14%)	6	0,84	6	0,84	7	0,98
Seguridad (10%)	8	0,8	8	0,8	4	0,4
Medio Ambiente (9%)	6	0,54	5	0,45	8	0,72

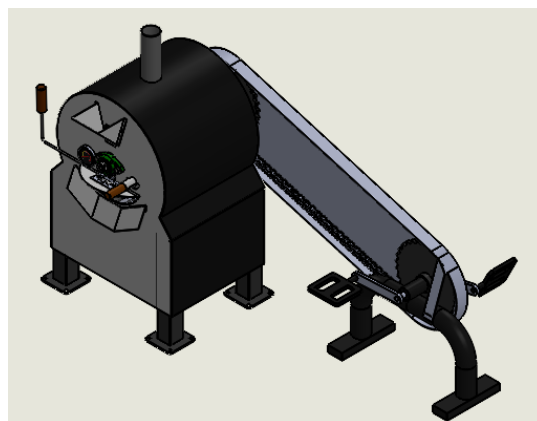
Criterio	A		B		C	
	Evaluación	Equivalencia	Evaluación	Equivalencia	Evaluación	Equivalencia
Facilidad de operación (10%)	5	0,5	6	0,6	9	0,9
Durabilidad (9%)	6	0,54	7	0,63	5	0,45
Confiabilidad (10%)	8	0,8	9	0,9	4	0,4
Total		5,61		6,66		6,14

La opción B ha resultado ser la más adecuada, al obtener la puntuación más alta según los criterios evaluados. Por tanto, se considera la alternativa más equilibrada y con la cual continuar con el desarrollo del diseño.

3.4.1.8 Diseño Seleccionado. El diseño seleccionado es la alternativa B. Consta de un tambor giratorio que se encuentra cubierto por una lámina galvanizada y una capa de aislante térmico con el fin de reducir las pérdidas de calor, el movimiento es transmitido por un sistema cadena-sprocket y el combustible es leña del árbol encenillo (Ver figura 5).

Figura 5

Modelo del diseño seleccionado



3.5 Cálculos

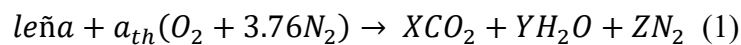
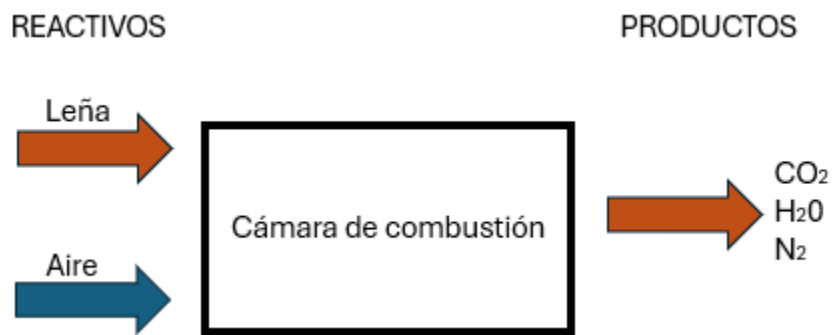
3.5.1 Diseño de la Cámara de Combustión

3.5.1.1 Estequiometría. El balance estequiométrico del proceso de combustión es fundamental para determinar la cantidad exacta de oxígeno y aire requerido para garantizar una combustión de la leña. Evitando deficiencias que podrían generar combustión incompleta y exceso de contaminantes, que reducirían la eficiencia térmica de la tostadora.

Para determinar la cantidad de aire teórico y real es necesario realizar el balance de los reactivos y los productos cuando se genera la combustión, ecuación (1).

Figura 6

Reacción en cámara de combustión



Posteriormente se determina la presión parcial de la humedad en el aire, ecuación (2).

$$P_{v,\text{aire}} = \phi * P_{\text{sat a } 27^\circ\text{C}} \quad (2)$$

Suponiendo un comportamiento de gas ideal, el número de moles de agua en el aire se obtiene con la ecuación (3).

$$N_{v,\text{aire}} = \left(\frac{P_{v,\text{aire}}}{P_{\text{atm}}} \right) * (N_{v,\text{aire seco}} + N_{v,\text{aire}}) \quad (3)$$

Una vez la ecuación balanceada correctamente teniendo en cuenta el vapor de agua, se

halla la relación aire/combustible teniendo en cuenta que el aire posee humedad (AC) con la ecuación (4):

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (4)$$

Ahora la determinación de la temperatura de la llama adiabática es clave para la selección de materiales que garanticen la resistencia térmica y la seguridad de la tostadora, y la cual se obtiene de la ecuación (5):

$$H_{reac} = H_{prod} \quad (5)$$

Donde la entalpia de los reactivos (H_{reac}) y la entalpia de los productos (H_{prod}) es igual a las ecuaciones (6 y 7):

$$H_R = \sum N_R * (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0) \quad (6)$$

$$H_P = \sum N_P * (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0) \quad (7)$$

Obtenidas las entalpias se realiza un proceso de iteración para obtener la temperatura de llama adiabática. Para determinar la temperatura de la llama real es necesario establecer un calor de perdidas como se observa en la ecuación (8):

$$H_{reac} - Q_{Perd} = H_{pro} \quad (8)$$

Resolviendo la ecuación se obtiene la entalpia de los productos y realizando nuevamente un proceso iterativo se obtiene la temperatura real de la llama.

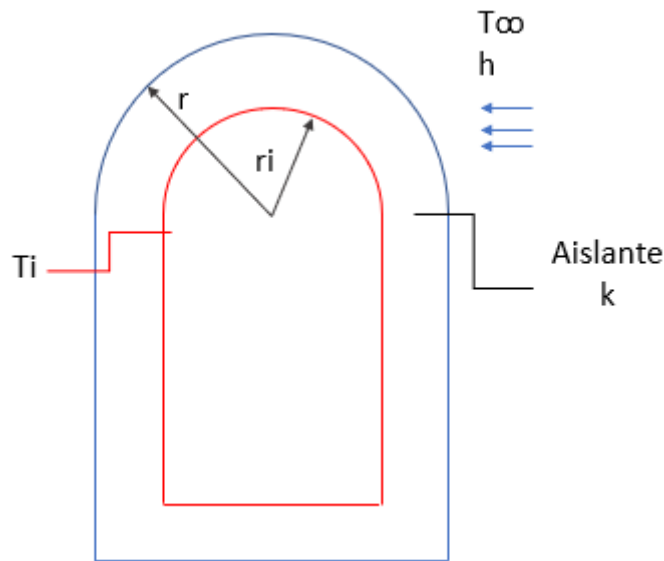
3.5.1.2 Aislamiento Térmico. Para determinar el espesor optimo del aislante de la tostadora se estableció en base a un sistema radial, donde se minimice la pérdida de calor al maximizar la resistencia total a la transferencia de calor, por lo cual se establecieron las siguientes condiciones con el objetivo de simplificar el análisis del sistema:

- Condiciones de estado estable.

- Transferencia unidimensional de calor en la dirección radial (medio cilindro).
- Resistencia por conducción térmica insignificante de las paredes de la tostadora.
- Propiedades constantes para el aislante.
- Intercambio de radiación insignificante entre la superficie externa de la lámina de acero inoxidable y los alrededores.

Figura 7.

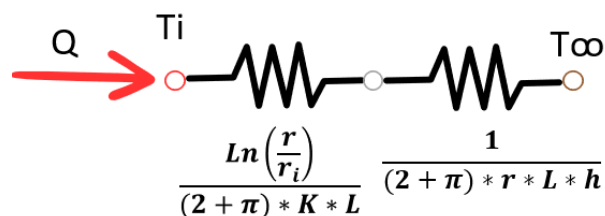
Aislante del equipo



La resistencia a la transferencia de calor entre la cámara interna de la tostadora y el aire es dominada por la conducción en el aislante y la convección en el aire. Por tanto, el circuito térmico es como se muestra,

Figura 8

Modelo de resistencias en el aislante



La resistencia térmica total del medio cilindro se obtiene mediante la ecuación (9):

$$R_{Tot} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{(2+\pi)*K*L} + \frac{1}{(2+\pi)*r*L*h} \quad (9)$$

Donde la transferencia de calor es, ecuación (10):

$$Q = \frac{T_i - T_\infty}{R_{Tot}} \quad (10)$$

Un espesor óptimo de aislamiento estaría asociado con el valor de (r) que minimiza (Q) o maximiza (R_{tot}). Este valor se obtiene del requerimiento como observa en la ecuación (11):

$$\frac{dR_{Tot}}{dr} = 0 \quad (11)$$

Obtenemos la ecuación (12):

$$0 = \frac{1}{(2+\pi)*r*K*L} - \frac{1}{(2+\pi)*r^2*L*h} \quad (12)$$

Lo que es igual a, ecuación (13):

$$r = \frac{K}{h} \quad (13)$$

Para determinar si el resultado anterior maximiza o minimiza la resistencia total, debe evaluarse la segunda derivada. De aquí ecuación (14)

$$\frac{d^2R_{Tot}}{d^2r} = -\frac{1}{(2+\pi)*r^2*K*L} + \frac{2}{(2+\pi)*r^3*L*h} \quad (14)$$

Reemplazando ecuación (13 en 14) sigue:

$$\frac{d^2R_{Tot}}{d^2r} = -\frac{1}{(2+\pi)*\left(\frac{k}{h}\right)^2*K*L} + \frac{2}{(2+\pi)*\left(\frac{k}{h}\right)^3*L*h}$$

$$\frac{d^2R_{Tot}}{d^2r} = \frac{1}{(2+\pi)*\frac{k^3}{h^2}*L} > 0$$

Como este resultado siempre es positivo, se sigue que $r = k/h$ es el radio de aislamiento para el que la resistencia total es un mínimo, no un máximo. Por ello no existe un espesor de aislamiento óptimo. Esto según, Incropera & DeWitt. (1999).

Del resultado anterior tiene más sentido pensar en términos de un radio de aislamiento crítico, ecuación (15):

$$r_{cr} = \frac{K}{h} \quad (15)$$

3.5.2 Diseño de la Cámara de Cocción

Como punto de partida para el dimensionamiento del equipo, se tomará la cámara de cocción. Anteriormente se ha definido que el equipo debe tener una capacidad por tanda de 2 Kg de café y junto con la densidad aparente se determina el volumen de café verde como sigue la ecuación (16):

$$\text{Vol. café almendra } m^3 = \frac{\text{Carga por tanda [kg]}}{\text{Densidad aparente} \left[\frac{\text{kg}}{m^3} \right]} \quad (16)$$

Teniendo el volumen que ocuparan los granos de café verdes dentro de la cámara de cocción, se puede ahora hallar las dimensiones de la misma, esto luego de establecer el diámetro que deseamos que tenga el tambor, así como se muestra a continuación en las ecuaciones (17 y 18).

$$\text{Vol. cam. de cocción } m^3 = \frac{\text{Vol. café almendra } [m^3]}{\% \text{ de ocupación}} \quad (17)$$

$$\text{Long. cam. de cocción } m^3 = \frac{\text{Vol. cam. de cocción } [m^3]}{\frac{\pi}{4} * (\text{diam. tambor})^2} \quad (18)$$

Para calcular las dimensiones por la transferencia de calor, se partirá de un balance de energía, en el que se determina la energía necesaria para que los granos de café cumplan el proceso de tueste en el tiempo y a la temperatura establecidos de la revisión bibliográfica previamente realizada, esto partiendo de la siguiente ecuación (19):

$$E_{ent} - E_{sal} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (19)$$

Una vez conocido el calor útil que le debe ingresar a los granos, la temperatura de llama adiabática y material de la cámara de cocción, se modela la transferencia de calor desde la cámara de combustión, hacia los granos. Para ello se empleará el modelo de resistencias térmicas. Seleccionado esto ahora hay que establecer limitaciones en el modelo, para este modelo se supondrá que el aislante instalado no permite la pérdida de calor a través de él, por tanto, el cuerpo del equipo actúa internamente como un cuerpo negro, teniendo pérdidas de calor únicamente por el escape de gases y en la cámara de combustión.

El calor útil que aprovechan los granos debe atravesar primero un cilindro de acero giratorio (cámara de cocción), proceso que estaría dado por la ecuación (20):

$$q_{util} = \frac{T_s - T_{cafe}}{\frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 * \pi * L_{cil} * k_{acero}}} \quad (20)$$

Para calcular la temperatura de la superficie del cilindro se tendrá en cuenta el calor total que proviene de la llama hasta la misma superficie, siguiendo así, ecuación 21:

$$q_{total} = \frac{T_{llama} - T_s}{\frac{1}{h_{conv} * A_{cilind,ext}}} + q_{perdido} \quad (21)$$

En este punto no se tiene el valor del calor total (q_{total}), ni del coeficiente de convección que se produce en la superficie del cilindro giratorio (h_{conv}). Además, se tiene como incógnita el área del cilindro, a través de la cual se determinan las dimensiones del mismo. Para abordar el primer punto, se establece que el total de calor producido será la suma del calor aprovechado por el café (q_{util}) con el calor que se pierde en diferentes puntos del proceso, así:

$$q_{total} = q_{util} + q_{perdido} \quad (22)$$

Lo cual infiere que, ecuación (23):

$$q_{util} = \frac{T_s - T_{cafe}}{\frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 * \pi * L_{cil} * k_{acero}}} = \frac{T_{llama} - T_s}{\frac{1}{h_{conv} * A_{cilind,ext}}} \quad (23)$$

En cuanto al coeficiente de convección, dado que el caso es un cilindro giratorio, se debe buscar en una literatura con este enfoque, un modelo con el que obtener un valor más preciso, así como un modelo para estimar las pérdidas que se van a tener. De esta forma se obtendrán las dimensiones del cilindro que constituye la cámara de cocción.

3.5.3 Selección Sistema de Transmisión de Potencia

Se ha establecido que el sistema de transmisión de potencia es por tracción humana, por tal motivo se selecciona el mecanismo de piñón cadena utilizados en las bicicletas esto se debe a factores como que son piezas comerciales, menor costo, y facilidad de montaje.

Para determinar la relación de trasmisión, el tamaño del plato y el piñón, en necesario establecer la velocidad (rpm) a la que debe girar el tambor de la tostadora, al igual que también se debe establecer la velocidad (rpm) de pedaleo promedio producida por una persona en una bicicleta.

Con base en estos parámetros se calcula la relación de transmisión y el diámetro del piñón y el plato, ecuación 24.

$$i = \frac{Rpm\ entrada}{Rpm\ salida} = \frac{Z\ plato}{Z\ piñon} \quad (24)$$

3.5.3.1 Longitud de la Cadena. Para determinar la longitud de la cadena es importante establecer los siguientes parámetros:

- Numero de dientes del piñón conductor
- Número de dientes del piñón conducido.
- Paso de cadena

- Distancia entre centros

La ecuación (25) para determinar la longitud de la cadena:

$$L = 2C + \frac{S}{2} + \frac{K}{S} \quad (25)$$

Donde

C: es la distancia entre centros dividida en el paso de la cadena

S: Es la suma de los números dientes de los dos piñones

D: es la resta de los números de dientes

K: Es un factor que depende del valor de “D”.

3.6 Dimensionamiento del Eje

El eje debe ser capaz de transmitir la carga de un extremo a otro sin deformarse excesivamente o fallar en servicio. Por lo cual, al diseñar un eje adecuado, es necesario considerar una variedad de factores, como la cantidad y tipo de carga, dimensiones, geometría del eje, los materiales utilizados y las condiciones ambientales en las que operará el eje.

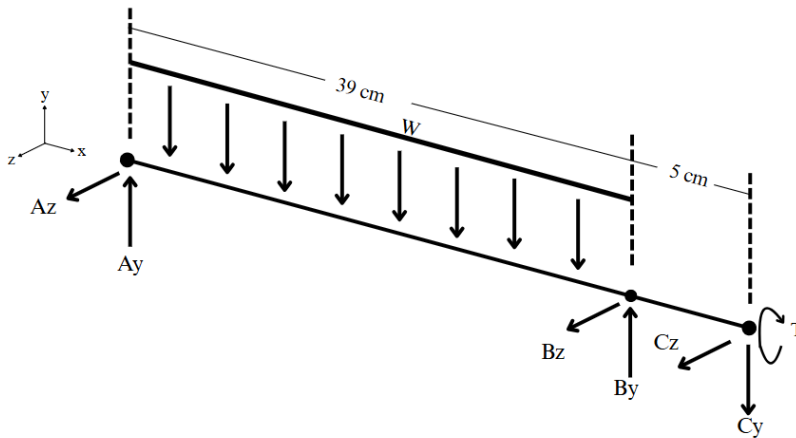
La flexión y la torsión son dos tipos de carga comunes que pueden actuar en un eje, y cada una debe ser considerada cuidadosamente en el diseño. La flexión puede ser causada por cargas aplicadas perpendiculares al eje, mientras que la torsión puede ser causada por cargas aplicadas en dirección axial.

Para determinar el diámetro del eje se requiere el peso del tambor y de los granos de café para así encontrar las reacciones en los soportes. Los pesos se establecieron como una carga que actúa uniformemente distribuida sobre eje con la ecuación (26).

$$W = \frac{m \cdot g}{L} \quad (26)$$

W: Carga distribuida
m: Masa total

L: Longitud
g: Gravedad

Figura 9*Distribución de fuerzas sobre el eje*

Donde

A_x y A_y : Son las reacciones en el soporte A

B_x y B_y : Son las reacciones en el soporte B

C_x y C_y : Son las reacciones producidas por el sprocket

Para determinar las reacciones se hace a través de las ecuaciones (27,28).

$$\sum F_y = 0 \quad (27)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (28)$$

Para determinar el diámetro mínimo de eje se empleó el criterio de falla de Goodman modificado que establece la ecuación (29).

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

Donde:

n: factor de seguridad

S_e : Limite de resistencia a la fatiga en las condiciones de uso.

Sut: Esfuerzo último a la tensión.

Mm: Momento flector medio

Ma: Momentos flector alternante

Tm: Torque medio.

Ta: Torque alternante.

Kf: Factores de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión.

Kfs: Factores de concentración del esfuerzo por la torsión.

3.7 Selección de Otros Componentes

3.7.1 Chumacera

La selección de este componente se realizará tomando como base el diámetro del eje previamente calculado. A partir de esta medida, se elegirá la chumacera que más se ajuste a los requerimientos del equipo, de un catálogo de fabricante. Esto ya que las chumaceras son elementos estandarizados y de amplia disponibilidad comercial.

4. Resultados

4.1 Parámetros Temperatura y Tiempo

El café producido y consumido en la vereda Suacía pertenece a la variedad Arábica y se consume mayormente con un grado de tueste de **45-25** en la escala Agtron, lo que corresponde a un **tono oscuro**. Para lograr este nivel de tueste, es fundamental aumentar la temperatura y prolongar el tiempo de exposición al calor, es necesario un control preciso del proceso para evitar la carbonización de los compuestos esenciales del grano y preservar su calidad.

Luego de hacer una exhaustiva revisión bibliografía de referentes en el tostado de café, los

valores hallados se han consolidado en la tabla que se muestra a continuación, donde se ha seleccionado los valores de tiempo y temperatura de tostado que se asemejan a las condiciones que se tienen; a la vez que se obtiene el resultado deseado:

- Temperatura: 210°C - 220°C
- Tiempo: 15 minutos.

Tabla 5

Recopilación de resultados obtenidos en referentes

Trabajo	Lugar	Tipo de café	Temperatura de tostado (°C)	Tiempo de tostado (min)	Nivel de tueste	Tipo de tostadora
Influencia del perfil de tostado del café en la calidad en taza para una tostadora de 2 kg (De la cruz, 2018)	Perú	Café Arábica	200 -220	12-15	Medio - Oscuro	Tostadora de tambor giratorio
Diseño y construcción de una tostadora de café semiautomática con una capacidad de 8 kg (Tituana, 2023)	Ecuador	Café Arábica	175 -195	8	Medio	Tostadora de tambor y resistencias térmicas
Diseño de una planta de café tostado y molido (Reyes, 2003)	Guatemala	Café Arábica	200-210	No especificado	Medio - Oscuro	Planta industrial

Aspectos de calidad del café para la industria torrefactora nacional (FNC, 2015)	Colombia	Café Arábica	185-240	15-20	Medio- Oscuro	No Especificado
Diseño y construcción de un tostador por resistencias eléctricas para café de quinua (Pozo & Mosquera, 2015)	Ecuador	Café de quinua	180	45	no especific ado	Tostador eléctrico
Estudio de la influencia del método de tostión en la calidad sensorial del café (UNAL, 2017)	Colombia	Café Arábica	185-205	10-13	Medio	Tostadora por tambor y aire caliente
Análisis del tostado del grano de café (Ramírez et al, 2019)	México	Café de especiali dad	200-210	11-12	Medio - Oscuro	Equipos industriales
Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café (Osorio, Pabón et al .2021)	Colombia	Café Arábica	170-190	No especific ado	Medio	Tostadora de doble tambor
Evaluación del efecto de tres niveles de tostión en la calidad en taza de algunas variedades de café de la especia coffea arábica L (Méndez et al. 2019)	Colombia	Café Arábica	200-230	8-12	medio	No Especificado

4.2 Cámara de Combustión

La vereda la sucia esta ubica en una zona donde predominan especies arbóreas como yarumo (*Cecropia sp.*), el arboloco (*smallanthus pyramidalis*) y en mayor parte el encenillo (*Weinmannia rollotii*) por tal motivo y a su alto poder calorífico se utilizará como fuente de combustible, el cual está constituido por los elementos que se ven en la siguiente tabla:

Tabla 6

Caracterización de la madera

Característica	Muestra						
	1	2	3	4	5	6	7
Nombre	Eucalipto	Duraznillo	Encenillo	Arboloco	Pino	Acacio	Retal
Humedad (%)	8,44	9,47	9,35	8,72	10,28	11,08	9,77
Volátiles (%)	84	88	91,4	86	91	87	90
Análisis elemental							
%C	43,2	42,7	41,67	41,87	43,35	42,78	41,62
%H	5,992	5,65	5,67	5,73	6,4	5,71	6,35
%N	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,93
%O	50,808	51,65	52,66	52,4	50,25	51,51	48,1
PCS según Doulong (kJ/kg)	142209	13407,55	12877,1	13083,6	14939,7	13524,4	14660,2
PCS según datos Ingeominas (kJ/kg)	18605	18020	17953	17750	18938	18621	17929

Nota: Tomado de *Determinación de la eficiencia de la cocción con leña en las veredas de Usme, Bogotá, Sierra & Guerrero. 2013.*

4.2.1 Estequiometria

Tomando como base 1kg de masa se obtiene:

$$41.67\% \text{ C} = 0,4167 \text{ kg}$$

$$5.67\% \text{ H}_2 = 0,0567 \text{ kg}$$

$$51.65\% \text{ O}_2 = 0,5165 \text{ kg}$$

$$0\% \text{ N}_2 = 0 \text{ kg}$$

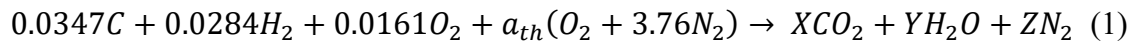
Se calculó las moles de cada elemento:

$$N_C = \frac{0,4167 \text{ kg}}{12 \text{ kg/kmol}} = 0,0347 \text{ kmol}$$

$$N_{H_2} = \frac{0,0567 \text{ kg}}{2 \text{ kg/kmol}} = 0,0284 \text{ kmol}$$

$$N_{O_2} = \frac{0,5165 \text{ kg}}{32 \text{ kg/kmol}} = 0,0161 \text{ kmol}$$

La ecuación estequiométrica queda:



Balance de Carbono (C):

$$X=0,0347 \text{ kmol}$$

Balance de Hidrógeno (H₂):

$$2*(0,0284) = 2Y$$

$$Y=0,0284 \text{ kmol}$$

Balance de Oxígeno (O₂):

$$(2*0,0161) + (2*ath) = (2*0,0347) + 0,0284$$

$$ath=0,0328 \text{ kmol}$$

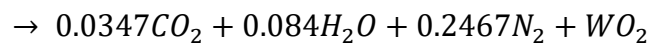
Se asumió un porcentaje de exceso de aire de 100% debido a que es un proceso en un sistema abierto y el combustible es leña, por lo que es necesario mayor cantidad de aire para lograr una combustión completa.

Con este nuevo valor se recalcula el balance estequiométrico

$$ath= 2* 0,0328 \text{ kmol}$$

$$ath= 0.0656 \text{ kmol}$$

$$0.0347C + 0.0284H_2 + 0.0161O_2 + 0.0656(O_2 + 3.76N_2)$$



Donde se obtiene:

Balance de Carbono (N₂):

$$(2 \cdot 0.0328 \cdot 3.76 \cdot 2) = 2Z$$

$$Z = 0.2467 \text{ kmol}$$

Balance de Oxígeno (O₂):

$$(2 \cdot 0.0161) + (0.0656 \cdot 2) = (2 \cdot 0.0347) + 0.0284 + 2 \cdot W$$

$$W = 0.0328 \text{ kmol}$$

Ahora en la ecuación química debe considerar la humedad relativa de Labranzagrande. Por ende, se tiene lo siguiente:

$$\Phi = 80\%$$

$$T_{\text{amb}} = 20 \text{ C}$$

$$P_{\text{sat a } 20 \text{ °C}} = 2.339 \text{ kpa}$$

$$N_{v,\text{aire seco}} = 4.76 \cdot a_{th} = 4.76 \cdot 0.0656 = 0.3123 \text{ kmol (2)}$$

$$P_{v,\text{aire}} = \phi \cdot P_{\text{sat a } 20 \text{ C}} = 0.8 \cdot 2.339 = 1.871 \text{ kpa}$$

Con esto se calcularon las moles de humedad en el aire:

$$N_{v,\text{aire}} = \left(\frac{1.871 \text{ Kpa}}{101.5 \text{ kpa}} \right) \cdot (0.3123 \text{ kmol} + N_{v,\text{aire}}) \text{ (3)}$$

$$N_{v,\text{aire}} = 0.005867 \text{ Kmol H}_2\text{O}$$

Ahora se reescribe la ecuación química final teniendo en cuenta la humedad:

$$0.0347C + 0.0284H_2 + 0.0161O_2 + 0.005867H_2O + 0.0656(O_2 + 3.76N_2)$$

$$\rightarrow 0.0347CO_2 + 0.0898H_2O + 0.2467N_2 + 0.0328O_2$$

Posteriormente se halló la relación aire/combustible (AC) teniendo en cuenta que el aire contiene humedad. Tal como se había planteado inicialmente (Ecuación 4)

$$AC = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} \text{ (4)}$$

$$AC = \frac{0.0656 * 4.76 \text{ kmol} * (29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}})}{1 \text{ kg}} \quad (4)$$

$$AC = 9.055 \frac{\text{Kg aire}}{\text{kg comb}}$$

Finalmente se determina la temperatura de la llama adiabática.

Tabla 7.

Recopilación de resultados

Sustancia	hf°	$\bar{h}^{\circ}298\text{k}$	$\bar{h}^{\circ}293\text{k}$
	KJ/kmol	KJ/kmol	KJ/kmol
C	0	0	0
H2	0	8468	8321
O2	0	8682	8533
N2	0	8669	8521
H2O	-24182	9904	9733
CO2	-39352	9364	9176

Nota. Entalpias gases ideales. Adaptado de *Cengel 7ed 2010*.

Con las entalpias de los compuestos y/o elementos (Anexo A) se determinó la temperatura de llama adiabática con la ecuación:

$$0.0347C + 0.0284H_2 + 0.0161O_2 + 0.005867H_2O + 0.0656(O_2 + 3.76N_2)$$

$$\rightarrow 0.0347CO_2 + 0.0898H_2O + 0.2467N_2 + 0.0328O_2$$

$$H_{\text{reac}} = H_{\text{prod}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &0.0284 \text{ kmol } H_2 * (0 + 8321 - 8468) + 0.0161 \text{ kmol } O_2 * (0 + 8533 - 8682) + \\ &0.005867 \text{ kmol } H_2O + * (-241820 + 9733 - 9904) + 0.0656 \text{ kmol } O_2 * (0 + 8533 - \\ &8682) + 0.2467 \text{ kmol } N_2 (0 + 8521 - 8699) = 0,0347 * (-393520 + hCO_2 - 9364) + \\ &0,0898 * (-241820 + hH_2O - 9904) + 0,2467 * (0 + hN_2 - 8669) + 0,0328 * \end{aligned}$$

$$(0 + h_{O_2} - 8682)$$

Realizadas las operaciones se obtuvo:

$$37500Kj = 0.0347h_{CO_2} + 0.0898h_{H_2O} + 0.2467h_{N_2} + 0.0328h_{O_2}$$

Hechas las iteraciones necesarias encontramos que la temperatura de llama adiabática será:

$$T_{ad} = 2486.6^{\circ}K = 2213.4^{\circ}C$$

Para calcular la temperatura de la llama, fue necesario tomar en cuenta los requisitos el calor de perdidas dentro del sistema. De acuerdo con Vallejo (2019) indica que para un horno convencional las pérdidas de calor son aproximadamente un 36% de calor total y se deben principalmente al calor perdido por combustión incompleta y gases de combustión. También, el mismo autor indica que las pérdidas de calor a través de las paredes del horno alcanzan un 36.4% en el caso que el horno no tenga aislamiento térmico. Sin embargo, para este proyecto solo se toma en cuenta las pérdidas por combustión incompleta y los gases de combustión, dado que el horno está provisto de una capa aislante, lo que minimiza las pérdidas térmicas a través de las paredes.

$$Q_{Perd} = 37500KJ * 36\%$$

$$Q_{Perd} = 13500KJ$$

En la ecuación se tiene:

$$H_{reac} - Q_{Perd} = H_{pro}(8)$$

Simplificando se obtuvo:

$$37500Kj - Q_{Perd} = 0.0347h_{CO_2} + 0.0898h_{H_2O} + 0.2467h_{N_2} + 0.0328h_{O_2}$$

$$37500Kj - 13500KJ = 0.0347h_{CO_2} + 0.0898h_{H_2O} + 0.2467h_{N_2} + 0.0328h_{O_2}$$

Realizando las iteraciones necesarias encontramos que la temperatura de llama real será:

$$T_{real} = 1689.67^{\circ}K = 1417^{\circ}C$$

4.2.2 Aislamiento Térmico

Para determinar el espesor óptimo del aislante de la tostadora se estableció en base a un sistema radial tomado el medio cilindro que forma la parte superior, bajo las siguientes condiciones con el objetivo de simplificar el análisis del sistema:

1. Condiciones de estado estable.
2. Transferencia unidimensional de calor en la dirección radial (medio cilindro).
3. Resistencia por conducción térmica insignificante de las paredes de la tostadora.
4. Propiedades constantes para el aislante.
5. Intercambio de radiación insignificante entre la superficie externa de la lámina de acero inoxidable y los alrededores.

La resistencia a la transferencia de calor entre la cámara interna de la tostadora y el aire es dominada por la conducción en el aislante y la convección en el aire (Véase figura 6). Por tanto, el circuito térmico es como se muestra en la Figura 7.

De donde se tiene que la resistencia térmica total del medio cilindro es entonces:

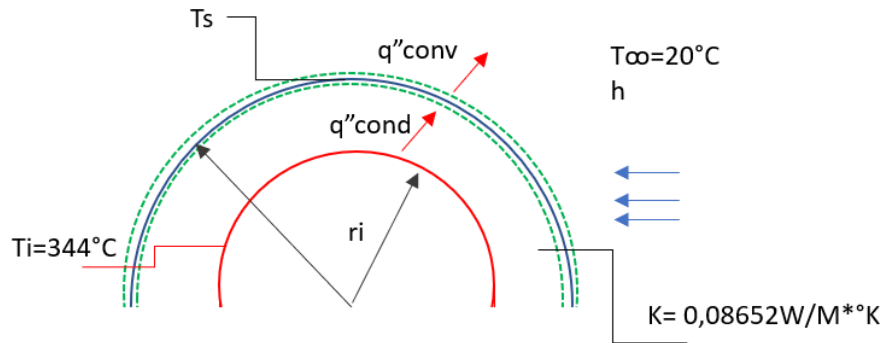
$$R_{Tot} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{(2+\pi)*K*L} + \frac{1}{(2+\pi)*r*L*h} \quad (9)$$

Donde la transferencia de calor es:

$$Q = \frac{T_i - T_\infty}{R_{Tot}} \quad (10)$$

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección natural es necesario hacer un balance de energía en la superficie externa como se observa en la imagen.

Figura 10.

Balace de energía en superficie externa del equipo

Al realizar el balance de energía en la superficie se obtiene que:

$$q''_{\text{cond}} = q''_{\text{conv}}$$

O

$$\frac{T_i - T_s}{(t/K)} = \frac{T_s - T_\infty}{(1/h)}$$

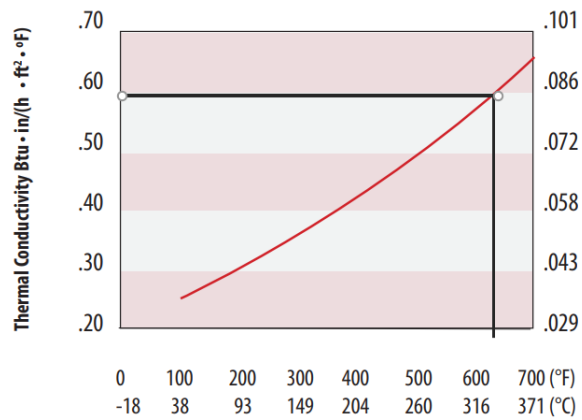
El flujo de calor por conducción depende del tipo de aislante utilizado y de la conductividad térmica del mismo, el flujo de calor por convección natural en la superficie exterior de la temperatura desconocida de la superficie (T_s).

El aislante seleccionado es lana mineral de roca en cual tiene un espesor (t) de 2 pulgadas, aproximadamente 5.04 cm y una conductividad térmica $0.60 \text{ BTU} \cdot \text{in} / \text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} =$ a $0.08652 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ a una temperatura de $650^\circ\text{F} = 344^\circ\text{C}$ según el fabricante *Calorcol*.

Figura 11.

Conductividad térmica lana de roca

Gráfica de la conductividad térmica (k)*



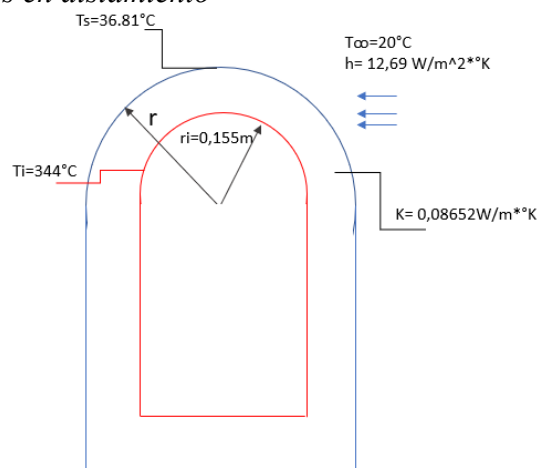
Nota. Tomado de: Calorcol.

Tomando la igualdad del balance de energía se tiene:

$$\frac{344^{\circ}c - Ts}{\left(\frac{0.0504m}{0.0865 \frac{W}{m \cdot k}}\right)} = \frac{Ts - 20}{(1/h)}$$

Realizando el proceso de iteración donde se varia la temperatura de la superficie (Ts), se obtiene que con Ts =36.81°C, el coeficiente de transferencia de calor por la convección natural (h) es igual a 12.69 W/m²*°K

Figura 12. Valores térmicos calculados en aislamiento



El espesor óptimo de aislamiento estaría asociado con el valor de (r) que minimiza (Q) o

maximiza (R_{tot}). Donde (r_i) = 0.155 m y por lo cual se determina el radio de aislamiento crítico:

$$r_{cr} = \frac{0.0865 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{12.69 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}} = 0.0068 \text{ m} \quad (15)$$

Al ser el radio sin aislamiento mayor que el radio crítico, (r_i) > (r_{cr}) cualquier espesor capa del aislante que se agregue reducirá la pérdida de calor en la tostadora, por lo cual el espesor que se empleara es el que tiene por defecto la lana mineral de roca que es de 2 pulgadas o 5.04 cm.

4.3 Cámara de Cocción

4.3.1 Dimensiones Mínimas de Cámara de Cocción.

Según Montilla et al (2008) el grano de café almendra tiene una densidad aparente de 709,99 [Kg/m³]. Esto se determinó basado en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4607. De este modo, se obtiene el volumen que ocupara los granos de café por tanta.

$$\text{Vol. café almendra } m^3 = \frac{2[kg]}{709.99[kg/m^3]} = 2.81E * 10^{-3} m^3 \quad (16)$$

Teniendo el volumen de los granos de café verdes, se estableció el diámetro del tambor en 0.25[m]. Además, en cuanto al volumen que debe ocupar el café en la cámara de cocción, según Gómez (2021) “Para el tambor de tostado se quiere llenar hasta el 40% de su capacidad”.

$$\text{Vol. cam. de cocción } m^3 = \frac{2.81E * 10^{-3} m^3}{0.4} = 7.04 * 10^{-3} m^3 \quad (17)$$

$$\text{Long. cam. de cocción } m = \frac{\text{Vol.cam.de cocción } [m^3]}{\frac{\pi * (\text{dia.tambor})^2}{4}} = \frac{7.04 * 10^{-3} m^3}{\frac{\pi * (0.25 \text{ m})^2}{4}} = 0.1431 \text{ m} \quad (18)$$

4.3.2 Balance de Energía Cámara de Cocción

$$E_{ent} - E_{sal} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (19)$$

$$Q_{ent} - \frac{m_w}{\Delta t} h_{g@Patm} = \frac{m_{cCPc}(T_f - T_i) - m_w U_{i@T_i}}{\Delta t}$$

Donde el subíndice (w) indica que es agua, (c) café, (f) e (i) es para indicar las condiciones

final e inicial respectivamente, (u) es la energía interna, (h) es la entalpia de y (Δt) es el tiempo en el que se tostara el café, (m_w) es el agua del grano que se evapora debido al incremento de la temperatura y está comprendido entre el 12% y 20% del peso, que para este caso se asume de 20% dando como resultado 0.4 kg de agua y 1.6kg de café.

La temperatura inicial es de 20°C y se llevara a una temperatura de 220°C, esto a una presión atmosférica de 101.3 kPa. El café tiene un C_p de 1.256 KJ/kg y el proceso de tostado se realiza en 15 min. No se toma en cuenta las pérdidas de la cámara de combustión a la cámara de cocción debido a que la tostadora se encuentra aislada térmicamente.

$$Q_{ent} - \frac{0.4kg}{900s} * 2675.6 \frac{KJ}{Kg} = \frac{1.6Kg * 1.256 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} (220 - 20)^{\circ}C - 0.4 * 83.913 \frac{KJ}{Kg}}{900 s}$$

$$Q_{ent} = \frac{1.6Kg * 1.256 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} (220 - 20)^{\circ}C - 0.4 * 83.913 \frac{KJ}{Kg} + 0.4kg * 2675.6 \frac{KJ}{Kg}}{900 s}$$

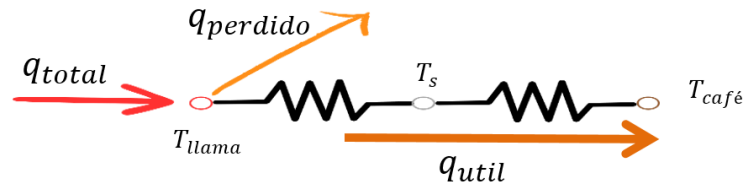
$$Q_{ent} = 1.6 \frac{KJ}{s} \approx 1.6 kW$$

4.3.3 Transferencia de Calor

Se conoce ahora el calor que le debe ingresar a los granos para cumplir con el proceso de tueste (1600 W). En cuanto a las perdidas por el escape de gases calientes y en el quemador, según Diaz (2019) en su trabajo “*Recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de frita cerámica*”, donde hace mediciones experimentales con uso de herramientas especializadas, como cámara termográfica, y analizando los resultados, se concluye que se presentan perdidas a razón del 36% del calor total entre las perdidas por gases de combustión y el desbalance. Sabiendo esto, ya se puede modelar y construir el circuito de resistencias térmicas.

Figura 13.

Modelo de resistencias térmicas desde llama hasta granos de café.



De lo cual se derivan las siguientes relaciones:

$$q_{total} = q_{util} + q_{perdido} \quad (22)$$

$$q_{util} = \frac{T_s - T_{cafe}}{\frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2 * \pi * L_{cil} * k_{acero}}} = \frac{T_{llama} - T_s}{\frac{1}{h_{conv} * A_{cilind,ext}}} \quad (23)$$

Teniendo el planteamiento, se procede al dimensionamiento de la cámara de cocción partiendo de los datos conocidos actualmente:

$$n = 70 \text{ rpm} \quad D_{ext} = 0.254 \text{ m} \quad T_{llama} = 1417 \text{ }^\circ\text{C}$$

(Explicado a continuación)

De Mills (1995) se tiene que el modelo que describe la transferencia de calor en un cilindro giratorio está dado por:

$$h_{conv} = \frac{k_{aire} * Nu_D}{D_{ext}}$$

$$\text{Donde } Nu_D = 0.133 Re_D^{2/3} Pr^{1/3} \quad \text{Para } Re_D < 4,3E5 \quad 0.7 < Pr < 670$$

Para lo cual:

$$Re_D = \frac{\Omega D^2}{\nu}$$

Donde Ω = Velocidad angular [rad/seg] ν = viscosidad del aire [m^2/s]

$$\Omega = \frac{2 * \pi * n}{60}$$

Las propiedades k_{aire} , ν y Pr se calculan a $T_{película} = \frac{T_s + T_{llama}}{2}$

Resolviendo el sistema de ecuaciones planteadas, se obtiene los valores de la siguiente tabla 8:

Tabla 8.

Resultados transferencia de calor entre llama y cámara de cocción

$h_{conv} = 6.969 \frac{W}{m^2 * K}$	$Nu_D = 20.03$	$\Omega = 7.33 \frac{rad}{s}$	$Re_D = 2145$
$q_{perdido} = 900 W$	$q_{Tot} = 2500 W$	$q_{util} = 1600 W$	$T_{pelic} = 1153 K$
$T_s = 617 K$	$D_{interno} = 25cm$	$L_{cilindro} = 26.8 cm$	$A_{externa} = 0.214 m^2$

De los resultados obtenidos se establece las dimensiones de la cámara cocción de 25 cm de diámetro y 27 cm de largo.

4.3.4 Cálculo de Masa de Leña

El calor total necesario para realizar el proceso de tostado de los 2 kilogramos es de 2.5kw = 2.5kj/s, el poder calorífico superior (PCS) de la leña de encenillo es 17953kj/kg (Sierra & Guerrero.2014) ver Apéndice (B).

Determinando el poder calorífico inferior, de acuerdo con Sierra & Guerrero (2014) la humedad presente en la leña de encenillo es de 9.35%. con una temperatura ambiente de 20°C, la entalpia es de 2453.5 Kj/Kg (Cengel. Tabla A4. Apéndice C.)

$$PCI = PCS - (h_{fg} * H)$$

$$PCI = 17953 \frac{kJ}{kg} - (2453.5 \frac{kJ}{kg} * 0.0935)$$

$$PCI = 17723.65 \frac{kJ}{kg}$$

El proceso de tostado se estableció realizarse en un tiempo de 15 min =900s por lo tanto tenemos que es consumo de leña es:

$$m_{leña} = \frac{Q_{tot} * t}{PCI}$$

$$m_{leña} = \frac{2.6 \frac{KJ}{S} * 900S}{17723.65 \frac{KJ}{Kg}}$$

$$m_{leña} = 0.132 \text{ kg} = 132g$$

La cantidad de leña es pequeña debido a que se calculó bajo condiciones ideales.

4.4 Trasmisión de Potencia

De acuerdo con Scott Rao (2008) recomienda una velocidad de rotación de 70 a 80 vueltas por minuto para una tostadora de 1 a 2 kg. Según la RFEC (2023) La cadencia de pedaleado de ciclistas principiantes: 60–80 rpm, Intermedios: 80–90 rpm, Avanzados: 90–100 rpm. La velocidad establecida para la tostadora de café es de 70 rpm y la que alcanza una persona en promedio es de 70 rpm, lo cual permite obtener la relación de transmisión.




$$i = \frac{Rpm \text{ entrada}}{Rpm \text{ salida}} = \frac{70}{70} \quad (24)$$

$$i = 1$$

4.4.1 Selección de los Componentes

Con la relación de transmisión de 1 nos indica que el tamaño del plato y el piñón deben ser iguales. El tamaño del sprocket que se selecciono fue de 46 dientes, este tipo es el que comúnmente es utilizado en las bicicletas de monoplano y piñón fijo.

Tabla 9.*Componentes del sistema de transmisión de potencia*

Componentes	Descripción	Cantidad
<p data-bbox="203 617 310 646">Sprocket</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="971 407 1122 436">• Marca: Point <li data-bbox="922 470 1170 499">• Tipo: Pedalier 1 plato <li data-bbox="889 533 1198 562">• Referencia: MAXPE19001 <li data-bbox="954 596 1138 625">• Material: Acero <li data-bbox="976 659 1117 688">• Dientes :46 <li data-bbox="829 722 1263 751">• Compatibilidad transmisión:1/2 x 3/32 <li data-bbox="976 827 1117 856">• Peso: 400 g 	2
<p data-bbox="224 995 289 1024">Biela</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="971 911 1122 940">• Marca: Point <li data-bbox="954 974 1138 1003">• Material: Acero <li data-bbox="938 1037 1154 1066">• longitud: 175 mm <li data-bbox="954 1100 1138 1129">• Color: Plateado 	2
<p data-bbox="207 1331 305 1360">Cadena</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="971 1163 1117 1192">• Marca: GW <li data-bbox="873 1226 1214 1255">• Referencia: Gw S51 Ruta Mtb <li data-bbox="954 1289 1138 1318">• Material: Acero <li data-bbox="954 1352 1138 1381">• Eslabones: 116 <li data-bbox="922 1415 1170 1444">• Ancho eslabón: 3/32 " <li data-bbox="976 1478 1117 1507">• paso: 1/2 " <li data-bbox="971 1541 1117 1570">• Peso: 315 g 	1

Pedales



- Marca: BKS
- Tipo: Moderno
- Referencia: R650
- Material: Aluminio
- Color: negro
- Dimensiones :9,7 x 11 x 2,2 [cm]
- Peso: 200 g

2

4.4.2 Longitud de la Cadena

Seleccionados los componentes del sistema de transmisión de potencia se estableció la longitud de la cadena de acuerdo con el fabricante INTERMEC.

- Numero de dientes del piñón conductor :46
- Número de dientes del piñón conducido:46
- Paso de cadena :1/2"
- Distancia entre centros:80 Cm = 31.496 Pul

El número de eslabones es:

$$L = 2C + \frac{S}{2} + \frac{K}{S} (25)$$

$$C = \frac{D.entre\ centros}{Paso} = \frac{31.496\ ''}{1/2''}$$

$$C = \frac{31.496\ ''}{1/2''} = 62.99''$$

$$S = N. dientes\ conductor + N. dientes\ conducido$$

$$S = 46 + 46 = 92\ dientes$$

$$D = N. dientes\ conductor - N. dientes\ conducido$$

$$D = 46 - 46 = 0\ dientes$$

Como el valor de D es cero el factor K es cero, lo cual da como resultado (Anexo D).

$$N. \text{ eslabones} = 2 * 62.99" + \frac{92}{2}$$

$$N. \text{ eslabones} = 171.98 \approx 172$$

$$L. \text{ cadena} = 172 * 1/2"$$

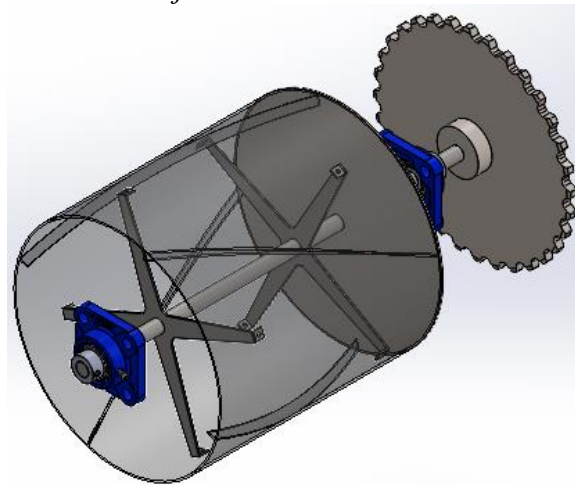
$$L. \text{ cadena} = 86\text{Pul} = 218.44 \text{ Cm}$$

4.5 Dimensionamiento del Eje

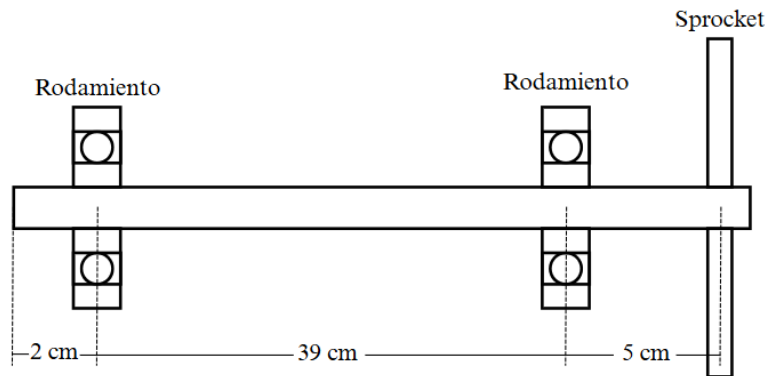
Para el dimensionamiento del eje se determinó la masa del tambor y soportes con ayuda del programa de diseño SolidWorks dando como resultado 4.532kg, y junto con los 2 kg de café a tostar, se obtiene una masa total de 6.5Kg.

Figura 14.

Modelo de elementos en contacto con eje



El eje tiene una longitud de 50cm y está distribuida como se observa en la figura:

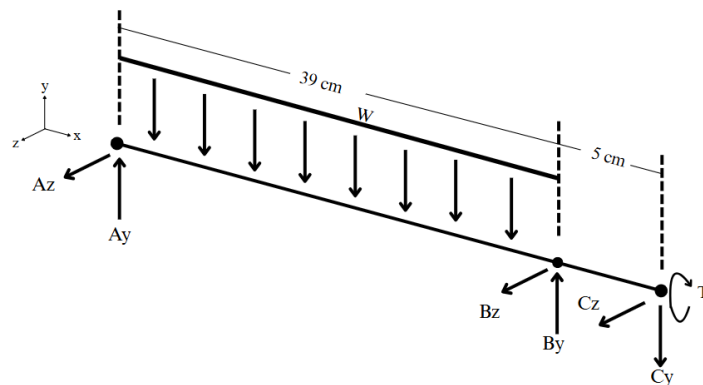
Figura 15.*Distribución de elementos en contacto con eje*

La carga que genera la masa del café y del tambor sobre el eje se establece como una carga uniformemente distribuida.

$$W = \frac{m \cdot g}{L} \quad (26)$$

$$W = \frac{6.532 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2}{0.39 \text{ m}}$$

$$W = 163.5 \text{ N/m}$$

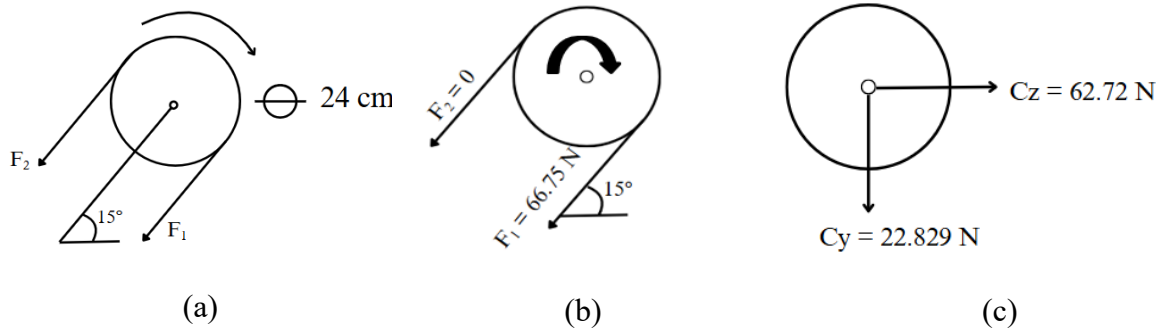
Figura 16.*DCL del eje*

Para determinar las reacciones en el eje, es necesario trasladar las fuerzas que genera por la transmisión por cadena al eje, en la transmisión por cadena la sección que no se encuentra tensa

la fuerza (F_2) es cero.

Figura 17.

Fuerzas y reacciones sobre el sprocket



Nota. (a) la fuerza ejercida por la cadena. (b) Valor de la fuerza. (c) Componentes de las fuerzas

La fuerza resultante se obtiene de la ecuación.

$$T = F_{res} * r_{sprocket}$$

El torque es igual a lo largo del eje, por lo que se determinó con la ecuación.

$$T = m * r_{tamb} * g$$

$$T = 6.5\text{kg} * 0.125\text{m} * 9.81\text{m/s}^2$$

$$T = 8\text{ Nm}$$

Reemplazando el torque en ecuación.

$$T = F_{res} * r_{sprocket}$$

$$F_{res} = \frac{8\text{ Nm}}{0.12\text{m}}$$

$$F_{res} = 66.75\text{ N}$$

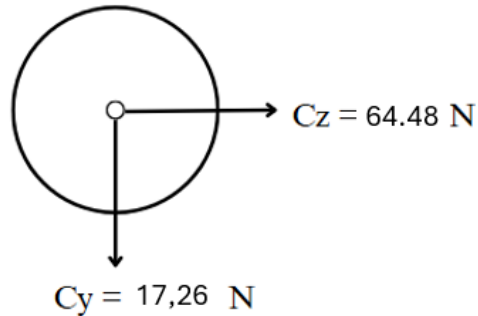
Obtenida la fuerza resultante se traslada en sus componentes al eje.

$$CZ = 66.75 * \cos 15 = 64.48\text{ N}$$

$$CY = 66.75 * \sin 15 = 17.26\text{ N}$$

Figura 18.

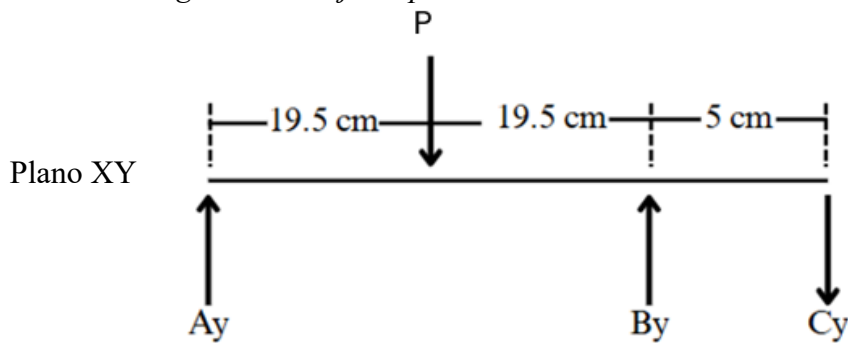
Fuerza ejercida por el sprocket al eje



Establecidas las fuerzas generadas por el sprocket en eje se determinaron las reacciones en los soportes.

Figura 19.

Distribución de la carga sobre el eje en plano XY



La carga uniformemente distribuida se transforma a una carga puntual.

$$P = W * L$$

$$P = 163.5 \frac{N}{m} * 0.39m = 63.765 N$$

Realizando sumatoria momentos en (A) y de fuerzas en (Y).

$$\curvearrowright \sum M_A = 0 \quad (28)$$

$$-P(0.195) + B_y(0.39) - C_y(0.44) = 0$$

$$-63.76(0.195) + B_y(0.39) - 17.26(0.44) = 0$$

$$B_y = 51.35 N$$

$$\sum F_y = 0 \quad (27)$$

$$A_y - P + B_y - C_y = 0$$

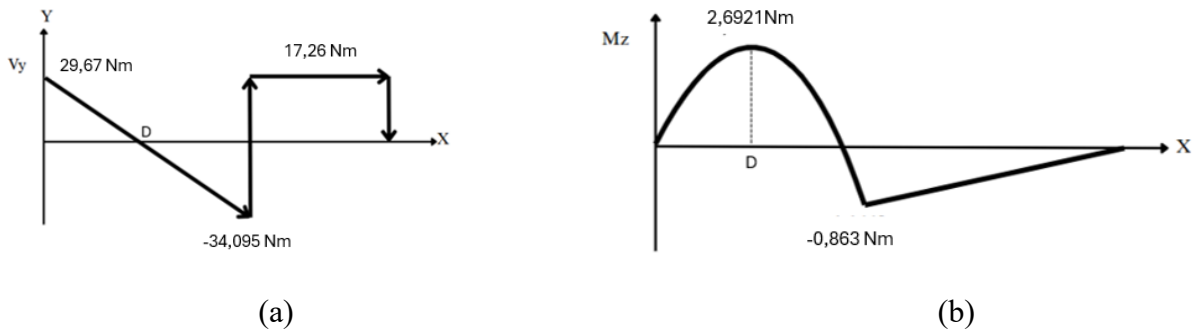
$$A_y = 63.76 - 51.35 + 17.26$$

$$A_y = 29.67N$$

Obtenidas las reacciones se realiza el diagrama cortante y momento flector para determinar el momento máximo y minino.

Figura 20.

Diagramas cortante y flector

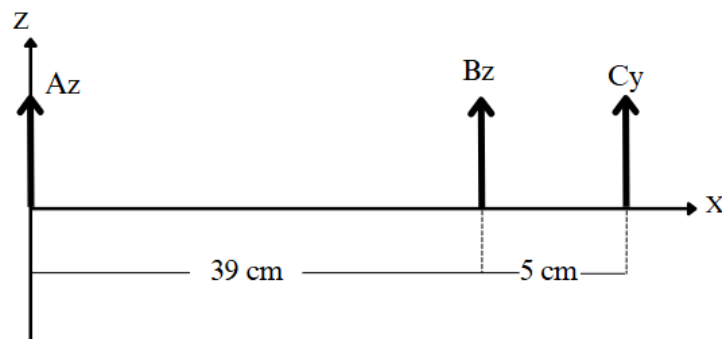


Nota. (a) diagrama cortante. (b) Diagrama flector.

Posteriormente se determinan las fuerzas en el plano XZ realizando una sumatoria de momentos en (A) y de fuerzas en (Z).

Figura 21.

Fuerzas del eje en plano XZ



$$\sum M_A = 0$$

$$B_z(0.39) + C_z(0.44) = 0$$

$$B_z(0.39) + 64.47(0.44) = 0$$

$$B_z = -72.74 \text{ N}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$A_z + B_z + C_z = 0$$

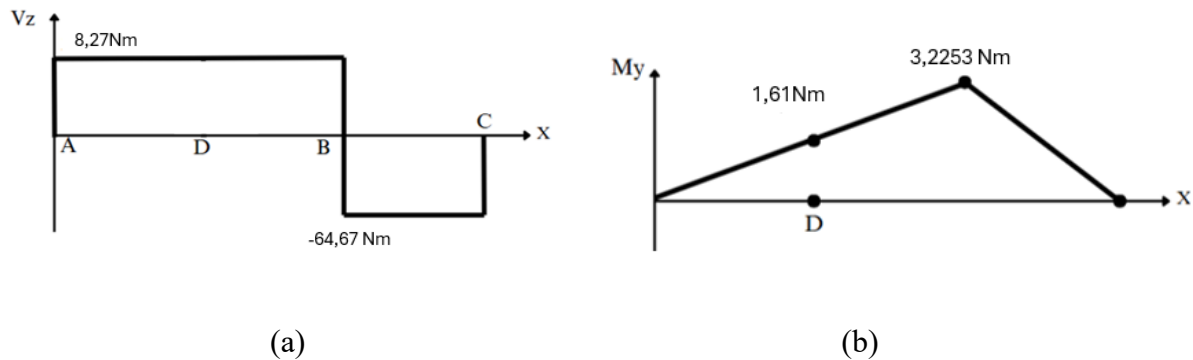
$$A_z + (-72.74) + 64.47 = 0$$

$$A_z = 8.27 \text{ N}$$

Obtenidas las reacciones, se construyen diagramas de cortante y momento flector para determinar el momento máximo y mínimo.

Figura 22.

Diagramas de cortante y momento flector



Nota. (a) diagrama cortante. (b) Diagrama flector.

El punto B es crítico por momento flector a lo largo del eje.

$$M_{\text{Máx.}} = 3.225 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{min}} = 0.863 \text{ Nm}$$

Aplicado el criterio de falla de por fatiga de GOODMAN modificada se estableció el

diámetro mínimo que debe tener el eje.

El material seleccionado es el acero inoxidable 304 debido a que se puede encontrar fácilmente, además de que es de grado alimenticio. A continuación, se muestra la tabla 10 con algunas de las propiedades de este material.

Tabla 10.
Propiedades mecánicas acero 304

Propiedades Mecánicas				
Grado	Resistencia a la tracción Min (Mpa)	Límite de fluencia Min. (Mpa)	Elongación Min (%) en 50 mm)	Dureza Brinell Max
304	515	205	40	201

Nota. Adaptado de *Imporinox*

Seleccionado el material, con la ecuación se determina el diámetro.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

Donde:

n: factor de seguridad 3, se estableció este valor debido a que será operado a altas temperaturas.

Se: El límite de resistencia a la fatiga en las condiciones de uso se calcula con la ecuación

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e$$

Ka: Factor de superficie

$$k_a = a S_{ut}^b$$

El valor de (a) = 4.51 Mpa y b = -0.265 para acabado superficial maquinado o laminado frio, tomados de la tabla 6.2 libro (Shigley, 2011, P.274). (Ver anexo E).

$$k_a = 4.51 * 515^{-0.265}$$

$$k_a = 0.862$$

Kb: Factor de tamaño

Los resultados para flexión y torsión pueden expresarse como:

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad 2.79 \leq d \leq 51mm$$

Kc: Factor de carga

Para cargas de flexión el factor es 1 (Shigley, 2011, P.277).

Kd: Factor de temperatura

La temperatura de operación del eje es alrededor de 250°C, por lo tanto, el factor de Kd es de 1 de acuerdo con la tabla 6-4 (Shigley, 2011, P.278. Anexo F).

Ke: Factor de confiabilidad

Se estableció una de confiabilidad de 99% por lo cual el factor es 0.814 de acuerdo con la tabla 6-5 (Shigley, 2011, P.279. Anexo G)

Kf: factor de efectos varios es igual a 1 ya que el eje no se encuentra expuesto a rozamientos, corrosión o recubrimiento electrolítico.

$$S_e = 0.5S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400Mpa$$

$$S_e = 0.5 * 515 Mpa$$

$$S_e = 257.5 Mpa$$

Por lo tanto, el límite de resistencia a la fatiga en las condiciones de uso es.

$$Se = 0.862 * 1.24d^{-0.107} * 1 * 1 * 0.814 * 1 * 257.5 Mpa$$

$$Se = 224.04d^{-0.107} Mpa$$

Kf: factor de concentración del esfuerzo a la fatiga por flexión.

El valor (Kt) es de 1.7 de acuerdo con la tabla 7-1 (Shigley, 2011, P.356. Apéndice H), (q) es igual a 0.76 con un radio de curvatura 1.5 mm y Sut 515 Mpa.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.76(1.7 - 1)$$

$$K_f \approx 1.532$$

K_f : factor de concentración del esfuerzo a la fatiga por torsión.

El valor (K_{ts}) es de 1.5 de acuerdo con la tabla 7-1 (Shigley, 2011, P.356). “ q_s ” es igual a 0.8 con un radio de curvatura 1.5 mm y Sut 515 Mpa.

$$K_{fS} = 1 + q_s(K_{ts} - 1)$$

$$K_{fS} = 1 + 0.78(1.5 - 1)$$

$$K_{fS} \approx 1.4$$

M_m : Momento flector medio. Donde el momento flector en el punto crítico (B) máximo es 3.225 Nm y mínimo -0.863Nm.

$$M_m = \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2}$$

$$M_m = \frac{3.225 + (-0.863)}{2}$$

$$M_m = 1.181Nm$$

M_a : Momentos flector alternante. Donde el momento flector en el punto crítico (B).

$$M_a = \frac{M_{Max} - M_{Min}}{2}$$

$$M_a = \frac{3.225 - (-0.863)}{2}$$

$$M_a = 2.044Nm$$

T_m : Torque medio. El torque es constante a lo largo de eje debido a que no transmite torque a otros componentes y es igual a 8 Nm.

$$T_m = \frac{T_{Max} + T_{Min}}{2}$$

$$Tm = \frac{8 + 8}{2}$$

$$Tm = 8 Nm$$

Ta: Torque alternante.

$$Ta = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{2}$$

$$Ta = \frac{8 - 8}{2}$$

$$Ta = 0 Nm$$

Finalmente resolviendo la ecuación de GOODMAN modificada se obtuvo.

$$d = \left(\frac{16 \cdot 3}{\pi} \left\{ \frac{1}{224.04 \cdot 10^{-6} d^{-0.107}} [4(1.532 \cdot 2.044)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{515 \cdot 10^{-6}} [4(1.532 \cdot 1.181)^2 + 3(1.4 \cdot 8)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

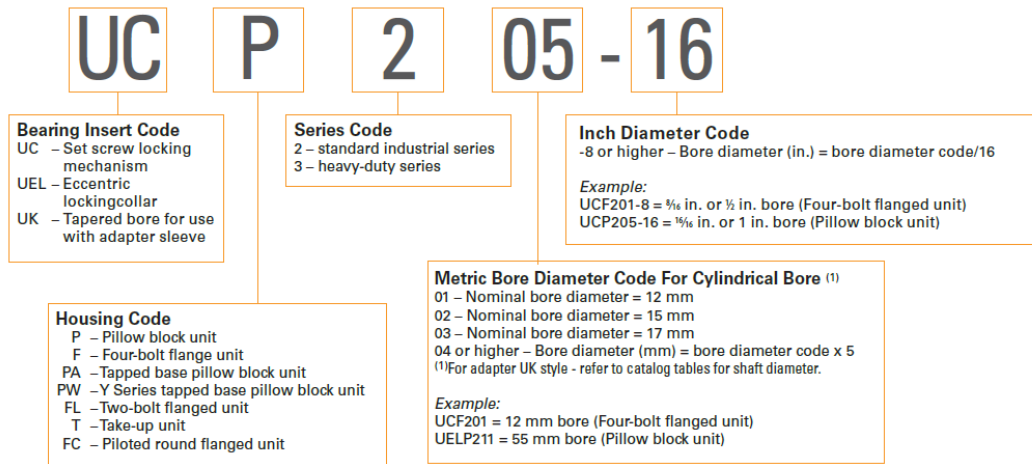
$$d = 0.01085 \cdot 10^{-3} m = 10.85 \approx 11 mm$$

Según los cálculos hechos, un eje de 11mm de diámetro, cumple la función con un factor de seguridad de 3. Sin embargo, dado que el eje debe estar solidario a chumaceras en 2 puntos, se seleccionan en conjunto. Dado el contexto en el que se desarrolla, y los objetivos del proyecto, resulta más fácil y económicamente, conseguir una chumacera y eje de 15mm de diámetro.

4.6 Selección de Otros Componentes

4.6.1 Chumacera

En conjunto con la selección del eje (15 mm de diámetro), se busca en los recursos disponibles el catálogo de un fabricante. Para este ejercicio se ha escogido la empresa Timken, que en su catálogo “Series Ball Bearing Housed Unit Catalog”, guía al usuario en la selección del elemento por medio de la nomenclatura que se muestra a continuación:

Figura 23.*Codificación chumaceras Timken*

Nota. Tomado de *Series ball bearing housed unit catalog* por Timken.

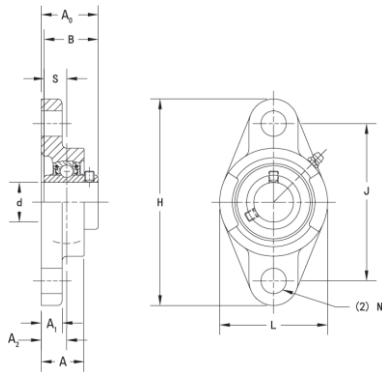
En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de inserto, para lo cual por facilidad de montaje se selecciona el “Mecanismo de bloqueo con tornillo de fijación” (UC). Lo segundo es seleccionar el tipo de alojamiento/housing; dado que este componente se va a disponer en una pared vertical, específicamente en la cara frontal del equipo, a la vez que comparte el espacio con otros componentes, se debe ahorrar el mayor espacio posible. Es por tanto que se selecciona una unidad con brida de 2 pernos (FL). En tercer lugar, se selecciona el tipo de serie, para lo cual se toma la estándar (2). Por último, se selecciona el código correspondiente al diámetro nominal del orificio (02).

De este modo se tiene que la unidad de rodamiento seleccionada en la marca Timken, tiene la nomenclatura UFCL202. El cual tiene las siguientes características:

Tabla 11,

Selección de chumacera Timken

Shaft Dia. d		Two-Bolt Flange Designation	Bearing Designation	Basic Load Ratings		Dimensions										Bolt Size	Wt.
				Dynamic C _r	Static C _{0r}	H	J	A ₁	A	A ₀	L	A ₂	S	B	N		
mm	in.			kN lbs	kN lbs	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.	mm in.
12		UCFL201	UC201														
	½	UCFL201-8	UC201-8														
15		UCFL202	UC202	12.8	6.7	113	90	11	25.5	33.3	60	15	12.7	31.0	12	M10	0.5
	¾	UCFL202-10	UC202-10	2878	1495	4 7/16	3 35/64	7/16	1	1 1/16	2 3/8	1 9/32	0.500	1.220	1 1/2	3/8	1.1
17		UCFL203	UC203														
	¾	UCFL204-12	UC204-12														
20		UCFL204	UC204														



Nota. Se muestra las dimensiones de las chumaceras seleccionadas, así como una imagen del rodamiento. Tomado de *Series ball bearing housed unit catalog* por Timken.

4.7 Construcción y Ensamble

A continuación, se muestra el proceso de construcción y ensamblaje del equipo. Las fotos registran las etapas principales del proceso. La lista de materiales y las piezas se presentan más adelante junto con los planos.

Tabla 12.*Proceso de construcción y ensamblaje*

El bastidor se armó soldando tubos cuadrados de acuerdo con el diseño previsto.

Una vez terminada la estructura, se instalaron las tapas delantera y traseras, que sirven como soporte principal para el tambor.



El tambor se fabricó a partir de una lámina rectangular que fue rolada y unida en sus extremos mediante soldadura. En el interior se colocaron dos soportes en forma de estrella que mantienen el eje en su posición, manteniendo el conjunto solidario al eje.



El tambor se instaló en el lugar previsto dentro de la estructura, alineando el eje con los orificios de las tapas. En cada extremo el eje se apoya dentro de una chumacera, lo que lo fija en su lugar con tornillos prisioneros y permite la rotación.



Se instaló la carcasa interna que cubre el tambor (en medio de estas 2 circulan los gases calientes: fuera del tambor y dentro de la carcasa). Esta pieza incluye el tubo de escape, el cual fue previamente soldado.



Luego de instalar la malla sobre la que ocurre la combustión, y la tapa lateral; se colocó la fibra aislante entre las capas metálicas dispuestas. El aislamiento se instaló en el costado, en la parte trasera y en la parte superior, entre las carcasas. También se llenaron los tubos que forman el bastidor, de manera que se cubriera el mayor espacio posible.



Después de colocar el aislante, se instaló la carcasa externa que cubre la parte superior de la estructura. En esta etapa también se montó la compuerta deslizante, encargada de sellar el hogar.





Para el mecanismo de transmisión de potencia se utilizó un trinquete de rueda libre de bicicleta. En la pista exterior se soldó un sprocket modificado, mientras que en la parte interna se fabricó un buje roscado al trinquete. Este buje incluye un orificio para el eje del tambor y se asegura con un tornillo prisionero.



En el extremo opuesto se instalaron pedales modificados, unidos de forma solidaria a un sprocket. Todo el conjunto se montó sobre una estructura diseñada para fijarse al suelo. Además, se incorporó la cadena y un guarda cadena para seguridad en la operación.



Por último, se montaron los componentes de la tapa frontal. En esta parte se colocó la tolva de entrada del grano, la compuerta de salida, el termómetro y la cuchara para la muestra. Finalmente, toda la estructura se recubrió con pintura resistente a altas temperaturas.

5. Discusión de Resultados

Figura 24.

Montaje del equipo para pruebas.



El prototipo de tostadora de café con combustión a leña y tracción humana fue sometido a dos pruebas experimentales con una carga de 2 kg de grano, cumpliendo con la capacidad de diseño. El equipo se montó como estaba previsto, tal como se muestra en la figura 23.

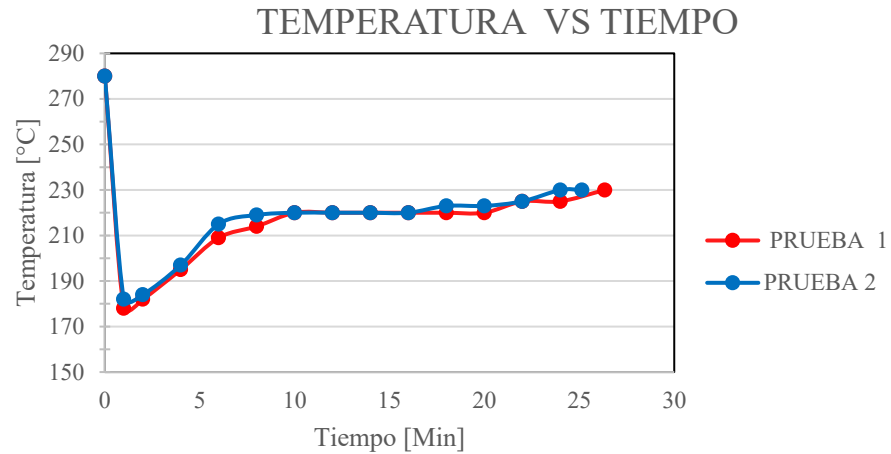
Tabla 13.

Registro de tiempo y temperatura en pruebas

Prueba 1		Prueba 2	
Tiempo (min)	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Temp. (°C)
0	280	0	280
1	178	1	182
2	182	2	184
4	195	4	197

Prueba 1		Prueba 2	
Tiempo (min)	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Temp. (°C)
6	209	6	215
8	214	8	219
10	220	10	220
12	220	12	220
14	220	14	220
16	220	16	220
18	220	18	223
20	220	20	223
22	225	22	225
24	225	24	230
26,35	230	25,14	230

En ambas pruebas se registró la evolución de la temperatura en función del tiempo (Figura 24 y Tabla 13). Se observó una caída inicial rápida desde 280 °C (Precalentamiento) hasta aproximadamente 180 °C (Como se esperaba luego de ingresar la carga de granos), seguido de un aumento gradual hasta los 220 °C durante los primeros 8 minutos, donde hay una estabilización en el rango de 220 – 225 °C entre los 12 y 20 minutos. El tiempo total de tueste fue de 25 a 26 minutos, con una temperatura final cercana a los 230 °C. La tendencia de las curvas sigue la teoría mostrada en la sección 2,3 (Figura 1). Por otra parte, la similitud entre las curvas muestra una adecuada repetibilidad del proceso, lo que muestra consistencia en la transferencia de calor del sistema.

Figura 25.*Grafica temperatura vs tiempo en pruebas*

Las mediciones anteriores fueron tomadas con el termómetro instalado, para ellos se utilizó un termómetro analógico bimetalico (Ver figura 26). Aunque no se dispone de información del fabricante, según catálogos de fabricantes como Wika, para rangos medios de temperatura (0...200°C) sus instrumentos tienen un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Dado que el termómetro instalado tiene mayor rango de temperatura, y los intervalos de la escala son grandes, induce a un error adicional en la lectura.

Figura 26-*Termómetro bimetalico instalado*

El resultado obtenido en el grano fue un tueste uniforme y de color oscuro (Figura 25), esto siguiendo las preferencias de la comunidad de la vereda Suacía, donde se planteó el proyecto. Este aspecto es importante porque muestra que el diseño satisface no solo criterios técnicos, sino también las necesidades culturales y de consumo de los usuarios finales.

Figura 27.

Nivel de tueste final y muestras tomadas durante el proceso



En cuanto al consumo energético, cada prueba requirió aproximadamente 900 g de leña, incluyendo el precalentamiento del sistema. Comparando esto con el método tradicional en Suacía, que se realiza en fogones de leña, en los que se consume aproximadamente 4 kg (Dependiendo de la robustez del fogón) de leña para tostar 2 kg de café. El equipo representa un ahorro del 77,5% en consumo de combustible.

Aunque se había establecido que el tueste podría lograrse con temperaturas de 210–220 °C durante alrededor de 15 minutos y con menor consumo de leña, el proceso experimental tomó un poco más de tiempo (25–26 minutos). Sin embargo, se alcanzó un tostado de buena calidad, lo que sugiere que el sistema aún tiene margen de optimización en eficiencia térmica.

Figura 28.*Consumo de leña*

Durante la operación, el sistema de tracción humana permitió un giro constante del tambor, aunque se presentaron ajustes necesarios debido a la dilatación del metal, ya que redujo la holgura entre el tambor y la cara frontal del equipo. Este aspecto muestra la necesidad de establecer tolerancias mayores en el diseño para compensar efectos térmicos durante la operación.

En comparación con referencias bibliográficas, el prototipo alcanzó resultados similares en cuanto a temperatura y calidad del tostado, pero con un consumo energético relativamente bajo.

Figura 29.*Equipo en operación*

6. Costos de Diseño y Construcción

Al ser Estudiantes de ingeniería usualmente no se cobra como tarifa profesional plena, sino como apoyo de pasantía o práctica. En el mercado colombiano, una práctica de estudiante de ingeniería puede estar entre 1 a 2 salarios mínimos mensuales (SMMLV) → unos \$1.300.000 – \$2.600.000 COP/mes por estudiante.

El director de tesis profesor universitario con PhD puede valorarse por hora. La tarifa de consultoría de un ingeniero con doctorado en Colombia está en un rango de \$120.000 – \$200.000 COP/hora.

Se estima que cada autor dedicó aproximadamente 400 horas al proyecto (unas 10 semanas de trabajo a tiempo completo). Y el director invirtió aproximadamente 50 horas de asesoría directa. Se obtiene costo de tiempo invertido de los autores en el diseño de $400 \text{ h} \times \$7.000 \text{ COP/h} \times 2 = \$5.600.000 \text{ COP}$ y por la asesoría por parte del director: $50 \text{ h} \times \$120.000 \text{ COP/h} = \$6.000.000 \text{ COP}$. Dando un costo total de diseño e ingeniería de = \$11.600.000COP

La fabricación tuvo un costo de 2.401.000 COP (Ver tabla 14), siendo el costo más alto es la mano de obra técnica.

Tabla 14.

Costos de materiales y fabricación

Descripción	Costo (COP)
Lámina galvanizada calibre 16	\$ 55.000
Lámina galvanizada calibre 18	\$ 87.000
Lamina inoxidable calibre 20	\$ 73.000
Lamina inoxidable calibre 14	\$ 195.000

Descripción	Costo (COP)
Tubería de 2"x 2" calibre 18	\$ 37.000
Tubería de 2"x 1"calibre 18	\$ 36.000
Tubería de 2"	\$ 25.000
Barra acero inox Ø15mm	\$ 23.000
Barra acero inox Ø1/4"	\$ 7.000
Platina acero calibre 11	\$ 18.000
Enrolada laminas	\$ 195.000
Cortes laser	\$ 75.000
Bielas y bujes	\$ 55.000
Platos, sproket, cadena	\$ 35.000
tornillería	\$ 15.000
Herramientas	\$ 54.000
Pintura	\$ 36.000
chumaceras	\$ 60.000
Soldadura	\$ 75.000
Lana de roca	\$ 49.000
termómetro	\$ 20.000
Café	\$ 98.000
Mano de obra	\$ 1.000.000
Leña	\$ 15.000
Otros	\$ 63.000
TOTAL	\$ 2.401.000

7. Conclusiones

Se logró diseñar y construir una tostadora de café con capacidad de 2 kg, empleando leña de encenillo como combustible y un sistema de transmisión mecánica por cadena y sproket, demostrando que es posible contar con una alternativa funcional y de bajo costo para operar en comunidades rurales con recursos energéticos limitados.

La revisión bibliográfica inicial permitió establecer parámetros de tiempo y temperatura (210–220 °C durante 15 minutos), los cuales fueron validados en las pruebas experimentales dando como resultado un tiempo aproximado de 26 minutos para lograr el tostado oscuro deseado a una temperatura promedio de 220°C.

El diseño basado en principios teóricos de transferencia de calor y selección de materiales permitió calcular el consumo de leña bajo condiciones ideales, dimensionar la cámara de cocción y garantizar la seguridad estructural de los componentes.

Se desarrolló un proceso de diseño integral, desde la fase conceptual hasta la construcción, que incluyó cálculos de componentes y selección de materiales, logrando un ensamble satisfactorio de la tostadora.

La máquina construida permite reducir aproximadamente un 77,5 % del consumo de combustible en comparación con el método tradicional de tueste de café. Además, disminuye la exposición de las personas al calor y a los gases generados durante el proceso, constituyendo así una alternativa más segura, eficiente, económica y ambientalmente amigable.

Las pruebas evidenciaron que el aislamiento térmico mejora la eficiencia energética del equipo y contribuye a un proceso de tostado más estable y controlado.

8. Recomendaciones

Implementar instrumentos de medición más precisos (sensores de temperatura y humedad) para lograr un mayor control del proceso y estandarización del tueste.

Realizar mejoras en el sistema de aislamiento térmico para reducir pérdidas de calor y aumentar la eficiencia energética de la tostadora.

Desarrollar un mecanismo de agitación adicional que incremente la homogeneidad del tueste, especialmente en cargas máximas.

Explorar la utilización de otros biocombustibles locales o mezclas de leña que permitan mejorar la sostenibilidad y reducir costos de operación.

Considerar, en futuros desarrollos, la integración de sistemas semiautomáticos o híbridos que combinen tracción mecánica con alternativas energéticas renovables.

Referencias

- Bertrand, B., de Kochko, A., Hamon, S., & Dussert, S. (2020). *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*. Wiley-Blackwell.
- Cafestes. (2022). Proceso de tostado del café y sus etapas. Recuperado de <https://cafestes.com/blogs/cafestes-gourmet/proceso-de-tostado-del-cafe>
- Campa, C., Mondolot, L., Rakotondravao, A., & Dussert, S. (2017). "Sustainability in Coffee Roasting: Energy Consumption and Environmental Impact." *Journal of Coffee Research*, 45(3), 234-245.
- Club del Café. (2023). Introducción al proceso de tostado. Recuperado de <https://clubdelcafe.es/blogs/el-club-del-cafe/introduccion-al-proceso-de-tostado>
- CORE. (2012). Propuesta de automatización del proceso de tostación de café. Recuperado de <https://www.core.ac.uk>
- De La Cruz Casaño, R. (2018). Influencia del perfil de tostado del café en la calidad en taza para una tostadora de 2 kg [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4977/T010_20018944_M.pdf?sequence=1
- Despistecafé. (2022). Proceso del tostado del café. Recuperado de <https://despistecafe.es/proceso-del-tostado-de-cafe>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2015). Aspectos de la Calidad del café para la Industria torrefactora nacional. Obtenido de <http://documents.mx/documents/vademecum-del-tostador-colombiano.html>
- Gómez Posada, C. (2018). Producción y economía del café en Colombia. Universidad Nacional

de Colombia.

Gómez Posada, S. (13 de noviembre de 2018). Los 10 mayores productores de café del mundo – 2019. Obtenido de <https://quecafe.info/mayoresproductores-de-cafe-en-el-mundo>

Gómez Rísquez, J. (2021). Máquina de tostar café para uso doméstico (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Illy, A., & Viani, R. (2005). Espresso coffee: The science of quality (2nd ed.). Academic Press.

Méndez Parra, R., Carmona Tabares, P& Molina Díaz, O. (2019) Calidad en taza de algunas variedades de café de la especie *coffea arabica* l. Revista de Investigaciones Universidad del Quindío. Vol 31, pp.54-61.

Mills, A. F. (1995). TRANSFERENCIA DE CALOR.

Montilla, J., Arcila, J., Aristizábal, M., Montoya, E. C., Puerta, G. I., Oliveros, C. E., & Cadena, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional.

Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. Food and Bioprocess Technology, 4(5), 661-672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>

Noesis. (2021). Diseño y construcción de una tostadora de café por lecho fluidizado. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co>

Osorio, V., Pabón, J., Gallego, C.P., & Echeverri, L.F. (2021). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café *Revista Cenicafé*, 72(1), e72103.

Pendergrast, M. (2010). Uncommon grounds: The history of coffee and how it transformed our world (Revised ed.). Basic Books.

Pozo Enríquez, J. P., & Mosquera, G. (2015). Diseño y construcción de un tostador por resistencias eléctricas para la elaboración de café de quinua con capacidad de 25 libras. Repositorio

UTN. Recuperado 10 de febrero de 2025, de <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7524/2/04%20MEC%20114%20ARTICULO.pdf>

Ramírez, et al. Análisis del tostado del grano de café. *Revista de Ingeniería Industrial*. 2019 3-10: 1-16

REYES MAYEN, R. (2015). Diseño de una planta de café tostado y molido [Tesis de grado, Universidad De San Carlos De Guatemala]. <https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/T6180>

Rivera Serna, J. S. (2017). Estudio de la influencia del método de Tostión en la calidad sensorial del café [Tesis de especialización en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59586>

Tituana Asanza, J. C. (2023). Diseño y construcción de una tostadora de café semiautomática con una capacidad de 8 kg [Tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador]. <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6518?locale=es>

WIKA. (2022, octubre). *WIKA data sheet TM 58.01: Bimetal thermometer for sanitary applications* (ds_tm5801_en_co). WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG. https://www.wika.com/media/Data-sheets/Temperature/Dial-thermometers/ds_tm5801_en_co.pdf

Apéndices

Apéndice A. *Tablas de propiedades de gases ideales.*

TABLA A-18

Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N_2 (conclusión)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,378	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799
1480	46,377	34,071	241.301	2600	86,650	65,033	261.512
1500	47,073	34,601	241.768	2650	88,488	66,455	262.213
1520	47,771	35,133	242.228	2700	90,328	67,880	262.902
1540	48,470	35,665	242.685	2750	92,171	69,306	263.577
1560	49,168	36,197	243.137	2800	94,014	70,734	264.241
1580	49,869	36,732	243.585	2850	95,859	72,163	264.895
1600	50,571	37,268	244.028	2900	97,705	73,593	265.538
1620	51,275	37,806	244.464	2950	99,556	75,028	266.170
1640	51,980	38,344	244.896	3000	101,407	76,464	266.793
1660	52,686	38,884	245.324	3050	103,260	77,902	267.404
1680	53,393	39,424	245.747	3100	105,115	79,341	268.007
1700	54,099	39,965	246.166	3150	106,972	80,782	268.601
1720	54,807	40,507	246.580	3200	108,830	82,224	269.186
1740	55,516	41,049	246.990	3250	110,690	83,668	269.763

Fuente: Las tablas A-18 a A-25 fueron adaptadas de Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1983, pp. 787-798. Publicadas originalmente en JANAF, *Thermochemical Tables*, NSRDS-NBS-37, 1971.

TABLA A-19

Propiedades de gas ideal del oxígeno, O₂ (conclusión)

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
1000	31,389	23,075	243.471	1760	58,880	44,247	263.861
1020	32,088	23,607	244.164	1780	59,624	44,825	264.283
1040	32,789	24,142	244.844	1800	60,371	45,405	264.701
1060	33,490	24,677	245.513	1820	61,118	45,986	265.113
1080	34,194	25,214	246.171	1840	61,866	46,568	265.521
1100	34,899	25,753	246.818	1860	62,616	47,151	265.925
1120	35,606	26,294	247.454	1880	63,365	47,734	266.326
1140	36,314	26,836	248.081	1900	64,116	48,319	266.722
1160	37,023	27,379	248.698	1920	64,868	48,904	267.115
1180	37,734	27,923	249.307	1940	65,620	49,490	267.505
1200	38,447	28,469	249.906	1960	66,374	50,078	267.891
1220	39,162	29,018	250.497	1980	67,127	50,665	268.275
1240	39,877	29,568	251.079	2000	67,881	51,253	268.655
1260	40,594	30,118	251.653	2050	69,772	52,727	269.588
1280	41,312	30,670	252.219	2100	71,668	54,208	270.504
1300	42,033	31,224	252.776	2150	73,573	55,697	271.399
1320	42,753	31,778	253.325	2200	75,484	57,192	272.278
1340	43,475	32,334	253.868	2250	77,397	58,690	273.136
1360	44,198	32,891	254.404	2300	79,316	60,193	273.991
1380	44,923	33,449	254.932	2350	81,243	61,704	274.809
1400	45,648	34,008	255.454	2400	83,174	63,219	275.625
1420	46,374	34,567	255.968	2450	85,112	64,742	276.424
1440	47,102	35,129	256.475	2500	87,057	66,271	277.207
1460	47,831	35,692	256.978	2550	89,004	67,802	277.979
1480	48,561	36,256	257.474	2600	90,956	69,339	278.738
1500	49,292	36,821	257.965	2650	92,916	70,883	279.485
1520	50,024	37,387	258.450	2700	94,881	72,433	280.219
1540	50,756	37,952	258.928	2750	96,852	73,987	280.942
1560	51,490	38,520	259.402	2800	98,826	75,546	281.654
1580	52,224	39,088	259.870	2850	100,808	77,112	282.357
1600	52,961	39,658	260.333	2900	102,793	78,682	283.048
1620	53,696	40,227	260.791	2950	104,785	80,258	283.728
1640	54,434	40,799	261.242	3000	106,780	81,837	284.399
1660	55,172	41,370	261.690	3050	108,778	83,419	285.060
1680	55,912	41,944	262.132	3100	110,784	85,009	285.713
1700	56,652	42,517	262.571	3150	112,795	86,601	286.355
1720	57,394	43,093	263.005	3200	114,809	88,203	286.989
1740	58,136	43,669	263.435	3250	116,827	89,804	287.614

TABLA A-20

Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO₂ (conclusión)

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
1000	42,769	34,455	269.215	1760	86,420	71,787	301.543
1020	43,859	35,378	270.293	1780	87,612	72,812	302.217
1040	44,953	36,306	271.354	1800	88,806	73,840	302.884
1060	46,051	37,238	272.400	1820	90,000	74,868	303.544
1080	47,153	38,174	273.430	1840	91,196	75,897	304.198
1100	48,258	39,112	274.445	1860	92,394	76,929	304.845
1120	49,369	40,057	275.444	1880	93,593	77,962	305.487
1140	50,484	41,006	276.430	1900	94,793	78,996	306.122
1160	51,602	41,957	277.403	1920	95,995	80,031	306.751
1180	52,724	42,913	278.361	1940	97,197	81,067	307.374
1200	53,848	43,871	297.307	1960	98,401	82,105	307.992
1220	54,977	44,834	280.238	1980	99,606	83,144	308.604
1240	56,108	45,799	281.158	2000	100,804	84,185	309.210
1260	57,244	46,768	282.066	2050	103,835	86,791	310.701
1280	58,381	47,739	282.962	2100	106,864	89,404	312.160
1300	59,522	48,713	283.847	2150	109,898	92,023	313.589
1320	60,666	49,691	284.722	2200	112,939	94,648	314.988
1340	61,813	50,672	285.586	2250	115,984	97,277	316.356
1360	62,963	51,656	286.439	2300	119,035	99,912	317.695
1380	64,116	52,643	287.283	2350	122,091	102,552	319.011
1400	65,271	53,631	288.106	2400	125,152	105,197	320.302
1420	66,427	54,621	288.934	2450	128,219	107,849	321.566
1440	67,586	55,614	289.743	2500	131,290	110,504	322.808
1460	68,748	56,609	290.542	2550	134,368	113,166	324.026
1480	66,911	57,606	291.333	2600	137,449	115,832	325.222
1500	71,078	58,606	292.114	2650	140,533	118,500	326.396
1520	72,246	59,609	292.888	2700	143,620	121,172	327.549
1540	73,417	60,613	292.654	2750	146,713	123,849	328.684
1560	74,590	61,620	294.411	2800	149,808	126,528	329.800
1580	76,767	62,630	295.161	2850	152,908	129,212	330.896
1600	76,944	63,741	295.901	2900	156,009	131,898	331.975
1620	78,123	64,653	296.632	2950	159,117	134,589	333.037
1640	79,303	65,668	297.356	3000	162,226	137,283	334.084
1660	80,486	66,592	298.072	3050	165,341	139,982	335.114
1680	81,670	67,702	298.781	3100	168,456	142,681	336.126
1700	82,856	68,721	299.482	3150	171,576	145,385	337.124
1720	84,043	69,742	300.177	3200	174,695	148,089	338.109
1740	85,231	70,764	300.863	3250	177,822	150,801	339.069

TABLA A-22

Propiedades de gas ideal del hidrógeno, H₂

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol - K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol - K
0	0	0	0	1440	42,808	30,835	177.410
260	7,370	5,209	126.636	1480	44,091	31,786	178.291
270	7,657	5,412	127.719	1520	45,384	32,746	179.153
280	7,945	5,617	128.765	1560	46,683	33,713	179.995
290	8,233	5,822	129.775	1600	47,990	34,687	180.820
298	8,468	5,989	130.574	1640	49,303	35,668	181.632
300	8,522	6,027	130.754	1680	50,622	36,654	182.428
320	9,100	6,440	132.621	1720	51,947	37,646	183.208
340	9,680	6,853	134.378	1760	53,279	38,645	183.973
360	10,262	7,268	136.039	1800	54,618	39,652	184.724
380	10,843	7,684	137.612	1840	55,962	40,663	185.463
400	11,426	8,100	139.106	1880	57,311	41,680	186.190
420	12,010	8,518	140.529	1920	58,668	42,705	186.904
440	12,594	8,936	141.888	1960	60,031	43,735	187.607
460	13,179	9,355	143.187	2000	61,400	44,771	188.297
480	13,764	9,773	144.432	2050	63,119	46,074	189.148
500	14,350	10,193	145.628	2100	64,847	47,386	189.979
520	14,935	10,611	146.775	2150	66,584	48,708	190.796
560	16,107	11,451	148.945	2200	68,328	50,037	191.598
600	17,280	12,291	150.968	2250	70,080	51,373	192.385
640	18,453	13,133	152.863	2300	71,839	52,716	193.159
680	19,630	13,976	154.645	2350	73,608	54,069	193.921
720	20,807	14,821	156.328	2400	75,383	55,429	194.669
760	21,988	15,669	157.923	2450	77,168	56,798	195.403
800	23,171	16,520	159.440	2500	78,960	58,175	196.125
840	24,359	17,375	160.891	2550	80,755	59,554	196.837
880	25,551	18,235	162.277	2600	82,558	60,941	197.539
920	26,747	19,098	163.607	2650	84,368	62,335	198.229
960	27,948	19,966	164.884	2700	86,186	63,737	198.907
1000	29,154	20,839	166.114	2750	88,008	65,144	199.575
1040	30,364	21,717	167.300	2800	89,838	66,558	200.234
1080	31,580	22,601	168.449	2850	91,671	67,976	200.885
1120	32,802	23,490	169.560	2900	93,512	69,401	201.527
1160	34,028	24,384	170.636	2950	95,358	70,831	202.157
1200	35,262	25,284	171.682	3000	97,211	72,268	202.778
1240	36,502	26,192	172.698	3050	99,065	73,707	203.391
1280	37,749	27,106	173.687	3100	100,926	75,152	203.995
1320	39,002	28,027	174.652	3150	102,793	76,604	204.592
1360	40,263	28,955	175.593	3200	104,667	78,061	205.181
1400	41,530	29,889	176.510	3250	106,545	79,523	205.765

TABLA A-23

Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H₂O (conclusión)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
1000	35,882	27,568	232.597	1760	70,535	55,902	258.151
1020	36,709	28,228	233.415	1780	71,523	56,723	258.708
1040	37,542	28,895	234.223	1800	72,513	57,547	259.262
1060	38,380	29,567	235.020	1820	73,507	58,375	259.811
1080	39,223	30,243	235.806	1840	74,506	59,207	260.357
1100	40,071	30,925	236.584	1860	75,506	60,042	260.898
1120	40,923	31,611	237.352	1880	76,511	60,880	261.436
1140	41,780	32,301	238.110	1900	77,517	61,720	261.969
1160	42,642	32,997	238.859	1920	78,527	62,564	262.497
1180	43,509	33,698	239.600	1940	79,540	63,411	263.022
1200	44,380	34,403	240.333	1960	80,555	64,259	263.542
1220	45,256	35,112	241.057	1980	81,573	65,111	264.059
1240	46,137	35,827	241.773	2000	82,593	65,965	264.571
1260	47,022	36,546	242.482	2050	85,156	68,111	265.838
1280	47,912	37,270	243.183	2100	87,735	70,275	267.081
1300	48,807	38,000	243.877	2150	90,330	72,454	268.301
1320	49,707	38,732	244.564	2200	92,940	74,649	269.500
1340	50,612	39,470	245.243	2250	95,562	76,855	270.679
1360	51,521	40,213	245.915	2300	98,199	79,076	271.839
1380	52,434	40,960	246.582	2350	100,846	81,308	272.978
1400	53,351	41,711	247.241	2400	103,508	83,553	274.098
1420	54,273	42,466	247.895	2450	106,183	85,811	275.201
1440	55,198	43,226	248.543	2500	108,868	88,082	276.286
1460	56,128	43,989	249.185	2550	111,565	90,364	277.354
1480	57,062	44,756	249.820	2600	114,273	92,656	278.407
1500	57,999	45,528	250.450	2650	116,991	94,958	279.441
1520	58,942	46,304	251.074	2700	119,717	97,269	280.462
1540	59,888	47,084	251.693	2750	122,453	99,588	281.464
1560	60,838	47,868	252.305	2800	125,198	101,917	282.453
1580	61,792	48,655	252.912	2850	127,952	104,256	283.429
1600	62,748	49,445	253.513	2900	130,717	106,605	284.390
1620	63,709	50,240	254.111	2950	133,486	108,959	285.338
1640	64,675	51,039	254.703	3000	136,264	111,321	286.273
1660	65,643	51,841	255.290	3050	139,051	113,692	287.194
1680	66,614	52,646	255.873	3100	141,846	116,072	288.102
1700	67,589	53,455	256.450	3150	144,648	118,458	288.999
1720	68,567	54,267	257.022	3200	147,457	120,851	289.884
1740	69,550	55,083	257.589	3250	150,272	123,250	290.756

Apéndice B. *Caracterización de la madera*

Característica	Muestra						
	1	2	3	4	5	6	7
Nombre	Eucalipto	Duraznillo	Encenillo	Arboloco	Pino	Acacio	Retal
Humedad (%)	8,44	9,47	9,35	8,72	10,28	11,08	9,77
Volátiles (%)	84	88	91,4	86	91	87	90
Análisis elemental							
%C	43,2	42,7	41,67	41,87	43,35	42,78	41,62
%H	5,992	5,65	5,67	5,73	6,4	5,71	6,35
%N	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,93
%O	50,808	51,65	52,66	52,4	50,25	51,51	48,1
PCS según Doulong (kJ/kg)	142209	13407,55	12877,1	13083,6	14939,7	13524,4	14660,2
PCS según datos Ingeominas (kJ/kg)	18605	18020	17953	17750	18938	18621	17929

Apéndice C. Propiedades del agua saturada.

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Apéndice D. *Valores de K, longitud de cadena*

Tabla de los valores de K según sea la cantidad D

D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K	D	K		
1	0.03	25	15.83	49	60.82	73	134.99	97	238.33	121	370.86	145	532.57	169	723.46
2	0.10	26	17.12	50	63.33	74	138.71	98	243.27	122	377.02	146	539.94	170	732.05
3	0.23	27	18.47	51	65.88	75	142.84	99	248.26	123	383.22	147	547.36	171	740.60
4	0.41	28	19.86	52	68.49	76	146.31	100	253.30	124	389.48	148	554.83	172	749.37
5	0.63	29	21.30	53	71.15	77	150.18	101	258.39	125	395.79	149	562.36	173	758.11
6	0.91	30	22.80	54	73.86	78	154.11	102	263.54	126	402.14	150	569.93	174	766.90
7	1.24	31	24.34	55	76.62	79	158.09	103	268.73	127	408.55	151	577.53	175	775.74
8	1.62	32	25.94	56	79.44	80	162.11	104	273.97	128	415.01	152	585.23	176	784.63
9	2.05	33	27.58	57	82.30	81	166.19	105	279.27	129	421.52	153	592.96	177	793.57
10	2.53	34	28.28	58	85.21	82	170.32	106	284.67	130	428.08	154	600.73	178	802.57
11	3.06	35	31.03	59	88.17	83	174.50	107	290.01	131	434.69	155	608.56	179	811.61
12	3.65	36	32.83	60	91.19	84	178.73	108	295.45	132	441.36	156	616.44	180	820.70
13	4.28	37	34.68	61	94.25	85	183.01	109	300.95	133	448.07	157	624.37	181	829.85
14	4.96	38	36.58	62	97.37	86	187.34	110	306.50	134	454.83	158	632.35	182	839.04
15	5.70	39	38.53	63	100.54	87	191.73	111	312.09	135	461.64	159	640.38	183	848.29
16	6.48	40	40.53	64	103.75	88	196.16	112	317.74	136	468.51	160	648.46	184	857.58
17	7.31	41	42.58	65	107.02	89	200.64	113	323.44	137	475.42	161	656.59	185	866.93
18	8.21	42	44.68	66	110.34	90	205.18	114	329.19	138	482.39	162	664.77		
19	9.14	43	46.84	67	113.71	91	209.76	115	334.99	139	489.41	163	673.00		
20	10.13	44	49.04	68	117.13	92	214.40	116	340.84	140	496.47	164	681.28		
21	11.17	45	51.29	69	120.60	93	219.08	117	346.75	141	503.59	165	689.62		
22	12.26	46	53.60	70	124.12	94	223.82	118	352.70	142	510.76	166	698.00		
23	13.40	47	55.95	71	127.69	95	228.61	119	358.70	143	517.98	167	706.44		
24	14.59	48	58.36	72	131.31	96	233.44	120	364.76	144	525.25	168	714.92		

Apéndice E. *Factor de superficie*

Acabado superficial	Factor a		Exponente <i>b</i>
	S_{utr} kpsi	S_{utr} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

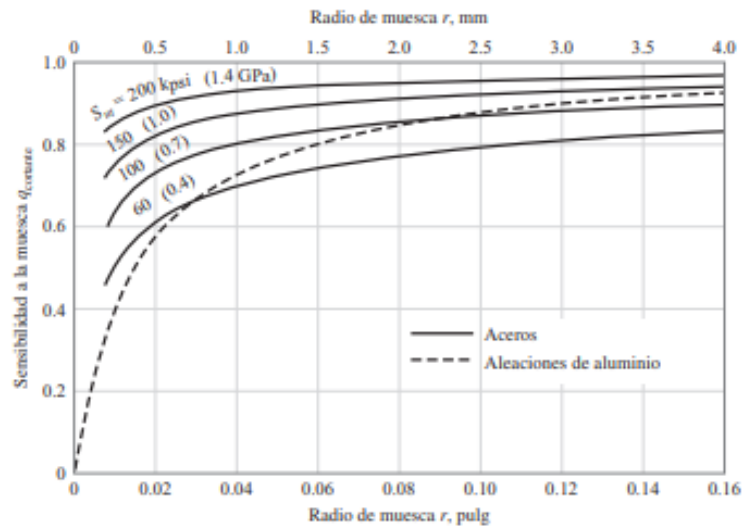
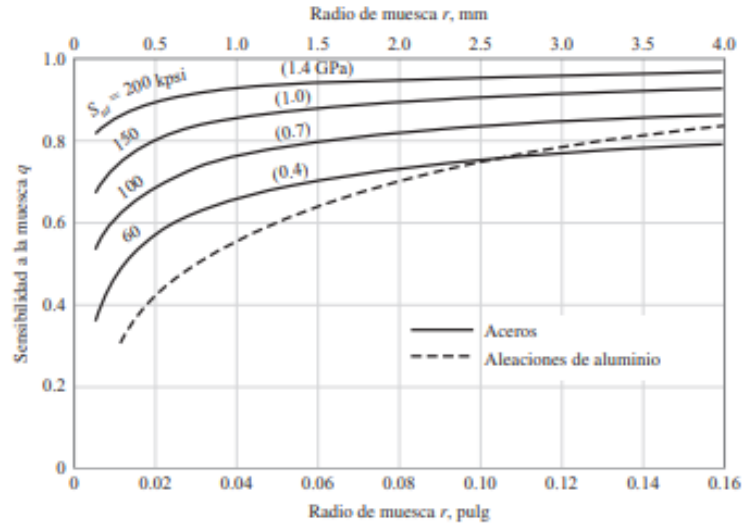
Apéndice F. *Factor de temperatura*

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Apéndice G. *Factor de confiabilidad*

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_α	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Apéndice H. Factor de esfuerzos varios



	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.14	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Apéndice I. Planos