

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TOSTADORA DE CAFÉ

ORLANDO JOSÉ MORENO URIBE
JHOAN SEBASTIAN SERRANO HOYOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA

2025

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TOSTADORA DE CAFÉ

ORLANDO JOSÉ MORENO URIBE

JHOAN SEBASTIAN SERRANO HOYOS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

RICARDO ALFONSO JAIMES ROLON

M. Sc. Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2025

AGRADECIMIENTOS

Con toda mi estima y eterno agradecimiento quiero reconocer a cada una de las personas que hicieron parte de esta maravillosa etapa.

A cada uno de los docentes, técnicos y operarios que con esmero forman tanto académica como personalmente a cada uno de los educandos.

A nuestro director de Tesis el Dr. Ricardo Jaimes “Richi “como de cariño se le reconoce en los pacillos de nuestra escuela, por su sabiduría y permanente apoyo durante la elaboración de la tesis y a lo largo de la carrera. Por ser un profesional ejemplar y con una extraordinaria vocación.

A mi compañero de tesis Orlando José Moreno Uribe por su amistad, constancia y dedicación que hoy se ven reflejados en la culminación de nuestra tesis de grado.

A mi esposa Diana Patricia Villamizar Vargas por su amor incondicional, por creer en mí y caminar a mi lado en cada proyecto o meta que trazo en mi vida.

A mi hermano Javier Eduardo Serrano Hoyos por darme cada día una razón para ser mejor persona y un ejemplo para su vida, por confiar y creer en mí.

A mis padres Cesar Serrano Díaz y Fanny Hoyos Duran por su infinito amor, por su apoyo y guía incondicional, por su dedicación e incontables sacrificios. A ellos por ser los mejores padres y educar desde el ejemplo, gracias por siempre dar lo mejor de cada uno de ustedes y brindarme todas las oportunidades para ser el hombre que hoy día soy. Gracias por que sin ustedes nada de esto sería posible.

Jhoan Sebastián Serrano Hoyos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por haberme puesto a las personas que conocí a lo largo de esta etapa de mi vida, las cuales me ayudaron en gran parte a llegar hasta aquí.

Quiero también agradecer especialmente a mis padres Orlando Moreno Rivera y Nory Cecilia Uribe Quiroga, los cuales siempre estuvieron en los momentos más difíciles que con su dedicación y apoyo incondicional me ayudaron a salir adelante.

Un agradecimiento muy especial a nuestro director de Tesis el profesor Ricardo Alfonso Jaimes Rolón, por su apoyo en la realización de este proyecto, enseñándonos los pasos a seguir para que todo saliera de la mejor manera y poder concluir con un excelente proyecto.

Y gracias a todos mis compañeros que estuvieron desde primer semestre y pasamos momentos muy buenos a lo largo de toda nuestra etapa universitaria.

Orlando José Moreno Uribe

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCION	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. EL CAFÉ.....	19
2.1 El café.....	19
2.1.1 Origen del café.....	19
2.2 Estructura del fruto de café.	19
2.2.1 Propiedades físicas del café.	20
2.3 Tueste de café.	21
2.3.1 Fases del proceso de Tostado.....	22
2.3.2 Tipos de Tueste.	22
2.3.3 Factores que intervienen en el tostado de café.	23
3 CONCEPCION DE DISEÑO	25
3.1 Requerimientos de Diseño	25
3.2 Planteamiento de alternativas.....	26
3.2.1 Tostadora de Tambor Rotativo.	26

3.2.2 Tostadora de Tambor Rotativo con Flujo de Aire.....	27
3.2.3 Tostadora de Lecho Fluido.....	27
3.3 Evaluación de alternativa.	29
3.4 Descripción de la máquina.	30
3.4.1 Subsistemas de la máquina.	30
4 DISEÑO COMPARTIMIENTO DEL PROCESO DE TUESTE	33
4.1 Dimensionamiento Cámara de tostado.....	34
4.2 Cálculo espesor de lámina.....	37
4.3 Simulación cámara de tostado.....	40
4.3.1 Análisis de esfuerzos en la cámara de tostado.....	40
5 DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA	43
5.1 Cálculo Potencia del Motorreductor.....	44
5.1.1 Cálculo Inercias del sistema.	45
5.1.2 Cálculo de Momentos del sistema.	46
5.1.3 Dimensionamiento del Motorreductor.	47
5.1.4 Selección Caja Reductora.....	49
5.2 Diseño y selección de la transmisión de potencia por cadena.....	51
5.2.1 Cálculo de la distancia entre centros y longitud de cadena.	53
5.2.2 Cálculo ángulo de contacto piñón-cadena.	55

5.2.3 Cálculo de fuerzas en la cadena.....	56
5.3 Diseño del eje motriz.....	58
5.3.1 Análisis estático cámara de tostado – eje motriz.	58
5.3.2 Análisis estático del eje motriz.	60
5.3.3 Cálculo del eje en su punto crítico.	62
5.4 Selección de rodamientos.....	64
5.4.1 Cálculo del rodamiento en función de su vida nominal.	66
5.5 Dimensionamiento general del eje.....	68
6.5.1 Resultados del eje.	69
5.6 Dimensionamiento de los chaveteros.	69
5.6.1 Datos de las cuñas.	71
5.7 Simulación eje motriz.	72
6. DISEÑO DEL SISTEMA DE QUEMADORES	76
6.1 Temperaturas y calores de la máquina.....	77
6.1.1 Calculo de calor perdido hacia el exterior.	77
6.1.2 Calculo del calor aprovechado.....	81
6.1.3 Energía requerida para el tueste de los granos de café.	84
6.2 Diseño de los quemadores	86
6.3 Sistema de alimentación de combustible.....	87

7. DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL	88
7.1. Descripción del funcionamiento de la maquina tostadora de café.	88
7.2. Selección de componentes principales del tablero de control.....	91
7.3 Montaje tablero de control.....	92
7.4 Programación LOGO 230RC.	94
8. CONSTRUCCION Y PRUEBAS	95
8.1 Elaboración de planos.	95
8.2 Construcción del prototipo.	96
8.3 Pruebas del modelo.	97
8.3.1 Funcionamiento sin carga.	97
8.3.2. Funcionamiento con producto.....	98
8.4. Resultados.	99
9. ANALISIS DE COSTOS	101
9.1. Costos del Proyecto.....	101
9.2. Comparación con máquinas tostadoras de café en el mercado.	104
CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFIA	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura y partes del grano de café.	20
Figura 2. Fases del proceso de Tostado.....	22
Figura 3. Escala Agtron.	23
Figura 4. Tostadora de Tambor Rotativo.	26
Figura 5. Tostadora de Tambor Rotativo con Flujo de Aire.	27
Figura 6. Tostadora de Lecho Fluido.	28
Figura 7. Maquina Tostadora de Café modelo CAD.	30
Figura 8. Sistema de Alimentación.	31
Figura 9. Compartimiento del Proceso de Tostado.....	31
Figura 10. Vista frontal cámara de tostado.	31
Figura 11. Sistema de Transmisión de Potencia.....	32
Figura 12. Quemadores.	32
Figura 13. Esquema Cámara de Tostado.	33
Figura 14. Distribución y Unión de los Volantes a las aspas.	34
Figura 15. Cilindro Tostador debidamente dimensionado.....	37
Figura 16. Esquema Área Proyectada.	38
Figura 17. Resultados Cálculos de los Esfuerzos en el Cilindro Tostador.	40
Figura 18. Grafica de esfuerzos en la cámara de tostado.	41
Figura 19. Grafica de desplazamientos en la cámara de tostado.	42
Figura 20. Elementos que constituyen el sistema transmisor de potencia.....	43
Figura 21. Elementos sistema de inercias a calcular.	45

Figura 22. Selección Motor eléctrico.....	48
Figura 23. Selección de relación de velocidad optima en caja reductora NMRV40.	50
Figura 24. Esquema cinemático de la transmisión de potencia.	51
Figura 25. Esquema de la transmisión por cadena.....	55
Figura 26. Transmisión de potencia por cadena diseñada.	56
Figura 27. Cargas ejercidas por la cadena.	57
Figura 28. Distribución del eje motriz con sus elementos asociados.....	58
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de la cámara de tostado.	59
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz.	60
Figura 31. Diagrama de fuerzas cortantes.....	61
Figura 32. Diagrama de momento flexionante.	61
Figura 33. Rodamiento de bolas seleccionado.	66
Figura 34. Dimensiones del eje motriz.....	69
Figura 35. Grafica de esfuerzos en el eje motriz.....	73
Figura 36. Grafica de desplazamientos en el eje motriz	74
Figura 37. Grafica del factor de seguridad del eje motriz.....	75
Figura 38. Sistema de quemadores.....	76
Figura 39. Flujos de calor en la maquina tostadora de café.	77
Figura 40. Capas del sistema para flujo de calor perdido al exterior.	78
Figura 41. Red de resistencias térmicas para el flujo de calor perdido.....	79
Figura 42. Capas del sistema para el flujo de calor aprovechado.....	81
Figura 43. Red de resistencias térmicas para el flujo de calor aprovechado.	82
Figura 44. Distribución de los quemadores en la máquina.	86

Figura 45. Distancia entre quemador y cámara de tostado.	87
Figura 46. Elementos suministro de combustible.....	87
Figura 47. Diagrama de flujo general de la máquina.	89
Figura 48. Diagrama de flujo modo manual de la máquina.....	90
Figura 49. Diagrama de flujo modo automático de la máquina.	91
Figura 50. Posicionamiento pulsadores y componentes del tablero de control.	93
Figura 51. Conexiones eléctricas de la caja de control.....	93
Figura 52. Esquema eléctrico del tablero de control.....	94
Figura 53. Planos técnicos de la maquina tostadora de café.....	95
Figura 54. Prototipo maquina tostadora de café construido.....	96
Figura 55. Tanda de café pergamino para pruebas.	98
Figura 56. Muestra de café tostado.	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades Físicas del café.	21
Tabla 2. Tabla Comparativa de Ventajas y Desventajas.	28
Tabla 3. Evaluación de Alternativas.	29
Tabla 4. Tabla de Iteración de Valores de r y h.	36
Tabla 5. Cálculo del Momento de torsión.	47
Tabla 6. Calculo ángulos de contacto de cada piñón.	55
Tabla 7. Calculo límite de resistencia a la fatiga.	63
Tabla 8. Calculo diámetro del eje en el punto crítico.	64
Tabla 9. Calculo de diámetros por secciones.	68
Tabla 10. Referencias de cuñas cuadradas.	70
Tabla 11. Calculo longitud mínima del chavetero de la horquilla.	71
Tabla 12. Calculo longitud mínima del chavetero del sprocket.	72
Tabla 13. Distancias y Áreas del sistema para flujo al exterior.	80
Tabla 14. Coeficientes del sistema para flujo al exterior.	80
Tabla 15. Distancias y Áreas del sistema para flujo aprovechado.	83
Tabla 16. Coeficientes del sistema para flujo aprovechado.	83
Tabla 17. Prueba de funcionamiento automático sin carga.	97
Tabla 18. Prueba de funcionamiento manual sin carga.	97
Tabla 19. Prueba de funcionamiento manual y automática con carga.	98
Tabla 20. Costos de materiales de fabricación.	101
Tabla 21. Costos de manufactura de la maquina tostadora.	102

Tabla 22. Costos correspondientes a trabajadores.....	103
Tabla 23. Costos de licencias y gastos varios.	103
Tabla 24. Costos totales del proyecto.....	104

RESUMEN

Título: Diseño y construcción de una maquina tostadora de café¹

Autores: Orlando José Moreno Uribe, Jhoan Sebastián Serrano Hoyos

Palabras Clave: Grano de café, Proceso de tostado, Maquina tostadora de café, Diseño.

Descripción: En el presente trabajo de grado se evidencia el proceso realizado en el diseño y construcción de una maquina tostadora de café con capacidad de 10 Kg de producto, la cual va destinada a ayudar a los pequeños caficultores del departamento de Santander a procesar más sus productos permitiendo así poder competir en la economía y calidad en el mercado nacional e internacional del café.

El proceso de diseño inicia con el análisis de las posibles alternativas de construcción de máquinas de tostadoras. Posteriormente se definen cada uno de los subsistemas que hacen parte al conjunto en general, especificando los componentes y parámetros principales de cada uno, satisfaciendo requerimientos de diseño tales como fácil mantenibilidad, bajo costo de fabricación y fácil operatividad. De acuerdo con esto el paso a seguir fue realizar el diseño a detalle de cada uno de los elementos mecánicos que interactúan, mediante cálculos matemáticos y la implementación de softwares de simulación y modelado en ingeniería (CAD, CAM), los cuales fueron de gran ayuda en elementos que son complejos de analizar mediante cálculos tradicionales. Por último, se elaboran manual de uso, mantenimiento y planos de la máquina, para posteriormente proceder a la construcción del modelo funcional obteniendo una maquina capaz de procesar 10 Kg de grano de café pergamino.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

Title: Desing and construction of a Coffee Roaster.²

Author(s): Orlando José Moreno Uribe, Jhoan Sebastián Serrano Hoyos.

Key words: Coffee Bean, Roasting process, Coffee Roaster, Desing.

Description:

This degree work demonstrates the process carried out in the design and construction of a coffee roasting machine with a capacity of 10 kg of product, which is intended to help small coffee growers in the department of Santander to further process their products, allowing thus being able to compete in economy and quality in the national and international coffee market.

The design process begins with the analysis of possible construction alternatives for toaster machines. Subsequently, each of the subsystems that are part of the overall assembly are defined, specifying the main components and parameters of each one, satisfying design requirements such as easy maintainability, low manufacturing cost and easy operability. According to this, the step to follow was to carry out the detailed design of each of the mechanical elements that interact, through mathematical calculations and the implementation of engineering simulation and modeling software (CAD, CAM), which were of great help. in elements that are complex to analyze using traditional calculations. Finally, a user manual, maintenance manual and plans for the machine are prepared, to subsequently proceed with the construction of the functional model, obtaining a machine capable of processing 10 kg of parchment coffee beans.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering.

Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolón. Mechanical Engineer.

INTRODUCCION

El café en Colombia, tiene alrededor de 300 años de historia desde que los jesuitas lo trajeron en el siglo XVIII. En el año 1835 se exportaban los primeros sacos producidos en la zona oriental, desde la aduana de Cúcuta; Para finales del siglo XIX la producción había pasado de 60.000 sacos a más 600.000 aclarando que la mayor parte de esta producción era de las fincas de grandes hacendados y para finales del siglo XIX el café ya era el principal producto de exportación por el que Colombia recibía divisas.

La transición del siglo XIX al XX trajo consigo una gran caída de los precios internacionales y por consiguiente una crisis para los hacendados que cambió por completo el panorama. Esto favoreció a los pequeños productores que venían creciendo y el liderazgo del desarrollo cafetero se trasladó a la zona Occidental.

En 1927 se crea la Federación Nacional de Cafeteros que se encargó de agremiar a los caficultores para representarlos y velar por sus derechos; En 1938 nace el centro de investigaciones, CENICAFÉ, responsable de proponer opciones óptimas para los procesos de tratamiento y producción del café. El impacto nacional del café es evidente, la valoración del café que se logra por el ordenado proceso de comercialización dependerá del óptimo desarrollo de una serie de pasos para la obtención de la materia prima, y su manejo a través de maquinarias con el fin de dar la mayor calidad posible al producto final, sin embargo hoy en día: "Las muestras de café de mejor calidad presentan en promedio un porcentaje entre el 92,4 % y el 93,5 %"¹, lo que demuestra que aún siguen faltando mejoras en los procesos de producción del café.

A lo largo de la historia del café, CENICAFE, ha hecho enormes avances tecnológicos promoviendo a los cafeteros oportunidades inigualables de mejorar el producto y convertirse en una atracción en el mercado internacional, tanto así que Colombia se posiciona como el tercer país con la mayor producción de café detrás de Brasil y Vietnam, sin embargo Colombia es el país con la principal producción de

café suave en el mundo, lo que genera un reto constante para esta organización en materia de la búsqueda de la perfección de los procesos internos colombianos de producción de sus granos de café.

Finalmente cabe destacar que quizás la parte esencial de esta producción de café suave radica en el correcto proceso de tueste de los granos de café que se ratifiquen de manera uniforme para brindar ese salto de calidad que tanto se anhela y elevar ese límite del 93,5% de calidad en el café colombiano. Por ello años tras año se ha hecho indispensable mejorar la calidad del producto neto como lo es el café, y la mejor manera de hacerlo es recurrir a la optimización de sus procesos de obtención, tales como, en este caso el tueste uniforme de los granos con el fin de obtener una homogeneidad lo más alta posible que determine que la calidad del producto está en su nivel más alto y garantizara que su comercialización sea todo un éxito.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Diseñar y construir maquina tostadora de café que permita el tueste uniforme de los granos obteniendo producto de calidad para su comercialización.

1.2. Objetivos específicos

- Diseñar máquina tostadora de café con capacidad máxima de 10 kg con regulador de temperatura y tiempo promedio de tueste de 12 a 20 min que posea los siguientes sistemas:
 - Sistema de alimentación
 - Sistema de transmisión de potencia
 - Quemadores
 - Compartimiento del proceso de tostado
 - Caja de control

- Elaborar un estudio de costos del diseño propuesto y evaluar su factibilidad económica comparándolo con modelos que se encuentran en el mercado.
- Construir Modelo funcional a escala reducida (escala 1:2) de la máquina tostadora de café diseñada en los ítems anteriores, para demostrar su principio de trabajo.
- Elaborar un manual de uso y mantenimiento didáctico para facilitar el manejo de la máquina tostadora de café.

2. EL CAFÉ

A continuación, se presentan los conceptos y procesos necesarios que se llevan a cabo para la obtención de café antes de llegar a los hogares para su consumo, muchos de estos procesos se realizan para garantizar la adquisición de café de alta calidad para que sus consumidores puedan experimentar de las características organolépticas como son el aroma y sabor de un buen café.

2.1 El café

2.1.1 Origen del café. El café encuentra su origen en las tierras Abisinia lo que hoy se conoce como Etiopía, en donde existen variedad de plantas silvestres, posteriormente el café aumentó su popularidad tras su llegada a Arabia, en donde los árabes descubrirán sus virtudes y posibilidades económicas desarrollando así todo el proceso de cultivo. Mediante caravanas los peregrinos musulmanes difundieron por las principales ciudades del mundo musulmán las virtudes de la bebida.

Los holandeses en 1637 llevaron el primer cargamento de café generando así una expansión y consolidándose, así como la bebida favorita en Europa desde Italia hasta Inglaterra. Ya para finales de siglo, en 1660 los holandeses trasladaron algunos arbustos desde Yemen hasta Batavia en Indonesia, y de allí a otras colonias en las Indias Orientales generando así las primeras plantaciones de café en las islas de Java y Sumatra, de allí pasó a Centro y Sudamérica³.

2.2 Estructura del fruto de café.

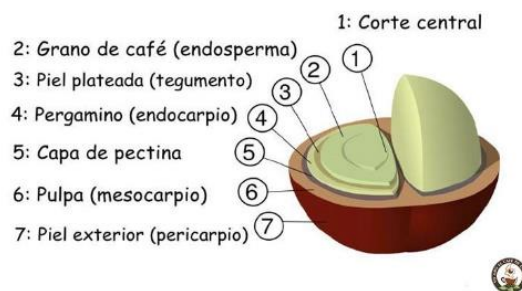
El fruto del café es una drupa constituida por una capa externa llamada exocarpio (epidermis) la cual representa el 43,2% del fruto en base húmeda, el color de la epidermis depende tanto de la variedad de café como de su grado de madurez y va

³ FIGUEROA HERNANDEZ, Esther; PEREZ SOTO, Francisco y GODINEZ MONTOTA, Lucila. La producción y el consumo del café. ECOFRAN. 2015. Pág. 3

desde colores verde o amarillo hasta rojo intenso y algunas veces puede tener tonalidades violeta o negro. Un poco más al interior se encuentra el mesocarpio que está constituido por una capa gruesa de aproximadamente 5 mm de espesor, rico en azúcares y mucílagos, que es el encargado de recubrir los granos (café verde) que están unidos entre sí por sus caras planas.

Los granos (café verde) son revestidos por una doble membrana, la primera es de color amarillo pálido llamada pergamino y la segunda llamada película plateada que está adherida al grano⁴.

Figura 1. Estructura y partes del grano de café.



Fuente: Estructura del fruto del café - | Coffee Media. 2024 [Citado 10 de Julio de 2024]. Disponible en internet: <yoamoelcafedecolombia.com>

2.2.1 Propiedades físicas del café. Para establecer las propiedades físicas de los granos de café se consultó un estudio realizado por Cenicafé en el año 2008, en donde se establecen los valores promedio de densidad aparente, peso y diámetros del café desde el fruto hasta los granos de café almendra⁵.

⁴ ARCILA, Jaime; FARFÁN, Fernando; MORENO, Argemiro; SALAZAR, Luis Fernando y HINCAPIÉ, Edgar. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná. CENICAFÉ. 2007. Pág. 49

⁵ MONTILLA PEREZ, Jimena; ARCILA PULGARIN, Jaime; ARISTIZÁBAL LOAIZA, Manuel; MONTOYA RESTREPO, Esther; PUERTA QUINTERO, Gloria; OLIVEROS TASCÓN, Carlos y CADENA GÓMEZ, Gabriel. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. CENICAFÉ. 2008. Pág. 5

Tabla 1. Propiedades Físicas del café.

	Uribe (1977)	Presente estudio (2006)	
		Café Seleccionado	Café sin seleccionar
Densidad aparente (kg/m³)			
Fruto	600	621,57	616,50
Pulpa fresca	270	299,74	298,20
Grano de café en baba	800	826,71	803,40
Grano de café lavado	650	701,87	693,66
Grano de café escurrido	s.d.	687,17	678,31
Grano de café seco de agua	520	s.d.	s.d.
Grano de café pergamino	380	391,44	385,75
Grano de café almendra	680	709,99	707,31
Peso (g)			
Un fruto	2,00	1,99	1,85
Un grano de café en baba	s.d.	0,57	0,55
Un grano de café lavado	s.d.	0,40	0,39
Un grano de café escurrido	s.d.	0,39	0,38
Un grano de café pergamino	0,22	0,21	0,21
Un grano de café almendra	0,18	0,18	0,18
Diámetros (mm)			
Diámetro ecuatorial			
Fruto	s.d.	14,37	13,99
Grano de café en baba	s.d.	9,24	9,02
Grano de café lavado	s.d.	8,70	8,63
Grano de café escurrido	s.d.	8,80	8,64
Grano de café pergamino	s.d.	8,55	8,43
Grano de café almendra	s.d.	7,11	7,04
Diámetro polar			
Fruto	s.d.	15,96	15,77
Grano de café en baba	s.d.	12,72	12,35
Grano de café lavado	s.d.	12,31	12,22
Grano de café escurrido	s.d.	12,38	12,03
Grano de café pergamino	s.d.	12,01	11,87
Grano de café almendra	s.d.	9,69	9,48

Fuente: MONTILLA PEREZ, Jimena; ARCILA PULGARIN, Jaime; ARISTIZÁBAL LOAIZA, Manuel; MONTOYA RESTREPO, Esther; PUERTA QUINTERO, Gloria; OLIVEROS TASCÓN, Carlos y CADENA GÓMEZ, Gabriel. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. CENICAFÉ. 2008.

2.3 Tueste de café.

El tostado del café es una actividad muy antigua que con el tiempo ha mejorado sus métodos de realizarlo. Dicha operación altera las características del café pergamino (café verde), para generar sus principales características organolépticas como son el sabor, la acidez, el sabor residual y el cuerpo del café.⁶

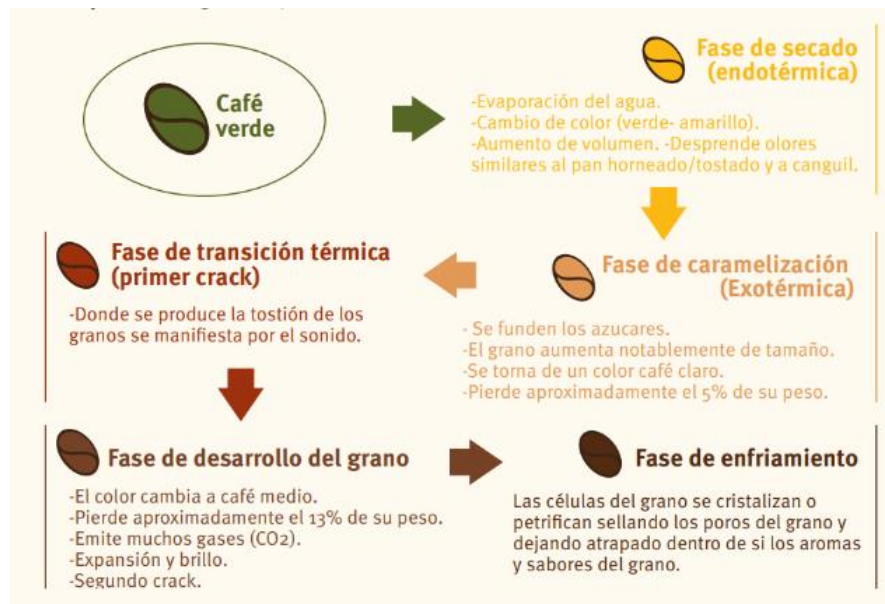
El tueste del café es una de las fases más importantes en la elaboración de café, se dice que un buen tueste influye más en la calidad de una taza de café, que la bondad de la mezcla escogida. El proceso de tostar los granos de café pergamino (café verde) consiste en someterlos durante un tiempo limitado a altas temperaturas⁷.

⁶ MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO, 2016. p. 7

⁷ Solá, Albert. (2005). Tostado y molido del café. Forumcafé., p. 2

2.3.1 Fases del proceso de Tostado. En el proceso de tostado existen diferentes fases por las cuales el grano de café tiene que pasar para obtener un tueste de calidad, estas fases se observan en la siguiente figura. Explicación detallada de cada fase se puede encontrar en el Anexo A.

Figura 2. Fases del proceso de Tostado.



Fuente: MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO. 2016.

2.3.2 Tipos de Tueste. El tueste del café se puede diferenciar dependiendo de su tonalidad, esta tonalidad va a depender del proceso de tueste que se le aplique al grano. Dos cafés pueden llegar a tener la misma apariencia visual, pero poseer sabores completamente diferentes, por lo cual el grado de tueste tiene una influencia decisiva sobre el desarrollo y concentración de los agentes aromáticos.⁸

⁸ MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO, 2016. p. 17.

Los tipos de tueste se clasifican según la escala Agtron, que es un sistema de puntos que va de mayor a menor, mostrando los tonos y los puntajes relacionados a los tipos de tueste como se muestra en la siguiente figura. Explicación detallada de cada puntuación se encuentra en el Anexo A.

Figura 3. Escala Agtron.



Fuente: MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO. 2016.

2.3.3 Factores que intervienen en el tostado de café. Los parámetros que intervienen en la calidad de tostado del café son la temperatura del tueste y el tiempo que se va a implementar el tostado de los granos.

2.3.3.1 Temperatura de Tueste. La temperatura de tueste depende tanto del tipo de máquina de tostar que se va a utilizar en el proceso, del tiempo de tueste y de la tonalidad o tipo de tostado final que se requiere. Dicha temperatura también se ve influenciada por la humedad que posea el grano de café a tostar alcanzando así temperaturas finales del proceso de hasta 200 a 240°C⁹.

⁹ Solá, Albert. (2005). Tostado y molido del café. Forumcafé., p. 3

2.3.3.2 Tiempo de Tueste. El tiempo de tostado oscila entre 1 minuto a máximo 25 minutos o hasta los 30 minutos, todo esto depende del sistema de tostado utilizado. El tiempo también se ve influenciado por la máquina que se va a utilizar, el tipo de café o si va dirigido para alimentación o hostelería¹⁰.

Los sistemas anteriormente mencionados son los siguientes:

- **Sistema Lento:** Este tipo de sistema suele durar entre 12 y hasta 25 minutos, este tipo de sistema es muy apreciado por los tostadores artesanos. Con el sistema lento se obtiene un grano de café de color oscuro y uniforme, con optima presencia para ser vendido.

- **Sistema Rápido:** El sistema rápido suele durar entre 3 y 6 minutos, es muy usado en la industria y para grandes producciones. En este tipo de sistema el grano tiene mayor volumen, más contenido graso, ácidos, extractos y humedad. Normalmente se utiliza para tostar cafés de calidades inferiores, que son vendidos molidos.

¹⁰ Giner, Josep. (2015). El tueste de café. Forumcafé., p. 6

3 CONCEPCION DE DISEÑO

En el presente capítulo se abordará el diseño en detalle de cada uno de los elementos mecánicos que componen la máquina tostadora de café. Este es uno de los pasos más importantes a seguir en la metodología de diseño, ya que es la etapa donde se modela, seleccionan y dimensionan cada uno de los elementos, esto se hace mediante la toma de decisiones por parte del diseñador y la aplicación de principios físicos, con la finalidad de poder contribuir al sector cafetero del departamento de Santander, ayudando a los pequeños y medianos caficultores en el procesamiento de sus cultivos, por lo tanto es necesario plantear unos requerimientos de diseño los cuales se evidencian a continuación.

3.1 Requerimientos de Diseño

El principal objetivo es realizar el diseño y construcción de una maquina tostadora de café, que cumpla los siguientes requerimientos:

- Bajo costo de fabricación.
- Fácil mantenimiento.
- Seguridad para el operario.
- Facilidad al operar.
- Velocidad de Giro del eje de la cámara de tostado de 50 rpm.
- Temperatura de tueste 200°C
- Capacidad máxima de producto de 10 Kg.
- Tiempo de tueste entre 12 a 25 min.
- Las dimensiones no deben superar los 2 m de alto y 1 m de largo.

3.2 Planteamiento de alternativas.

Ya conocidos los requerimientos que debe satisfacer el prototipo construido y analizando la información recopilada tanto en el capítulo 2 y 3, se plantean 3 alternativas que mejor se adecuan a los requerimientos. Posteriormente se establece una tabla comparativa con el fin de analizar cada uno de los modelos de máquinas tostadoras más viables con sus respectivas ventajas y desventajas, para así poder seleccionar la mejor alternativa.

3.2.1 Tostadora de Tambor Rotativo. Las tostadoras de tipo tambor rotativo funciona mediante el accionamiento de un sistema transmisor de potencia, compuesto por un motor y un reductor que hace girar un eje, dicho eje está acoplado a un aspa dentro de la cámara de tostado (en forma de tambor) que tiene como objetivo distribuir uniformemente por la superficie de cada grano de café para así obtener un tostado uniforme.

El tostado de los granos se logra gracias a un sistema de quemadores de gas localizados en la parte inferior del tambor encargados de generar gases de combustión que ayudan al calentamiento del dispositivo, aquí el tostado se realiza gracias al contacto que hay entre los granos y el tambor caliente.

Figura 4. Tostadora de Tambor Rotativo.



Fuente: China Coffee Roaster. 2024 [Citado 15 de Julio de 2024]. Disponible en internet: <www.alibaba.com>

3.2.2 Tostadora de Tambor Rotativo con Flujo de Aire.

Las tostadoras de tambor rotativo con flujo de aire se caracterizan porque el proceso de tueste se realiza principalmente por el principio de convección. La máquina posee un tambor que gira gracias a un sistema de transmisión de potencia, este tambor está localizado sobre una fuente de calor, el calor es suministrado por una cámara de combustión que normalmente utiliza como material inflamable GLP (Gas licuado de petróleo), el aire calentado por la cámara de combustión pasa por en medio del tambor, dicho aire caliente es el encargado de tostar los granos y es aprovechado gracias a un ventilador que se encuentra en la parte superior de la máquina.

Figura 5. Tostadora de Tambor Rotativo con Flujo de Aire.



Fuente: tostadoras | SHB Caffé. 2024 [Citado 15 de Julio de 2024]. Disponible en internet: (shbcaffé.com)

3.2.3 Tostadora de Lecho Fluido.

En las tostadoras de lecho fluido los granos son depositados en una cámara estática con pequeñas perforaciones por donde pasa el aire caliente, el aire es succionado del ambiente por un ventilador impulsor que lo dirige a un Aero calentador en donde el aire es calentado, dicho aire tiende a subira presión provocando que los granos que se encuentran en la cama con perforaciones se muevan en suspensión es decir

se elevan por un lateral describiendo una curva en la parte superior de la cámara para luego volver a descender por el lateral opuesto.

Figura 6. Tostadora de Lecho Fluido.



Fuente: Tostadora de lecho fluido ING-ROAST-50 – Ingesecc. 2024 [Citado 15 de Julio de 2024]. Disponible en internet: <www.ingesecc.com>

Tabla 2. Tabla Comparativa de Ventajas y Desventajas.

	Tostadora de Tambor Rotativo	Tostadora de Tambora Rotativo con Flujo de Aire	Tostadora de Lecho Fluido
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de operación. • Buena calidad del tueste. • Costos Bajos por simplicidad tecnológica. • El grano no se encuentra en contacto con los gases de combustión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena uniformidad en el tueste de los granos. • Alta confiabilidad. • Calidad de tueste elevada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia térmica. • Menor contaminación ambiental. • Mayor grado de uniformidad en el tueste.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento de carga lento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo de fabricación. • Mantenimiento complejo. • Consumo de energía elevado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad en el mantenimiento. • Altos costos de construcción. • Tecnológicamente compleja. • Baja capacidad.

Fuente: Propia.

Con la información plasmada en la tabla anterior se procede a evaluar la mejor alternativa que cumpla con los requerimientos anteriormente planteados.

3.3 Evaluación de alternativa.

Las 3 alternativas anteriormente planteadas en la tabla 2, se evaluarán mediante una tabla la cual contendrá las siguientes puntuaciones, dependiendo del desempeño que cumpla dicha alternativa, que va de 1 a 5 donde:

5 = Mejor desempeño.

1 = Desempeño deficiente.

Tabla 3. Evaluación de Alternativas.

Requerimientos	Tostadora de Tambor Rotativo	Tostadora de Tambor Rotativo con Flujo de Aire	Tostadora de lecho Fluido
Costos de fabricación	5	3	1
Mantenimiento	4	3	2
Fácil operatividad	3	3	3
Calidad de tueste	3	4	5
Seguridad	4	4	4
Total	19	17	15

Fuente: Propia.

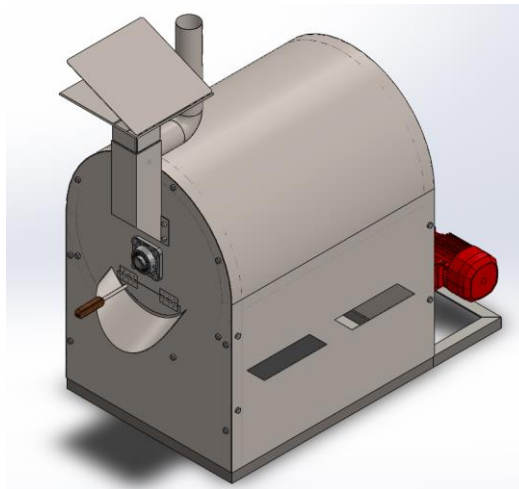
Según los resultados obtenidos en la tabla 3 el diseño que mejor se adapta a los requerimientos planteados fue la alternativa 1 (Tostadora de Tambor Rotativo) que alcanzó un puntaje total de 19 puntos, por lo que en el presente proyecto se procederá a diseñar una tostadora de café del tipo tambor rotativo.

3.4 Descripción de la máquina.

Luego de analizar cada una de las alternativas propuestas para solucionar el problema de diseñar una máquina tostadora de café para pequeños y medianos caficultores del departamento de Santander. Se llegó a la conclusión de que la alternativa que mejor se adapta a los requerimientos es la de sistema de tambor rotativo por lo que en este apartado se procederá a identificar cada uno de sus subsistemas.

A continuación, se presenta un modelado CAD de la máquina tostadora de café a diseñar y su explosionado en subsistemas:

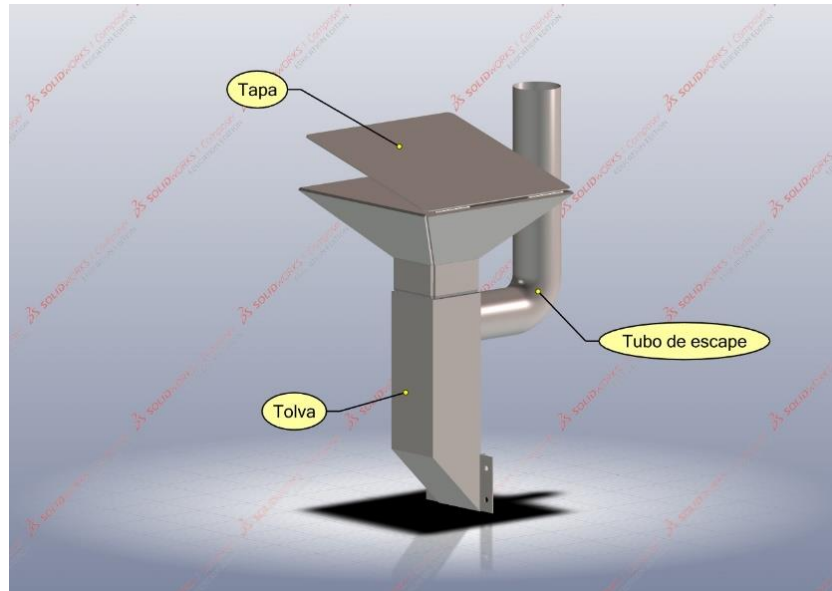
Figura 7. Máquina Tostadora de Café modelo CAD.



Fuente: Propia.

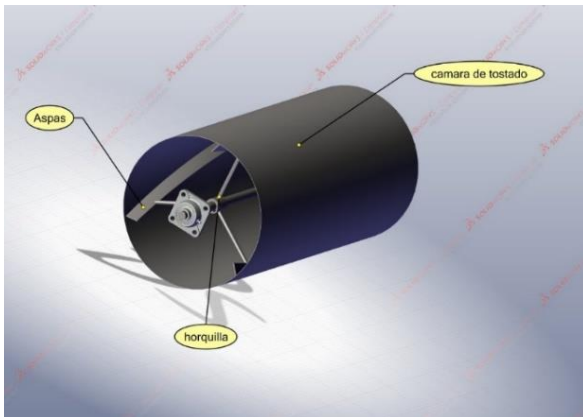
3.4.1 Subsistemas de la máquina. La máquina está constituida por 4 subsistemas principales los cuales conforman todo el conjunto de la máquina tostadora de café: Sistema de alimentación, Compartimiento del proceso de tostado, Sistema de transmisión de potencia y quemadores, como se evidencian en las Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

Figura 8. Sistema de Alimentación.



Fuente: Propia.

Figura 9. Compartimiento del Proceso de Tostado. Figura 10. Vista frontal cámara de tostado.



Fuente: Propia.

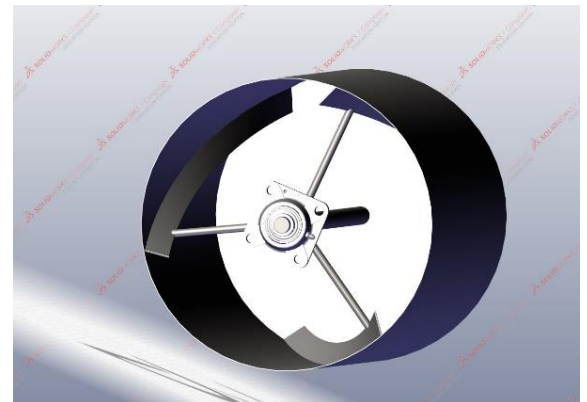
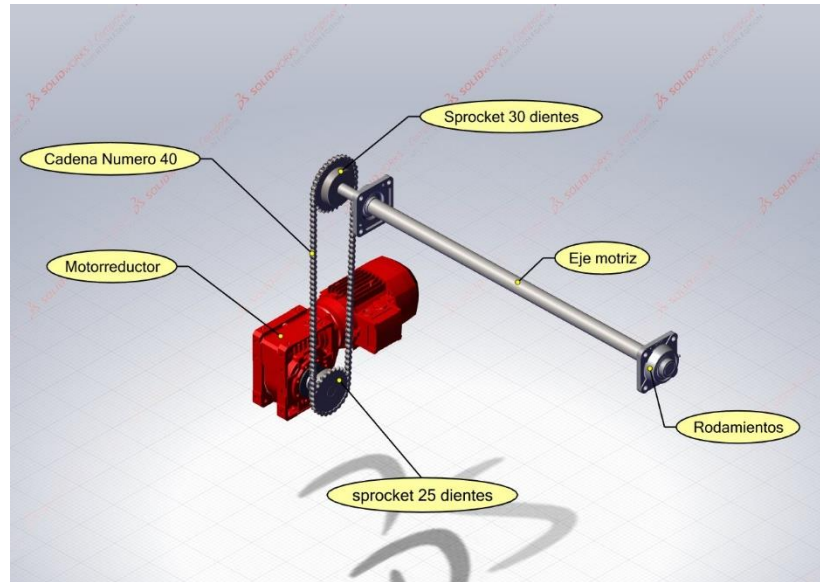
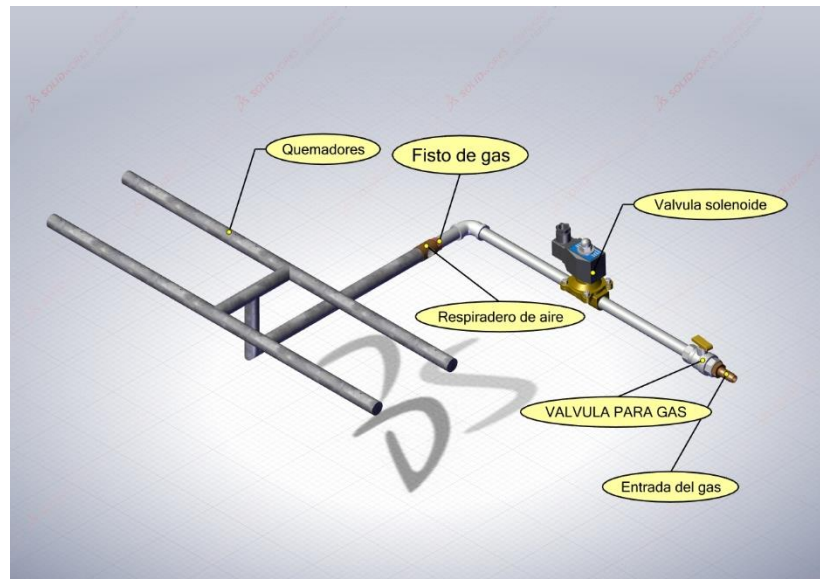


Figura 11. Sistema de Transmisión de Potencia.



Fuente: Propia.

Figura 12. Quemadores.

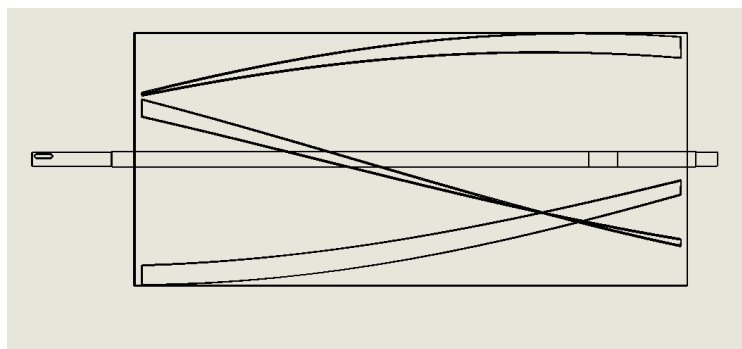


Fuente: Propia

4 DISEÑO COMPARTIMIENTO DEL PROCESO DE TUESTE

El compartimiento donde se efectúa el proceso de tueste de los granos de café también conocido como cámara de tostado, está compuesto por un cilindro giratorio fabricado en acero inoxidable el cual en su interior posee unas aspas que van acopladas a un eje por medio de 1 volante el cual transmite el movimiento rotativo a la cámara de tostado. Las aspas tienen una curvatura que va desde la entrada del cilindro hasta su parte posterior, estas aspas tienen como objetivo principal proveer a los granos un movimiento continuo, esto garantiza que se distribuya uniformemente el calor a cada una de las caras de los granos de café para así obtener un tostado uniforme.

Figura 13. Esquema Cámara de Tostado.

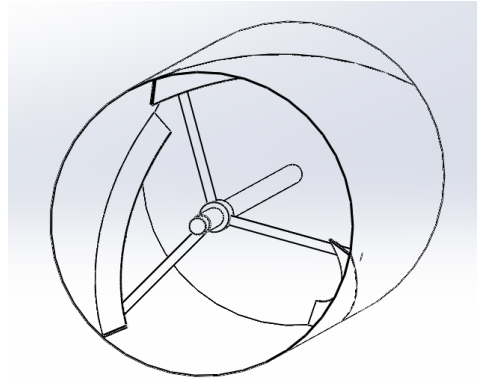


Fuente: Propia.

El cilindro tostador y las aspas se construirán a partir de una lámina de acero inoxidable AISI 304. Este material fue seleccionado por su composición a partir de una aleación (Níquel, Silicio, Cromo, Azufre, Fósforo y Manganeso), la cual nos proporciona una muy buena resistencia a la corrosión y nos permite trabajar a altas temperaturas por lo cual es muy utilizado en la industria alimenticia.

En la figura 14 nos muestra la distribución y unión de los volantes a las aspas.

Figura 14. Distribución y Unión de los Volantes a las aspas.



Fuente: Propia.

Para el diseño de la cámara de tostado es necesario conocer la cantidad de producto a procesar (planteado en la sección de requerimientos de diseño) debido a que está directamente relacionado con el dimensionamiento del cilindro giratorio. Esto es de gran importancia ya que el cilindro debe poseer un volumen mayor a los 10 Kg de producto que se procesa en cada tanda, con el principal objetivo de que exista un buen proceso de tueste generando así una distribución uniforme de calor en cada grano de café.

4.1 Dimensionamiento Cámara de tostado

Para el dimensionamiento es necesario conocer el valor de la densidad de los granos de café, dato obtenido de la tabla 1.

Por lo que tenemos los siguientes datos:

$$m = 10 \text{ Kg}$$

$$\rho_{café} = 391,44 \text{ Kg/m}^3$$

Estos datos son de gran importación ya que con ellos podemos calcular el volumen ocupado por los granos de café en el interior de la cámara, por medio de la siguiente expresión:

$$V_{café} = \frac{m}{\rho_{café}} \quad V_{café} = \frac{10 \text{ Kg}}{391,44 \text{ Kg/m}^3}$$

Obtenemos como volumen ocupado un valor de $V_{café} = 0,0255 \text{ m}^3$

Durante el proceso de tueste los granos sufren cambios en su estructura física, por lo que al finalizar el volumen de cada grano de café va a ser mayor. Según Ministerio de industria y productividad de Ecuador¹¹ los granos aumentan entre un 20 a 50% su volumen durante su tueste por lo cual, el volumen anteriormente calculado no va a ser el real durante todo el proceso.

Por consiguiente, es necesario tener en cuenta el aumento de volumen de cada grano. Teniendo en cuenta esto obtenemos un volumen final de $0,03825 \text{ m}^3$.

El café para que se pueda tostar de la mejor manera debe poseer un movimiento giratorio dentro del cilindro, para que esto suceda el volumen de la cámara de tostado debe ser el doble de valor del volumen ocupado por los granos de café, esto se realiza con el objetivo de que los granos tengan un movimiento ondulatorio libre en el interior y obtengan el calor necesario para su tueste.

$$V_{camara} = 2 \cdot V_{café} \quad V_{camara} = 0,0765 \text{ m}^3$$

Ya calculado el valor del volumen real de la cámara es posible dimensionar por completo el cilindro tostador aplicando la expresión para obtener el volumen de un

¹¹ MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO, 2016. p. 17.

cilindro, dicha expresión nos brinda las medidas de diámetro y longitud del cilindro tostador.

$$V_{camara} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4}$$

Aplicando un cálculo iterativo entre las medidas de diámetro y longitud y con ayuda del software EES obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 4. Tabla de Iteración de Valores de r y h.

1..10	h [m]	r [m]	V_T
Run 1	0,5	0,2209	0,07664
Run 2	0,5556	0,2096	0,07664
Run 3	0,6111	0,1998	0,07664
Run 4	0,6667	0,1913	0,07664
Run 5	0,7222	0,1838	0,07664
Run 6	0,7778	0,1771	0,07664
Run 7	0,8333	0,1711	0,07664
Run 8	0,8889	0,1657	0,07664
Run 9	0,9444	0,1607	0,07664
Run 10	1	0,1562	0,07664

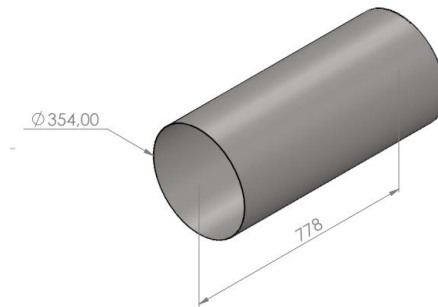
Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla de iteración, obtuvimos varios valores para las dimensiones de diámetro (en términos del radio) y longitud, pero para que se cumplan los requerimientos de diseño planteados anteriormente y que esta medida influya en el posterior diseño de la estructura de la máquina se seleccionó que la cámara de tostado debe poseer las siguientes dimensiones:

$$D = 0,3542 \text{ m} \rightarrow D = 35,42 \text{ cm}$$

$$h = 0,7778 \text{ m} \rightarrow h = 77,78 \text{ cm}$$

Figura 15. Cilindro Tostador debidamente dimensionado.



Fuente: Propia

4.2 Cálculo espesor de lámina.

Una parte muy importante en el diseño de una estructura es la selección adecuada del material como también el calibre (espesor de lámina) a utilizar, el cual dependiendo de qué tan grueso sea soportara más cargas aplicadas sobre él, por lo que si se selecciona un calibre muy delgado es posible que la estructura de la cámara de tostado sufra daños al ser sometida a la presión ejercida por los granos de café sobre ella.

Por esta razón en este segmento del trabajo es necesario calcular el calibre mínimo que debe tener las paredes de la cámara de tueste. Para ello en primera instancia se realizó un análisis geométrico de la cámara de tostado en estado estático con producto en su interior, con el fin de determinar algunas dimensiones necesarias para continuar con el cálculo del espesor de lámina. Se puede observar el análisis completo en el Anexo B.

Para continuar con el cálculo del calibre mínimo que debe poseer el cilindro tostador, es necesario saber el valor de la presión ejercida en el cilindro por los 10 Kg de café. Para ello se recurre a la expresión:

$$P = \frac{F}{A_{rect}}$$

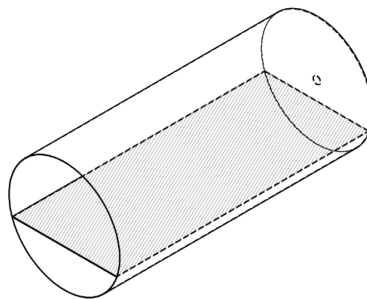
Donde:

- ✓ P : Presión ejercida en el interior del cilindro.
- ✓ A_{rect} : Área del rectángulo.
- ✓ F : Fuerza ejercida por los granos de café.

La fuerza en este caso es el peso de cada tanda en el proceso por lo que tiene un valor de $W = 98,1 N$

Como se puede observar en la ecuación de la presión es necesario conocer el área del rectángulo que se proyecta debido a que equivale al área de contacto de los granos con las paredes del cilindro tostador, dicha área se puede observar en la figura 16.

Figura 16. Esquema Área Proyectada.



Fuente: Propia.

Por lo tanto, el área del rectángulo está dada por la siguiente expresión:

$$A_{rect} = 2X \cdot L$$

Donde:

- ✓ X : valor de la coordenada del triángulo.
- ✓ L : Longitud del cilindro tostador.

El valor de X tiene un valor de $X = 0,170$ m, por lo que reemplazando tenemos que en la ecuación tenemos que el área del rectángulo es $A_{rect} = 0,2644 \text{ m}^2$

Utilizando la ecuación de la presión y reemplazando los valores calculados de A_{rect} y F obtenemos que la presión ejercida en las caras del cilindro tostador tiene un valor equivalente a:

$$P = \frac{98,1 \text{ N}}{0,2644 \text{ m}^2} \rightarrow P = 371,02 \text{ N/m}^2$$

Para finalizar la selección de calibre apropiado para la lámina a utilizar en el cilindro tostador, es necesario analizar los esfuerzos a los que está sometido, por lo que se considerara el conjunto completo como un cilindro de pared delgada sometido a una presión interior (Presión ejercida por los granos de café sobre sus caras).

Según Shigley¹², para el cálculo de los esfuerzos en cilindros de pared delgada se recurren a las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{anular} = \frac{PD_m}{2t} \quad \sigma_{long} = \frac{PD_m}{4t} \quad \sigma_{anular} = 2\sigma_{long}$$

Se asumió un espesor de lámina de 2 mm de acero inoxidable A304, cuyas propiedades se muestran a continuación

- Resistencia a la fluencia S_y : 276 MPa
- Resistencia última S_u : 568 MPa

Por lo tanto, al reemplazar el valor del espesor asumido y solucionando el sistema de ecuaciones con ayuda del software EES licencia educativa, se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 17.

¹² Budynas, Richard G y Nisbett J. Keith. Análisis de carga y esfuerzo. En: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 9 ed. McGrawHill. p. 111.

Figura 17. Resultados Cálculos de los Esfuerzos en el Cilindro Tostador.

$A = 264400 \text{ [mm}^2\text{]}$	$D_m = 354 \text{ [mm]}$	$F = 98,1 \text{ [N]}$
$P = 0,000371 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\sigma_{anular} = 0,03284 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\sigma_{long} = 0,01642 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
$t = 2 \text{ [mm]}$		

Fuente: Propia.

De la figura 17 obtenemos que los valores de esfuerzo anular y esfuerzo longitudinal sobre el cilindro son:

$$\sigma_{anular} = 0,03284 \text{ N/mm}^2$$

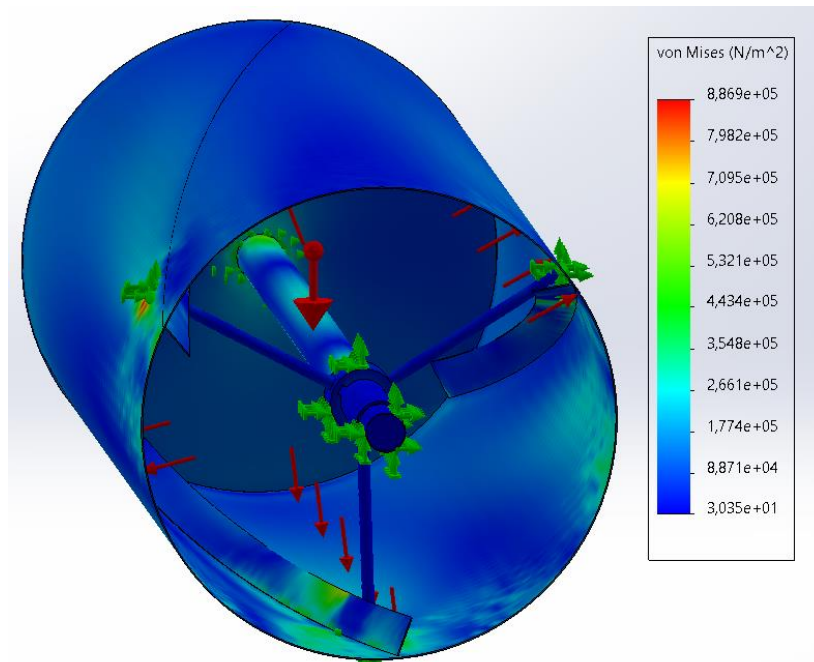
$$\sigma_{long} = 0,01642 \text{ N/mm}^2$$

Se concluye tras observar los resultados que los esfuerzos en el cilindro son muy bajos y no sobrepasan el valor de la resistencia a la fluencia del material, esto nos indica que con el espesor asumido (2 mm) el cilindro tostador no sufrirá daños y soportará las cargas aplicadas durante el proceso.

4.3 Simulación cámara de tostado.

4.3.1 Análisis de esfuerzos en la cámara de tostado. Para el análisis de esfuerzos se utilizó el programa SolidWorks para simular el comportamiento de la cámara de tostado bajo el efecto de las fuerzas reales presentes en el sistema y poder determinar si los esfuerzos y deformaciones podrían ocasionar fallas en el material, comprometiendo así el buen funcionamiento del sistema. Se aplicó la fuerza de presión de $371,02 \text{ N/m}^2$ ejercida por los granos en cada una de las caras al estar en rotación, también se ubicaron cada una de las sujeciones. A continuación, en las Figuras 18 y 19 se muestran las gráficas de esfuerzos y desplazamientos en la cámara de tostado con su respectivo análisis.

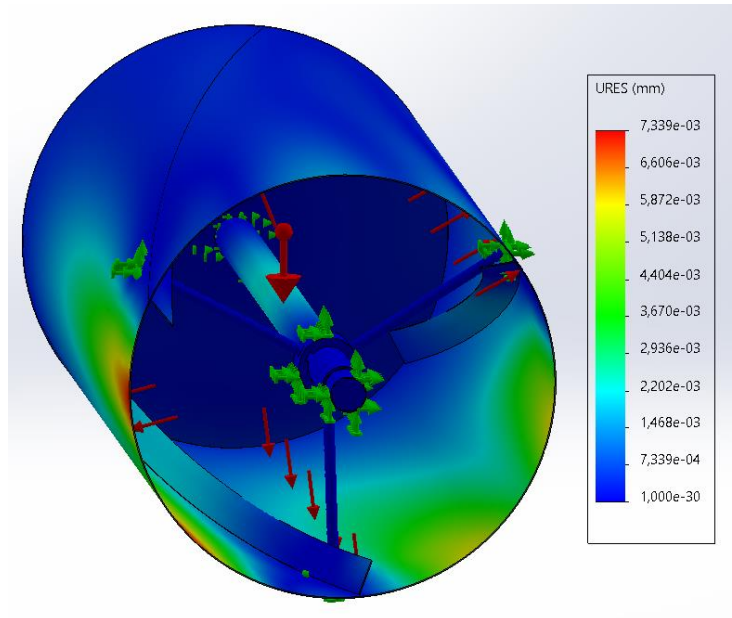
Figura 18. Grafica de esfuerzos en la cámara de tostado.



Fuente: Propia.

En la figura 18 se puede apreciar que los esfuerzos producidos son bajos a lo largo de toda la cámara de tostado que van en intervalos de $3,035 \times 10^1$ a $8,871 \times 10^4 Pa$, valores muy cercanos a los obtenidos analíticamente en la figura 17. En los puntos donde se encuentra acoplada la cámara de tostado a las barras por medio de soldadura se ubican los puntos críticos del sistema, ahí es donde se presentan los esfuerzos más altos de aproximadamente $8,869 \times 10^5 Pa$, esto ocurre ya que impiden que la cámara de tostado se desplace por efecto de la fuerza ejercida, sin embargo se puede esperar que no exista ningún fallo en el material ya que el máximo esfuerzo no superara el límite elástico del material que es de $2,06 \times 10^8 Pa$.

Figura 19. Grafica de desplazamientos en la cámara de tostado.



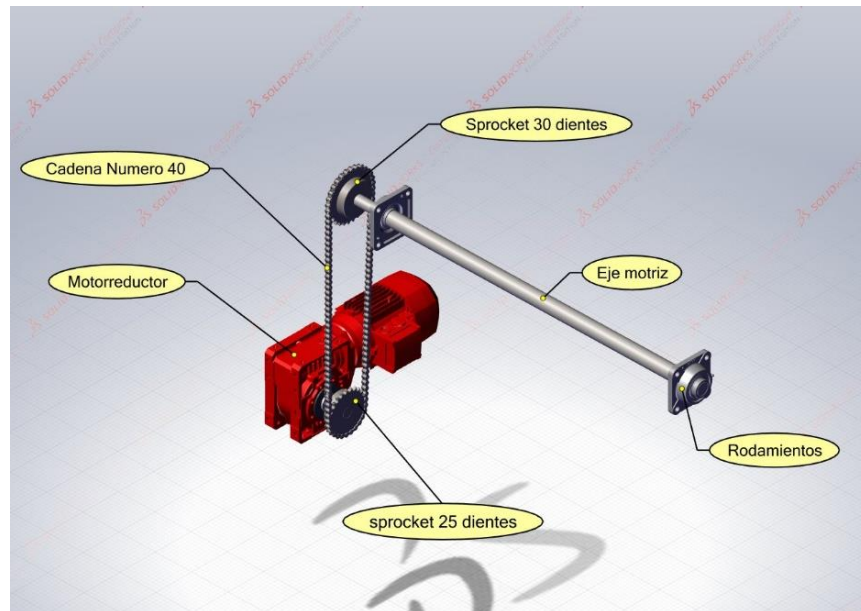
Fuente: Propia.

La importancia de analizar los desplazamientos de una estructura se debe a que, si un elemento sufre desplazamientos significativos, podría ocasionar un mal funcionamiento del sistema, generando así problemas como deformación del elemento o movimientos no deseados. En la figura 19 se muestra la gráfica de los desplazamientos presentes en la cámara de tostado, según lo observado el desplazamiento máximo se encuentra en la parte exterior donde la lámina de acero A304 no tiene ningún apoyo rígido. Sin embargo, según los resultados obtenidos, el máximo desplazamiento es de $7,339 \times 10^{-3}$ mm, indicando así que los desplazamientos presentes son muy mínimos y aceptables.

5 DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA

El sistema transmisor de potencia de la máquina tostadora de café está constituido por un motor eléctrico el cual debe poseer la potencia necesaria para transmitir el movimiento rotativo a la cámara de tostado, un sistema de transmisión por cadenas y un eje solidario con la cámara de tostado con sus respectivos rodamientos. La distribución de dichos elementos mecánicos se puede observar en la figura 20.

Figura 20. Elementos que constituyen el sistema transmisor de potencia.



Fuente: Propia.

Cada uno de los elementos será analizado en este capítulo explicando su proceso de selección, teniendo en cuenta recomendaciones básicas propuestas por diferentes autores con respecto al diseño mecánico. Por lo que en primer lugar es necesario calcular la potencia necesaria del motor para poder transmitir movimiento a la cámara de tostado.

5.1 Cálculo Potencia del Motorreductor.

El Motorreductor transmite el movimiento a la cámara de tostado por medio de un sistema de transmisión de cadenas, la cual nos proporciona la velocidad adecuada para un perfecto proceso de tostado de los granos de café.

Para la selección del Motorreductor se debe conocer la cantidad de inercia que debe contrarrestar para así poder provocar el movimiento en la cámara de tostado, por lo cual es necesario analizar el momento que se genera en el cilindro de tueste.

Mediante la ecuación 5.1 se analizar el sistema completo y los momentos existentes en el mismo.

$$\sum M = \sum I_{sistema} \cdot \alpha \quad \text{Ec. (5.1)}$$

Donde:

- M: Momento [Nm]
- I: Inercia Total del sistema [Kg.m²]
- α : Aceleración angular [rad/s²]

Como se observa en la ecuación 5.1 es necesario conocer los valores de la inercia y la aceleración por lo tanto es necesario calcular cada uno de ellos.

Para el cálculo de la aceleración de la aceleración angular es necesario aplicar la ecuación 5.2:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \quad \text{Ec. (5.2)}$$

Donde:

- ω_f : Velocidad angular final [rad/s]
- ω_0 : Velocidad angular inicial [rad/s]
- t : tiempo de arranque del motor [s]

El tiempo de arranque se toma como 3 segundos, ya que es lo que tarde un motor en encender y tomar su velocidad máxima constante. Según los requerimientos

planteados en el capítulo 3 la cámara de tostado debe girar a 50 rpm por lo tanto su velocidad angular es de 5,24 rad/s, reemplazando en la ecuación 5.2 obtenemos:

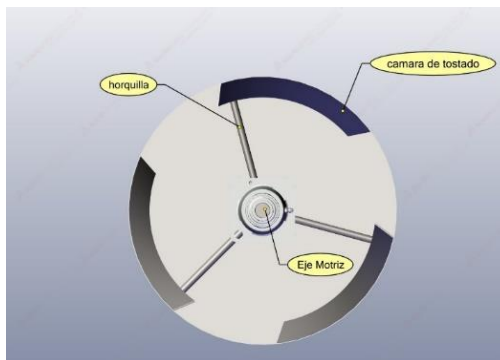
$$\alpha = \frac{5,24}{3} \rightarrow \alpha = 1,75 \text{ rad/s}^2$$

5.1.1 Cálculo Inercias del sistema. Como se puede apreciar en la ecuación 5.1, es completamente necesario conocer el valor de la sumatoria de las inercias que actúan en el sistema. El sistema de inercias ejercidas a las que debe contrarrestar el movimiento el motor están constituidas por:

- Inercia del Eje motriz.
- Inercia de la cámara de tostado.
- Inercia del café.
- Inercia de la horquilla.

En la figura 21 se pueden visualizar los elementos que componen todo el sistema a calcular. La inercia de las aspas se desprecia ya que tienen una geometría no definida para su cálculo.

Figura 21. Elementos sistema de inercias a calcular.



Fuente: Propia.

Por lo tanto, la sumatoria de inercias está dada por la siguiente expresión:

$$\sum I_{sistema} = I_{eje} + I_{camara} + I_{café} + I_{horquilla} \quad \text{Ec. (5.3)}$$

Se calcularon cada una de las inercias presentes en el sistema y aplicando la ecuación 5.3 tenemos como resultado la sumatoria de las inercias del sistema, obteniendo como valor final:

$$\sum I_{sistema} = 1,88 \times 10^{-4} + 0,108 + 0,024 + 0,18$$

$$\sum I_{sistema} = 0,312 [Kg \cdot m^2]$$

El cálculo de cada una de las inercias se realiza en el capítulo de anexos, específicamente en el Anexo C.

5.1.2 Cálculo de Momentos del sistema. Para concluir con el cálculo de la potencia necesaria del motor y como se observa en la ecuación 5.1 (página 44), se debe analizar la sumatoria de los momentos presentes. El motor para hacer que el volumen de café se mueva debe generar un momento sobre el eje de la máquina, esta fuerza genera que los granos de café se deslicen por la cara interna de la cámara de tostado generando un momento opuesto. Por consiguiente, tenemos que:

$$\sum M = M_T - M_O \quad \text{Ec. (5.4)}$$

Donde:

- M_T : Momento de torsión que transmite el motor al eje [Nm].
- M_O : Momento opuesto generado por el deslizamiento del volumen de café [Nm].

5.1.2.1 Cálculo Momento opuesto. Para el cálculo del momento opuesto generado por el deslizamiento de los granos de café en la cara interior del cilindro es necesario utilizar la siguiente expresión.

$$M_o = m \cdot g \cdot r_{int}$$

Ec. (5.5)

Donde:

- m : Masa de café [Kg].
- g : Gravedad [m/s^2].
- r_{int} : Radio interior de la cámara de tostado [m].

Tenemos 10 Kg de café lo cual es la masa para la cual se está diseñando la maquina tostadora de café y según lo obtenido en el capítulo 4 (página 36) la cámara de tostado posee un dimensionamiento de $r_{int} = 0,177$ [m]. Por lo que al reemplazar en la ecuación 5.5 obtenemos el valor del momento opuesto presente en el sistema.

$$M_o = 17,36 \text{ [Nm]}$$

5.1.3 Dimensionamiento del Motorreductor. Para concluir con la selección del Motorreductor necesario para nuestra maquina tostadora de café, se aplica la ecuación 5.1 en la cual se reemplazaron los valores de inercias, aceleración angular y sumatoria de momentos calculados a lo largo de este capítulo con el fin de obtener el momento de torsión transmitido al eje. Este procedimiento se evidencia en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo del Momento de torsión.

CALCULO DEL MOMENTO DE TORSION		
Ecuación	$M_T - M_o = \sum I_{sistema} \cdot \alpha$	
	Variable	Valor
Sumatoria de inercias	$\sum I_{sistema}$	0,312 [Kg · m²]
Aceleracion angular	α	1,75 rad/s ²
Momento opuesto	M_o	17,36 [Nm]
Resultados		
$M_T = 17,90$ [Nm]		

Fuente: Propia.

Con el valor del momento de torsión ejercido en el eje motriz de la máquina podemos calcular la potencia necesaria, mediante la expresión.

$$Pot = M_T \cdot \omega$$

Donde:

- M_T : Momento de torsión [Nm]
- ω : Velocidad angular [rad/s]

Por lo tanto, al reemplazar el momento de torsión y la velocidad angular tenemos que la potencia sería:

$$Pot = 93,64 \text{ watts}$$

Haciendo la conversión a Hp obtenemos que $Pot = 0,13 \text{ HP}$.

Ya conociendo la potencia, nos dirigimos al catálogo del proveedor a buscar el motor que mejor se acomode a nuestras necesidades. En nuestro caso revisamos el catálogo de Motores DIXUS, y obtuvimos las siguientes referencias.

Figura 22. Selección Motor eléctrico.

MOTORES MONOFASICOS EFICIENCIA ALTA IE2 - IEC 60034-1 - IP44 - AISLAMIENTO CLASE F- 4 POLOS 1800RPM- 60Hz													
MODELO	HP	KW	RPM	SOBREVELOCIDAD ADMISIBLE	CORRIENTE NOMINAL(A) 110/220 V	CORRIENTE DE ARRANQUE	FACTOR DE SERVICIO	COSφ	TORQUE NOMINAL (Nm)	TORQUE DE ARRANQUE (Nm)	MAXIMO TORQUE (Nm)	CARCASA	EFICIENCIA
DLYY-561-4	1/12	0,06	1650	4320	0.9/0.45	4.5/2.3	1,15	0,92	0.3	0.7	0.7	56	65
DLYY-562-4	1/8	0,09	1650	4320	1.5/0.75	7.5/3.8	1,15	0,92	0.5	1.0	1.0	56	60
DLYL711-4	1/4	0,18	1680	4320	2.8/1.4	15/7.5	1,15	0,92	1	2.1	1.8	71	67
DLYL712-4	1/2	0,37	1710	4320	5.4/2.7	30/15	1,15	0,92	2	4.4	3.6	71	64
DLYL802-4	1	0,75	1710	4320	10.0/5.0	55/27.5	1,15	0,92	4	7	7	80	68
DLYL90L-4	2	1,5	1735	4320	19.7/9.83	108/54	1,15	0,85	8.2	14	15	90L	75,5
DLYL100L1-4	3	2,2	1740	4320	26.72/13.36	147/73	1,15	0,95	12	21,6	21,6	100L	79
DLYL112M-4	5	3,7	1740	4320	44.8/22.4	246/123	1,15	0,95	20	36	36	112M	79

Fuente: Catalogo DIXUS. Motores eléctricos de baja tensión. Pág. 5. Disponible en:

<https://dixus.com.co/producto/monofasicos-1800/>.

Como se observa en la figura 22 el proveedor de motores eléctricos DIXUS, tiene disponibles motores con potencias desde 1/12 HP hasta 5 HP. Según lo calculado la potencia mínima requerida para nuestra maquina tostadora de café es de 0,13 HP, por lo cual se podría utilizar los motores desde ¼ HP en adelante. En nuestro caso se decidió que la mejor opción era tomar la referencia DLYL712-4 que nos proporciona una potencia de ½ HP. En el Anexo D se puede encontrar la hoja de datos del motor seleccionado.

5.1.4 Selección Caja Reductora. El motor seleccionado según el fabricante nos entrega una rotación nominal de 1710 rpm la cual es una velocidad muy alta para aplicarla a nuestra maquina tostadora, por lo cual es necesaria bajar la velocidad a 50 rpm según los requerimientos establecidos en el capítulo 3. Para ello se podrían implementar transmisiones de potencia por bandas o cadenas, por lo tanto, realizamos el cálculo de la relación para conocer cuántas etapas de reducción tendría nuestra transmisión.

$$g_r = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{Ec. (5.6)}$$

Donde:

- w_1 : Velocidad angular de entrada (velocidad del motor) [rad/s].
- w_2 : Velocidad angular de salida (velocidad necesaria para la maquina) [rad/s].
- g_r : Relación de velocidades.

Como nos indica la hoja de datos del motor, este nos entrega una velocidad de 1710 rpm (179,07 rad/s) y la velocidad óptima para el proceso de tueste es de 50 rpm (5,23 rad/s), por lo tanto, al reemplazar en la ecuación 5.6 obtenemos la relación de velocidades.

$$g_r = 34,23$$

Analizando este valor, nos damos cuenta que no es posible aplicar este método para reducir la velocidad, ya que se necesitaría múltiples etapas y según Mott¹³ la relación de velocidades en una etapa de reducción de velocidad debe ser menor a 7.

Según lo analizado anteriormente se descartó el uso de transmisiones por bandas o cadenas, por lo cual la mejor opción es el uso de una caja reductora de velocidad.

Por lo que revisando el catalogo web de la empresa DIXUS se seleccionó una caja reductora de velocidad sinfín corona de referencia NMRV40, ya que es capaz de transmitir los ½ HP provenientes del motor. En el Anexo E se muestra el procedimiento para la selección de la referencia óptima para la caja reductora y su hoja de datos.

En la figura 23 se muestran las relaciones de velocidad que maneja este tipo de referencia.

Figura 23. Selección de relación de velocidad óptima en caja reductora NMRV40.

CAJA NMRV 40					
DIAMETRO EJE SALIDA 18mm		CUÑERO 6mm		CARCASA ALUMINIO	
RELACION	RPM	MAXIMA POTENCIA (HP)	TORQUE (Nm)	FACTOR DE SERVICIO	FRAME
7.5	240	1/2	14.7	2.5	71 B14
10	180	1/2	19.6	2	71 B14
15	120	1/2	29.4	1.4	71 B14
20	90	1/2	39.3	1.1	71 B14
30	60	1/2	58.9	0.9	71 B14
40	45	1/3	53.1	1.1	71 B14
50	36	1/3	66.3	1	63B5 / 71B14

Fuente: Catalogo DIXUS. Reductor DIXUS sinfín corona – NMRV40. Disponible en: <https://dixus.com.co/producto/reductor-dixus-sinfin-corona-nmr40/>

¹³ MOTT, Robert L. Transmisiones por bandas y por cadenas. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. Pearson educación. p. 290

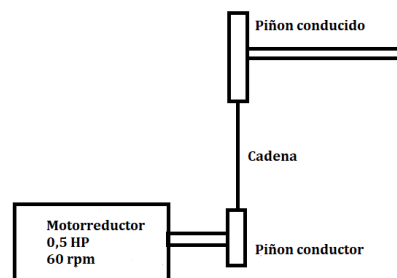
Como se observa va desde relación 75:1 a 50:1. Según lo analizado y establecido en los requerimientos, la relación que más se acomoda a nuestra aplicación es la 30:1, ya que nos entregaría una velocidad de 60 rpm.

Ya con una velocidad muy cercana a la necesaria, se plantea la utilización de un sistema transmisor de potencia con el fin de alcanzar los 50 rpm necesarios para un óptimo proceso de tostión, el cual será diseñado en el siguiente apartado.

5.2 Diseño y selección de la transmisión de potencia por cadena.

Para realizar el diseño de la transmisión de potencia, es necesario analizar el número de etapas que debe poseer la transmisión. En la figura 24 se observa el esquema cinemático del sistema, el cual nos ayuda a visualizar el comportamiento de la transmisión, sus componentes y cuantas etapas son necesarias para obtener la velocidad de optima de salida en el eje motriz.

Figura 24. Esquema cinemático de la transmisión de potencia.



Fuente: Propia.

Para la implementación de la transmisión de potencia se utilizará una transmisión por cadena de una sola etapa la cual transmitirá la potencia proveniente del Motorreductor hacía el eje motriz, por medio de dos sprocket (Conductor y conducido). En nuestro caso de aplicación se transmiten del motor al eje motriz de la maquina tostadora 0,5 HP de potencia, a continuación, se muestran los datos que se posee para el diseño:

- Potencia a transmitir: 0,5 HP
- RPM entregados por la caja reductora: 60 rpm
- RPM necesarios en el eje motriz: 50 rpm
- Relación total de reducción: 1,2:1

En primer lugar, es necesario calcular la potencia de diseño la cual es equivalente a la potencia a transmitir multiplicada por un factor de servicio o margen de seguridad, dicho factor va relacionado con el tipo de carga a la cual está siendo expuesta la transmisión.

$$Pot_d = Pot_t \cdot FS \quad \text{Ec. (5.7)}$$

Donde:

- Pot_t : Potencia a transmitir [HP]
- FS : Factor de servicio

En nuestro caso, la potencia es proveniente de un motor eléctrico y se considera carga fluctuante es decir existen choques durante el proceso, conociendo esto nuestro factor de servicio es de 1,3 como se muestra en la tabla adjunta en el Anexo F. Aplicando la ecuación 5.7 obtenemos nuestro cálculo de la potencia de diseño.

$$Pot_d = 0,5(1,3) \quad \quad \quad \mathbf{Pot_d = 0,65 HP}$$

Ya conocida nuestra potencia de diseño de nuestro piñón conductor, nos dirigimos a la tabla de capacidad del catálogo de nuestro proveedor (se utilizó el catálogo de Intermecc) en donde se identificaron tanto los rpm del piñón conductor y la potencia de diseño, como se muestra en la tabla de capacidad adjunta en el Anexo F.

Sabemos que el piñón conductor rota a 60 rpm y nuestra potencia de diseño de 0,65 HP, podemos observar que no se encuentra el valor exacto de potencia por que buscamos un rango de valores en donde se encuentre dicho valor e interpolando se

encontró que para nuestro piñón conductor el número de dientes más óptimo es de 25 dientes por lo cual se le selecciona. Para seleccionar nuestro piñón conducido aplicamos la ecuación para relación de velocidades en función del número de dientes de cada piñón.

$$g_r = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{Ec. (5.8)}$$

Donde:

- N_2 : Número de dientes piñón conducido.
- N_1 : Número de dientes piñón conductor.

Con nuestra relación de 1,2 y el valor de numero de dientes del piñón conductor seleccionado anteriormente (25 dientes) tenemos que nuestro piñón conducido debe tener 30 dientes.

5.2.1 Cálculo de la distancia entre centros y longitud de cadena. Ya conocidos el número de dientes correspondientes a cada uno de los piñones, procedemos a calcular la longitud de cadena y la distancia entre centros de nuestra transmisión, para ello aplicamos la ecuación:

$$L = 2C + \frac{N_2 + N_1}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C} \quad \text{Ec. (5.9)}$$

Donde:

- N_1 : Número de dientes piñón conductor.
- N_2 : Número de dientes piñón conducido
- C : Distancia entre centros.

Según Mott¹⁴, la distancia entre centros entre los ejes del sistema debe ser entre 30 y 50 pasos de cadena, por lo tanto, para nuestro calculo tomamos un punto medio, es decir $C = 40 \text{ pasos}$.

Reemplazando el número de dientes seleccionado en el apartado anterior y el valor de C en la ecuación 5.9 obtenemos que la longitud de cadena es:

$$L = 108 \text{ pasos}$$

Con la longitud de cadena calculada es posible dimensionar la distancia entre centros que debe poseer la transmisión de piñón conductor al piñón conducido, mediante la siguiente expresión.

$$C = \frac{1}{4} \left[L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad \text{Ec. (5.10)}$$

Donde:

- L : Longitud de cadena.
- N_1 : Número de dientes piñón conductor.
- N_2 : Número de dientes piñón conducido.

Reemplazando los datos ya calculados anteriormente obtenemos que la distancia la distancia entre centros.

$$C = 40(0,5) \rightarrow C = 20 \text{ pulgadas}$$

Como cada uno de los piñones tiene diferente número de dientes, va a existir entre la cadena y cada uno de los piñones un ángulo de contacto el cual se calculará a continuación.

¹⁴ MOTT, Robert L. Transmisiones por bandas y por cadenas. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. Pearson educación. p. 290

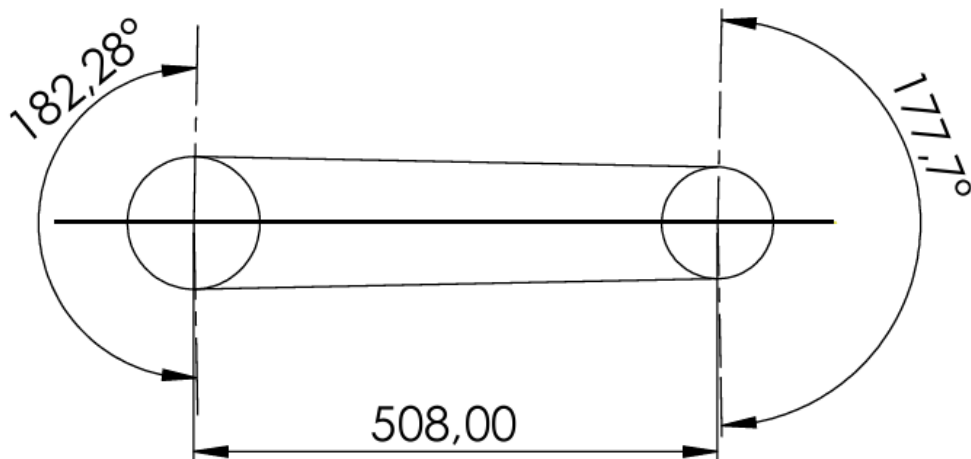
5.2.2 Cálculo ángulo de contacto piñón-cadena. Cada uno de los piñones tiene 25 y 30 dientes respectivamente por lo cual el ángulo de contacto en el piñón conductor y conducido es equivalente a:

Tabla 6. Calculo ángulos de contacto de cada piñón.

Calculo angulos de contacto piñon-cadena		
	Piñon Conductor	Piñon Conducido
Expresión	$\theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{D_2 - D_1}{2C} \right]$	$\theta_2 = 180^\circ + 2 \sin^{-1} \left[\frac{D_2 - D_1}{2C} \right]$
	Datos	
Diametro de paso	$D_1=108,2$ mm	$D_2=128,5$ mm
Distancia entre centros	$C = 20$	
Resultados		
	$\theta_1=177,71^\circ$	$\theta_2=182,28^\circ$

Fuente: Propia.

Figura 25. Esquema de la transmisión por cadena.



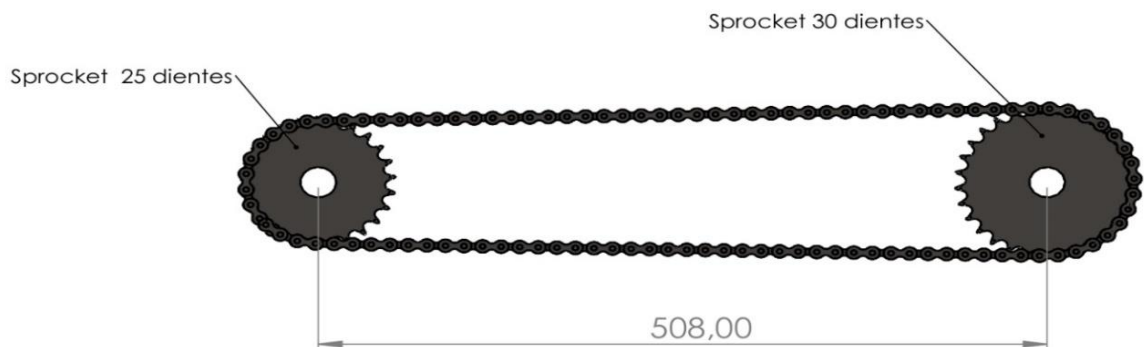
Fuente: Propia.

Por lo que al final como elementos seleccionados del catálogo de Intermec tenemos:

- Cadena estándar sencilla de rodillos No. 40, paso $\frac{1}{2}$ pulgada
- Piñones de 25 (conductor) y 30 dientes (conducido).
- Según catalogo deben ser piñones tipo B para poder maquinar los respectivos cuñeros.
- Lubricación tipo A, a mano o brocha.
- Cadena No. 40 de 54 pulgadas de longitud.

Ver Anexo G, para observar referencias y dimensionamiento de los piñones según fabricante.

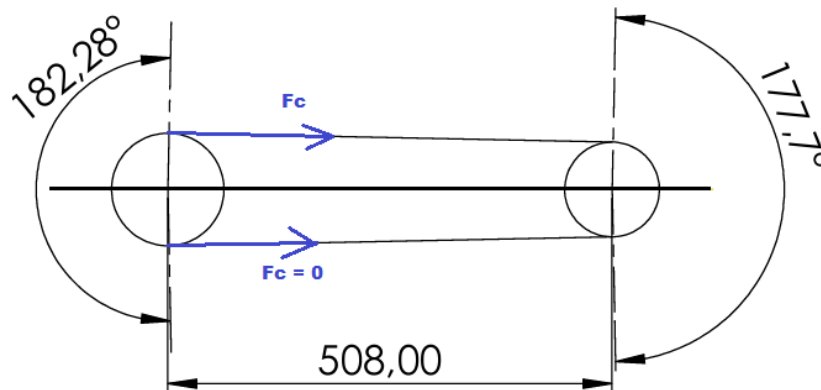
Figura 26. Transmisión de potencia por cadena diseñada.



Fuente: Propia.

5.2.3 Cálculo de fuerzas en la cadena. Para el posterior análisis en el diseño del eje motriz de la maquina tostadora de café es necesario conocer las fuerzas presentes. En la figura 27 se muestran las cargas que ejerce la cadena.

Figura 27. Cargas ejercidas por la cadena.



Fuente: Propia.

Por lo tanto, se realizó el cálculo de la fuerza que ejerce la cadena sobre el eje por medio de la siguiente expresión.

$$F_c = \frac{\tau}{D/2} \quad \text{Ec. (5.11)}$$

Donde:

- τ : Torque en el piñón [Nm]
- D : Diámetro de paso del piñón conducido [m]

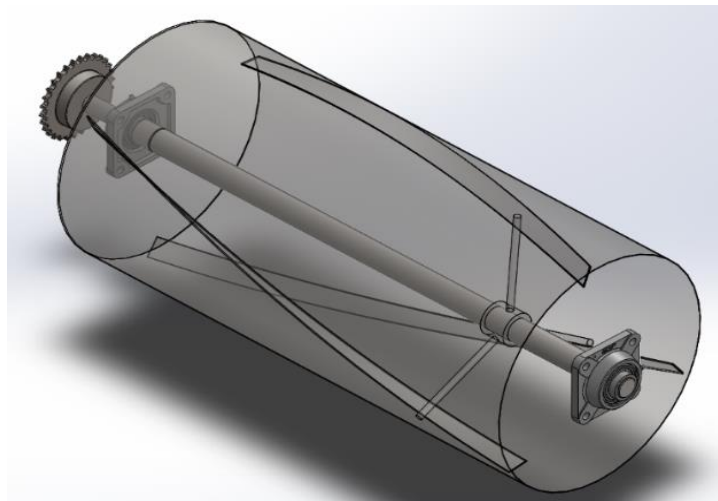
Para ello debemos conocer el torque, por lo que conociendo la potencia transmitida que en nuestro caso son 0,5 HP y aplicando la expresión para la potencia de un motor tenemos que $P_{ot} = \tau \cdot \omega$, despejando obtenemos que nuestro torque sería de $\tau = 71,21 \text{ Nm}$

Según el catálogo de Intermecc, nuestro piñón conducido tiene un diámetro de 128,5 mm, entonces al reemplazar en la ecuación 5.11 obtenemos que la fuerza ejercida por la cadena en el eje motriz es: $F_c = 1108,32 \text{ N}$

5.3 Diseño del eje motriz.

El eje motriz de la maquina tostadora sostiene un Sprocket de 30 dientes en un extremo y una horquilla solidaria a la cámara de tostado, y el conjunto es soportado por chumaceras. La distribución y ensamblaje de los elementos se muestra en la figura 28.

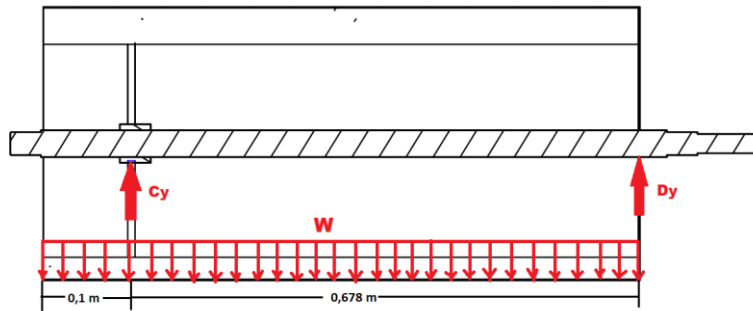
Figura 28. Distribución del eje motriz con sus elementos asociados.



Fuente: Propia.

5.3.1 Análisis estático cámara de tostado – eje motriz. Se realizó un diagrama de cuerpo libre del ensamble cámara de tostado – eje motriz en el cual se identificaron las fuerzas presentes. Como se observa en la figura 29, existen fuerzas de reacción hacia arriba en donde la cámara de tostado está en contacto con el eje motriz, esto se debe a que la fuerza ejercida por los granos de café en la pared inferior del cilindro hace que el sistema tienda a caer por gravedad, esta fuerza corresponde a la carga distribuida W presente en la ilustración.

Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de la cámara de tostado.



Fuente: Propia.

Se asumió que el café en el interior se distribuye de manera uniforme por todo el largo de la cámara de tostado. Por lo tanto, para calcular la carga distribuida aplicamos la siguiente expresión.

$$W = (\rho_{café} \cdot A_{trans} + \frac{m}{L}) \cdot g \quad \text{Ec. (5.12)}^{15}$$

Donde:

- $\rho_{café}$: Densidad del café: $391,44 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$.
- A_{trans} : Área transversal del cilindro: $0,275 \text{ m}^2$.
- m : Masa de café: 10 Kg .
- L : Longitud de la cámara de tostado: $0,778 \text{ m}$.
- g : Gravedad: $9,81 \text{ m/s}^2$

Reemplazando los obtenemos que $W = 1182 \text{ N/m}$.

Ya conocido el valor de la carga distribuida es posible calcular las reacciones C_y y D_y aplicando sumatoria de fuerzas y sumatoria de momentos en el ensamble.

¹⁵ LOZADA TIPÁN, Luis Carlos y PICO MANTILLA, Flavio Javier. Diseño y construcción de una tostadora continua de cebada. Tesis de grado de Ingeniero Mecánico. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. 2009. Pág. 90

$$\sum F_y = 0$$

$$C_y + D_y - W(0,778) = 0$$

$$\sum M_D = 0$$

$$W(0,778) \cdot (0,389) - C_y \cdot (0,678) = 0$$

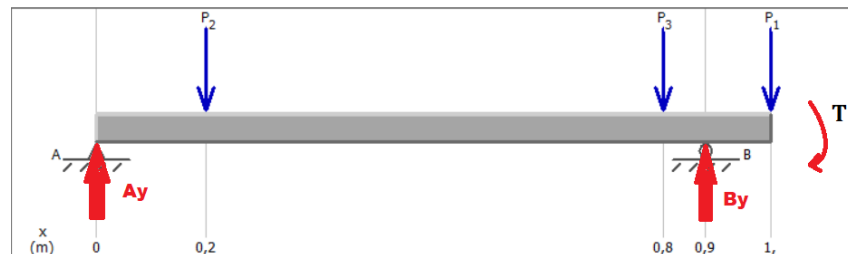
Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior obtenemos que las fuerzas resultantes en C y D son:

$$C_y = 391,98 \text{ N}$$

$$D_y = 527,61 \text{ N}$$

5.3.2 Análisis estático del eje motriz. Para el diseño del eje se realizó un análisis estático de cargas con el fin de calcular las fuerzas resultantes en cada apoyo en donde se alojan las chumaceras y obtener los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores correspondientes, para ello se trató el eje como si se tratara de una viga. A continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre del eje motriz para el análisis.

Figura 30. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz.



Fuente: Propia.

Como se observa en el sistema intervienen la fuerza P_1 equivalente a la componente de la fuerza ejercida por la cadena (calculada en la página 57) en el Sprocket de 30 dientes, las fuerzas resultantes de las chumaceras en los puntos A y B. Las fuerzas P_2 y P_3 son las fuerzas de reacción provenientes del análisis del ensamble entre la cámara de tostado con el eje.

De la figura 30 se procede a encontrar las fuerzas resultantes en los puntos A y B, realizando sumatoria de fuerzas en el eje motriz y sumatoria de momento.

$$\begin{aligned} \uparrow \sum F_y = 0 & & A_y + B_y - P_3 - P_1 - P_2 = 0 \\ \sum M_A = 0 & & -P_2 \cdot (0,2) - P_3 \cdot (0,8) + B_y \cdot (0,9) - P_1 = 0 \end{aligned}$$

Las fuerzas P_2 y P_3 son las reacciones C_y y D_y respectivamente, calculadas en el análisis del ensamble cámara de tostado – eje motriz.

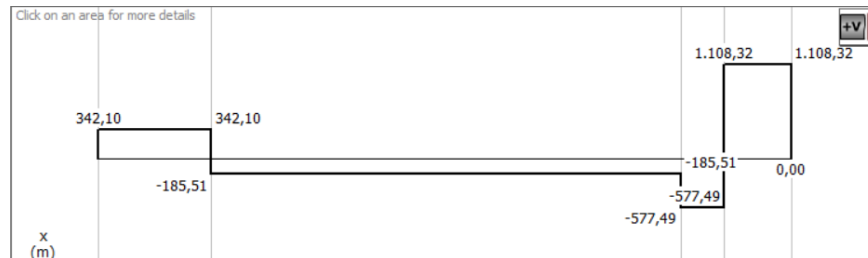
Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior obtenemos que las fuerzas resultantes en los puntos A y B son:

$$A_y = 342,10 \text{ N}$$

$$B_y = 1685,82 \text{ N}$$

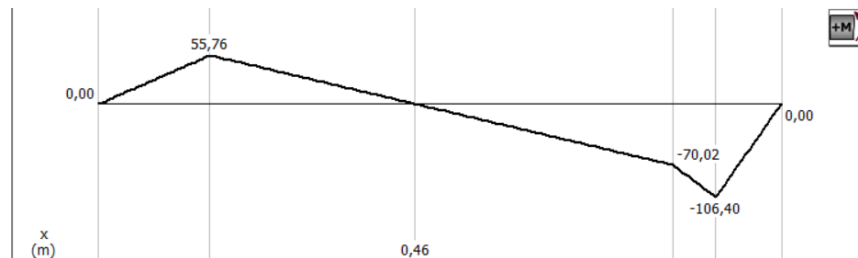
Ya calculadas las fuerzas en los apoyos es posible implementar los diagramas de fuerza cortante y momentos flexionante, presentados en las figuras 31 y figura 32.

Figura 31. Diagrama de fuerzas cortantes.



Fuente: Propia.

Figura 32. Diagrama de momento flexionante.



Fuente: Propia

Con base en los diagramas se observa que el punto B (lugar donde se aloja una chumacera) es el más crítico, ya que se encuentra bajo efectos del momento máximo y torque transmitido del motor al Sprocket conducido, por lo tanto, el análisis y cálculo del diámetro del eje debe iniciar en dicha sección. Tenemos que el valor de momento máximo y torque son los siguientes:

$$M_{max} = 106,40 \text{ N.m}$$

$$\tau = 71,21 \text{ N.m}$$

5.3.3 Cálculo del eje en su punto crítico. Para el iniciar con el cálculo y dimensionamiento del eje motriz debemos conocer el tipo de material a utilizar para su fabricación. En el caso del eje motriz se utilizará una barra de acero inoxidable A304 con las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la fluencia S_y : 276 MPa
- Resistencia ultima S_u : 568 MPa

El eje motriz al estar sometido a cargas cíclicas durante periodos de tiempo prolongados, puede sufrir fallas por fatiga por lo cual, para revertir y prevenir este tipo de falla, se realizó el análisis bajo el criterio de falla por fatiga de Goodman.

En la siguiente plantilla se calcula la resistencia a la fatiga (valor necesario para aplicar en los criterios de falla para cálculo de ejes), aplicando los diferentes factores que intervienen afectando la resistencia del material. Estos factores son el factor de superficie, factor de tamaño, factor de carga, factor de temperatura, factor de confiabilidad y el factor de efectos varios.

Tabla 7. Calculo límite de resistencia a la fatiga.

Limite de resistencia a la fatiga			
Ecuación	$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$		
Variables		Propiedades acero inoxidable A304	
Factor de superficie	$k_a = 0,83$	Variables	
Factor de tamaño	$k_b = 0,62$	Resistencia última	$S_{ut} = 568 \text{ Mpa}$
Factor de carga	$k_c = 1$	Resistencia a la fluencia	$S_y = 276 \text{ MPa}$
Factor de temperatura	$k_d = 1$	Resistencia a la fatiga	
Factor confiabilidad	$k_e = 0,814$	$S'_e = 0,5 \cdot S_{ut}$	
Factor efector varios	$k_f = 2,13$		
Resultados			
Resistencia a la fatiga		Limite de resistencia a la fatiga	
284 Mpa		253,39 Mpa	

Fuente: Propia.

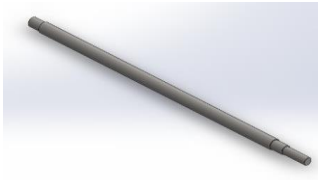
Como se puede observar de la tabla la resistencia a la fatiga del acero inoxidable se redujo considerablemente por el efecto de los factores anteriormente mencionados. En la sección de anexos se calculó cada uno de los factores dependiendo de la configuración del eje a construir: Anexo H.

Ya calculado el límite de resistencia a la fatiga, es posible aplicar el criterio de falla de Goodman para calcular el diámetro del eje mínimo de la sección.

Según Shigley¹⁶, si un eje es sometido a flexión y torsión constantes las variables M_m y T_a se igualan a 0 por lo tanto, la expresión presentada anteriormente se simplifica un poco. En la siguiente tabla se plantea la expresión simplificada para el cálculo del diámetro mínimo de la sección analizada, con sus respectivas variables a aplicar, el factor de seguridad tomado para el cálculo fue de 2.0, ya que es el mínimo recomendado para que el elemento sea resistente ante cualquier carga y no sufra ninguna ruptura o falla no deseada.

¹⁶ BUDYNAS, Richard G y NISBETT, J. Keith. Análisis de carga y esfuerzo. En: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 9 ed. McGrawHill. p. 353.

Tabla 8. Cálculo diámetro del eje en el punto crítico.

Cálculo diámetro eje en el punto B			
			
Ecuación	$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$		
Propiedades del Material		Cargas	
Variables		Variables	
Limite de resistencia a la fatiga	$S_e = 253,39 \text{ MPa}$	Momento alternante	$M_a = 106,40 \text{ N.m}$
Resistencia última	$S_{ut} = 568 \text{ Mpa}$	Torsión medio	$T_m = 71,21 \text{ N.m}$
Factores de concentrador de esfuerzos		Resultados	
Concentración de esfuerzo flexión	$K_f = 2,13$	$d = 0,028 \text{ m} \rightarrow 28 \text{ mm}$	
Concentración de esfuerzos torsión	$K_{fs} = 1,75$		

Fuente: Propia.

Según los datos obtenidos, el diámetro en donde se aloja el rodamiento en el punto de análisis B debe ser de mínimo 28 mm. Por lo tanto, el rodamiento debe poseer un diámetro de 28 mm o mayor, dependiendo de los diámetros que nos proporcione el fabricante.

5.4 Selección de rodamientos.

Para la selección de los rodamientos utilizados en los puntos A y B del eje, se realizó un análisis comparando la capacidad de carga del rodamiento con las cargas reales que actúan sobre el eje. Como se observa en el diagrama de cuerpo libre realizado en la página 60, en los soportes donde se alojan los rodamientos solo existen fuerzas radiales, por esta razón la mejor opción a seleccionar por las características de la maquina son los rodamientos de bolas. El fabricante de rodamientos SKF nos menciona en su catálogo que la carga equivalente dinámica del rodamiento de bolas está dada por la siguiente expresión:

$$P = 0,6F_r + 0,5F_a$$

Ec. (5.13)

Donde:

- P : Carga estática equivalente del rodamiento,
- F_r : Fuerza radial actual del rodamiento.
- F_a : Fuerza axial actual del rodamiento.

Conociendo que en los puntos A y B solo existen fuerzas radiales, tomamos la reacción más influyente en el sistema. Como sabemos el punto B es el más crítico y donde se calculó la mayor reacción. $F_r = B_y = 1685,82 N$

Dicho lo anterior y reemplazando en la ecuación 6.23, tenemos que la carga estática equivalente del rodamiento.

$$P = 1011,49 N$$

Según SKF, si la carga estática equivalente del rodamiento es menor a la fuerza radial entonces $P = F_r$. Según lo anterior tenemos que $P = 1685,82 N$.

El conjunto de rodamientos que se utilizará en la maquina tostadora de café, será una unidad de soporte con pestaña cuadrada la cual, en su interior cuenta con un rodamiento rígido de bolas. Se observó en el catálogo que para este tipo de unidades de rodamientos la capacidad de carga de los rodamientos de 28 mm de diámetro es muy alta lo que significa que son rodamientos utilizados en aplicaciones con mayor exigencia de funcionamiento, por lo que se tomó el siguiente diámetro disponible de 30 mm. El conjunto seleccionado fue el de designación **61806** con capacidad de carga de $C = 4490 N$.

Figura 33. Rodamiento de bolas seleccionado.



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado ¹⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	-
25	37	7	4,36	2,6	0,125	-	11 000	0,022	• 61805-2RS1	-
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	19 000	0,022	• 61805-2RZ	-
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	• 61805	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	-	10 000	0,045	• 61905-2RS1	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	18 000	0,045	• 61905-2RZ	-
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	• 61905	-
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,055	• 16005	-
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	• 4005	-
	47	12	11,9	6,55	0,275	-	9 500	0,081	• 6005-2RSH	6005-RSH
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,08	• 6005-2RSL	6005-RSL
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,083	• 6005-ZZ	6005-Z
	47	16	11,2	6,55	0,275	-	9 500	0,11	• 63005-2RS1	-
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	• 6205	-
	52	15	14,8	7,8	0,335	-	8 500	0,13	• 6205-2RSH	6205-RSH
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	14 000	0,13	• 6205-2RSL	6205-RSL
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	14 000	0,13	• 6205-ZZ	6205-Z
	52	15	17,8	9,3	0,4	28 000	18 000	0,12	• 6205 ETN9	-
	52	18	14	7,8	0,335	-	8 500	0,13	• 62205-2RS1	-
62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	• 6305	-	
62	17	23,4	11,6	0,49	-	7 500	0,24	• 6305-2RSH	6305-RSH	
62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	13 000	0,23	• 6305-2RZ	6305-RZ	
62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	13 000	0,23	• 6305-ZZ	6305-Z	
62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,22	• 6305 ETN9	-	
62	24	22,5	11,6	0,49	-	7 500	0,32	• 62305-2RS1	-	
80	21	35,8	19,3	0,815	20 000	13 000	0,54	• 6405	-	
28	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,17	• 62/28	-
	68	18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,3	• 63/28	-
30	42	7	4,49	2,9	0,146	-	9 500	0,025	• 61806-2RS1	-
	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	16 000	0,025	• 61806-2RZ	-
	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	20 000	0,025	• 61806	-
	47	9	7,28	4,55	0,212	-	8 500	0,051	• 61906-2RS1	-
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	15 000	0,051	• 61906-2RZ	-
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	19 000	0,049	• 61906	-

Fuente: SKF. Catalogo SKF Rodamientos. 2019. Pág. 272. Disponible en: <https://www.skf.com/co>.

5.4.1 Cálculo del rodamiento en función de su vida nominal. Para corroborar que la unidad de rodamientos seleccionada es la adecuada se analizara de acuerdo a la vida nominal del rodamiento, la cual nos indicara cuantas horas de funcionamiento se estima que tendrá antes de su cambio.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \tag{Ec. (5.14)}$$

Donde:

- L_{10} : Vida nominal [millones de revoluciones]

- C : Capacidad de carga dinámica del rodamiento.
- P : Carga estática del rodamiento.
- p : Exponente de la ecuación de vida, 3 en rodamientos de bolas.

De la unidad de rodamiento seleccionado tenemos que su capacidad de carga dinámica es de 4490 N y al calcular la carga estática obtuvimos que era de 1685,82 N, por lo que al reemplazar en la ecuación de vida nominal del rodamiento se obtiene:

$$L_{10} = 18,89 \text{ [millones de revoluciones]}$$

Para una mejor orientación de la vida útil del rodamiento calculamos las horas de funcionamiento estimadas del rodamiento.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad \text{Ec. (5.15)}$$

Donde:

- L_{10h} : Vida nominal [horas de operación]
- n : Velocidad rotacional [rpm]
- L_{10} : Vida nominal [millones de revoluciones]

Sabemos que el eje donde estarán alojados los rodamientos tiene una velocidad rotacional de 50 rpm, reemplazando la vida nominal anteriormente calculada en la ecuación 5.14, obtenemos que los rodamientos tendrán una vida de uso de aproximada de $L_{10h} = 6296,67 \text{ horas}$.

Analizando este resultado notamos que es un tiempo de vida aceptable, por el motivo de que la maquina será utilizada dependiendo de la cosecha, es decir utilizada de forma intermitente durante breves periodos de tiempo.

5.5 Dimensionamiento general del eje.

Para concluir con el dimensionamiento del eje se tiene que los diámetros donde va posicionada la horquilla y el sprocket de 30 dientes aún no se han establecido. Según Shingley los hombros para apoyar los cojinetes y elementos mecánicos en un eje normalmente necesitan que la relación D/d este entre 1,2 y 1,5; para los hombros del eje se tomó el valor de 1,2. A continuación se presenta el cálculo del diámetro de las secciones donde se encuentran ubicadas la horquilla y el sprocket aplicando la relación anteriormente mencionada.

$$\frac{D}{d} = 1,2 \quad \text{Ec. (5.16)}$$

Donde:

- D : Diámetro mayor de la sección [mm]
- d : Diámetro menor de la sección [mm]

Tabla 9. Calculo de diámetros por secciones.

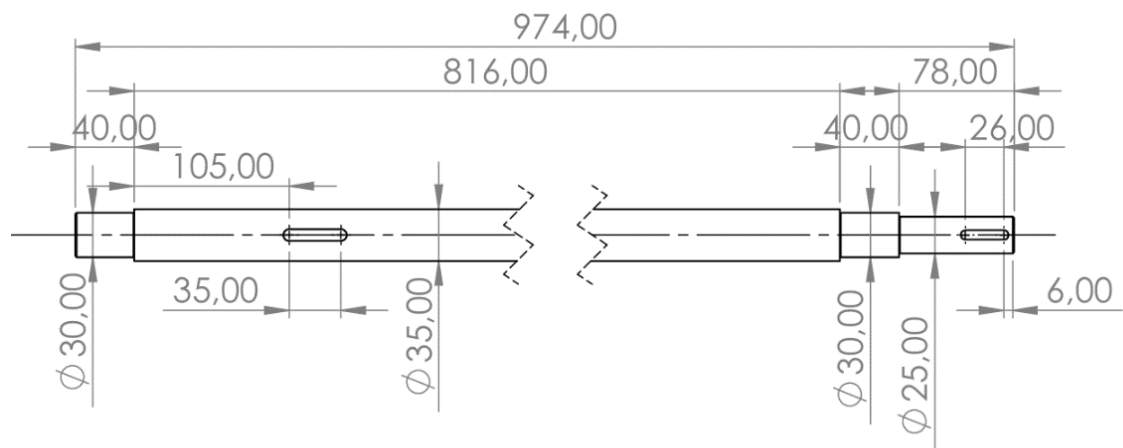
DIMENSIONAMIENTO GENERAL DEL EJE		
Ecuación	$\frac{D}{d} = 1,2$	
DIAMETRO DEL EJE EN LA UBICACIÓN DE LA HORQUILLA		
d	30 mm	
Resultado	D	35 mm
DIAMETRO DEL EJE EN LA UBICACIÓN DEL SPROCKET		
D	30 mm	
Resultado	d	25 mm

Fuente: Propia.

6.5.1 Resultados del eje. A continuación, se mencionan los datos generales del eje motriz:

- **Diámetro del eje en la ubicación de la horquilla:** 35 mm
- **Diámetro del eje en la ubicación del sprocket:** 25 mm
- **Diámetro de alojamiento del rodamiento:** 30 mm

Figura 34. Dimensiones del eje motriz.



Fuente: Propia.

5.6 Dimensionamiento de los chaveteros.

En el dimensionamiento de los cuñeros se utilizó el catalogo INTERMERC para obtener las medidas estandarizadas. Para ello se necesita el diámetro del agujero en donde se maquinarán los chaveteros, es decir, en el caso del eje motriz correspondería a los diámetros donde se alojan la horquilla y el sprocket de 30 dientes.

Diámetros necesarios:

- **Diámetro del eje motriz en la sección del sprocket: 25 mm**
- **Diámetro del eje motriz en la sección de la horquilla: 35 mm**

Con los datos anteriormente mencionados, se revisa en la tabla de referencias del catálogo INTERMEC con el fin de dimensionar la cuña.

Tabla 10. Referencias de cuñas cuadradas.

Diámetro del eje (pulg)		Cuñero (pulg)		Cuña (pulg)		Diámetro del prisionero (pulg)
Desde	Hasta	Ancho (A)	Profundidad (Ph)	Ancho	Profundidad (H)	
5/16	7/16	3/32	3/64	3/32	3/32	1/8
1/2	9/16	1/8	1/16	1/8	1/8	1/8
5/8	7/8	3/16	3/32	3/16	3/16	10-24
15/16	1 1/4	1/4	1/8	1/4	1/4	1/4
1 5/16	1 3/8	5/16	5/32	5/16	5/16	5/16
1 7/16	1 3/4	3/8	3/16	3/8	3/8	3/8
1 13/16	2 1/4	1/2	1/4	1/2	1/2	1/2
2 5/16	2 3/4	5/8	5/16	5/8	5/8	1/2
2 13/16	3 1/4	3/4	3/8	3/4	3/4	5/8
3 5/16	3 3/4	7/8	7/16	7/8	7/8	5/8
3 13/16	4 1/2	1	1/2	1	1	3/4
4 9/16	5 1/2	1 1/4	5/8	1 1/4	1 1/4	3/4
5 9/16	6 1/2	1 1/2	3/4	1 1/2	1 1/2	3/4
6 9/16	7 1/2	1 3/4	3/4	1 3/4	1 3/4	7/8
7 9/16	9	2	3/4	2	2	7/8

Fuente: INTERMEC. Cuñas y cuñeros estándar. Disponible en: <https://www.intermec.com.co/literatura>.

De la tabla de referencias se seleccionaron las dimensiones para cuñas cuadradas de diámetros de eje de 25 mm y 35 mm obteniendo como resultado el ancho y profundidad de cada una de las cuñas a maquinar.

5.6.1 Datos de las cuñas. Finalizando con el dimensionamiento de las chavetas y chaveteros, se debe calcular la longitud mínima necesaria que deben poseer los cuñeros, analizando en cada uno de ellos el esfuerzo de compresión ejercido en las caras de la chaveta. En las tablas 11 y 12 se evidencian las dimensiones calculadas se cada una de las secciones que requiere del maquinado.

Tabla 11. Calculo longitud mínima del chavetero de la horquilla.

CHAVETERO DE LA HORQUILLA			
Dimensiones			
Ancho	W	5/16	7,94 mm
Alto	H	5/16	7,94 mm
CALCULO LONGITUD CHAVETERO			
Ecuación	$L = \frac{4TN}{DWS_y}$		
Variables		Valor	
Torque	T	71,21 N-m	
Factor de servicio	N	3	
Diametro eje	D	0,035 m	
Ancho chavetero	W	0,00794 m	
Limite elastico	S _y	206,84 Mpa	
Resultado			
$L = 0,015 m \rightarrow 15 mm$			

Fuente: Propia.

Tabla 12. Calculo longitud mínima del chavetero del sprocket.

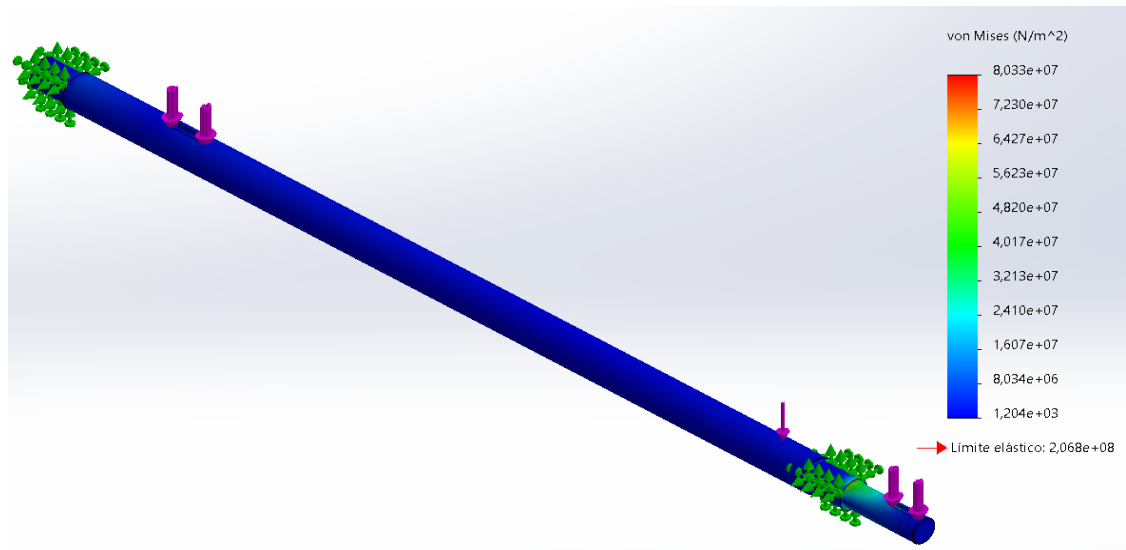
CHAVETERO DEL SPROCKET 30 DIENTES			
Dimensiones			
Ancho	W	1/4	6,35 mm
Alto	H	1/4	6,35 mm
CALCULO LONGITUD CHAVETERO			
Ecuación	$L = \frac{4TN}{DWS_y}$		
Variables		Valor	
Torque	T	71,21 N-m	
Factor de servicio	N	3	
Diametro eje	D	0,025 m	
Ancho chavetero	W	0,00635 m	
Limite elastico	S _y	206,84 Mpa	
Resultado			
$L = 0,026 m \rightarrow 26 mm$			

Fuente: Propia.

5.7 Simulación eje motriz.

Para la simulación del eje motriz se ubicaron en el eje las sujeciones correspondientes en donde se posiciona cada uno de los rodamientos y las fuerzas que actúan (fuerza de la cadena, fuerzas de reacción donde el eje hace contacto con la cámara de tostado). Se analizaron los esfuerzos de Von Mises, las deformaciones existentes y el factor de seguridad, como se observa en la figura 35, figura 36 y figura 37.

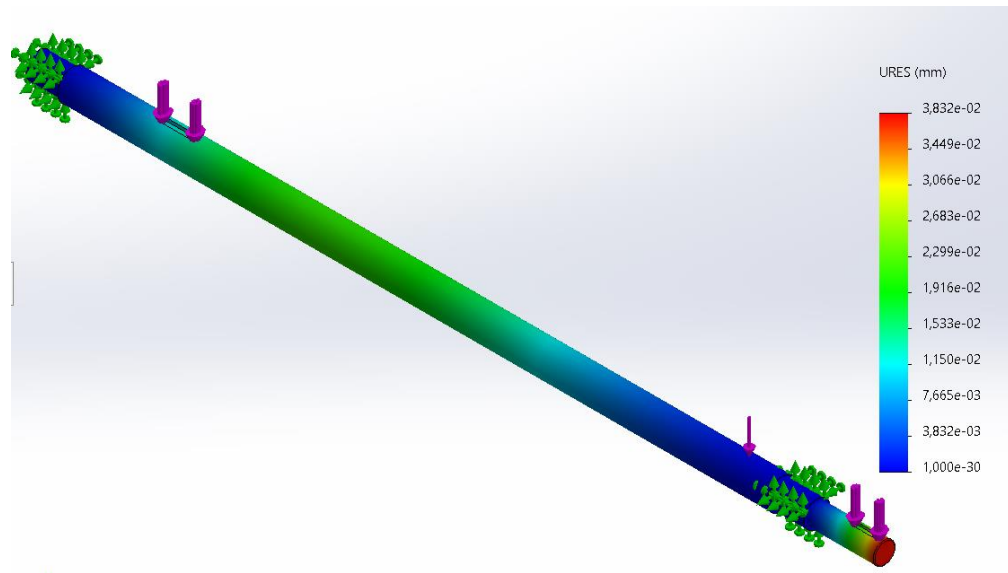
Figura 35. Grafica de esfuerzos en el eje motriz.



Fuente: Propia.

A partir de la figura 35 se observa que el punto crítico se encuentra en el cambio de sección que existe entre donde está ubicado el sprocket y el rodamiento, este esfuerzo es de aproximadamente de $4,017 \times 10^7$ Pa , dato del cual era de esperar ya que en este punto es donde se presenta el mayor momento flexionante. Pero según lo observado se concluye que el eje no presentara ningún tipo de falla, ya que los esfuerzos a lo largo de todo el eje motriz no superan el valor del límite elástico del material de $2,086 \times 10^8$ Pa , lo cual nos indica que el eje es confiable para la aplicación.

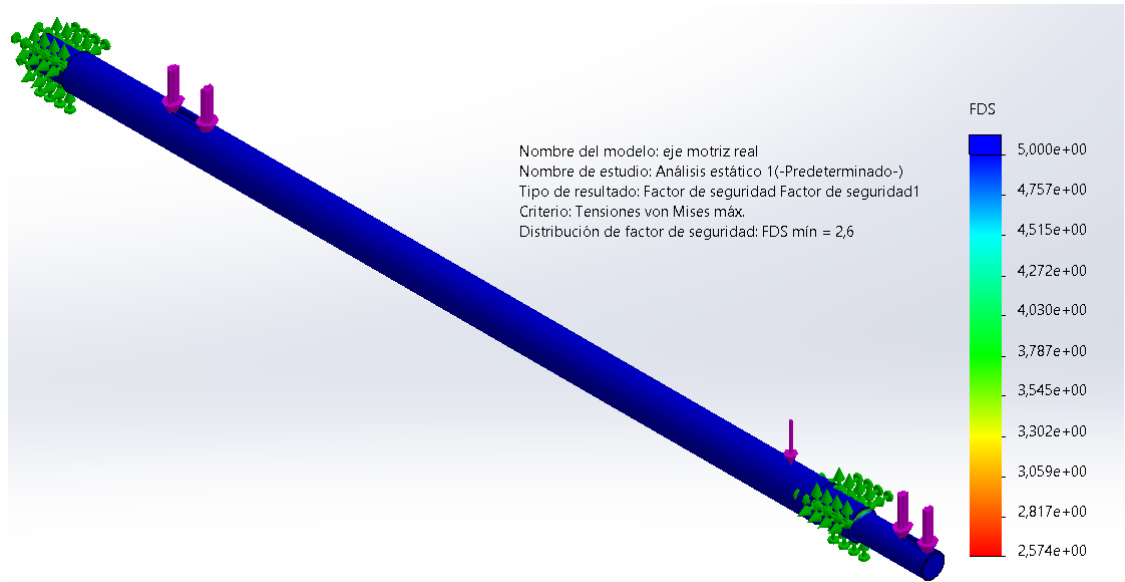
Figura 36. Grafica de desplazamientos en el eje motriz



Fuente: Propia.

Según la figura 36 los desplazamientos en el eje motriz por acción de las fuerzas aplicadas son muy bajos, estos desplazamientos van desde el rango de $3,832 \times 10^{-3} \text{ mm}$ hasta $3,448 \times 10^{-2} \text{ mm}$, pero en la parte donde se ubica el sprocket se produce el desplazamiento más pronunciado del sistema, dicho desplazamiento es de $3,832 \times 10^{-2} \text{ mm}$ lo cual es normal ya que es un punto alejado de los rodamientos. Según lo analizado dichos desplazamientos son muy pequeños por lo cual el eje no sufrirá cambios significativos en su estructura que afecte en el funcionamiento de la maquina por efectos de des alineamiento o alguna ruptura en la pieza.

Figura 37. Grafica del factor de seguridad del eje motriz.



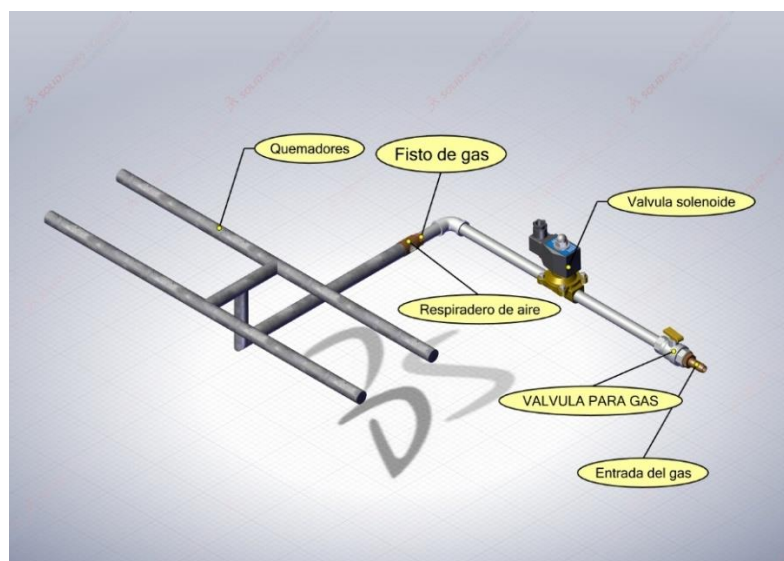
Fuente: Propia.

El factor de seguridad de una pieza o sistema nos indica que tan confiable va a ser en la aplicación establecida. La figura 37 nos muestra la gráfica del factor de seguridad del eje motriz, al aplicar las fuerzas reales nos indicó que la pieza alcanzó un factor de seguridad mínimo de 2,6 el cual es aceptable ya que, si observamos las gráficas anteriormente mencionadas, el eje no soporta grandes cargas y si se aumentara el factor de seguridad no sería viable ya que los costos de fabricación aumentarían al necesitar diámetros de ejes mayores, y con esto no tendría algún impacto ya que seguiría funcionando de la misma manera que con el factor de seguridad obtenido en la simulación.

6. DISEÑO DEL SISTEMA DE QUEMADORES

El sistema de quemadores es el encargado de proporcionar el poder calorífico necesario para calentar la cámara de tostado y así poder realizar el proceso de tueste de los granos de café que se encuentran en el interior. Este sistema está constituido por un quemador construido en tubería galvanizada, un fisto de gas, una válvula solenoide y tubería de transporte del gas que ingresa a los quemadores como se observa en la figura 38.

Figura 38. Sistema de quemadores.



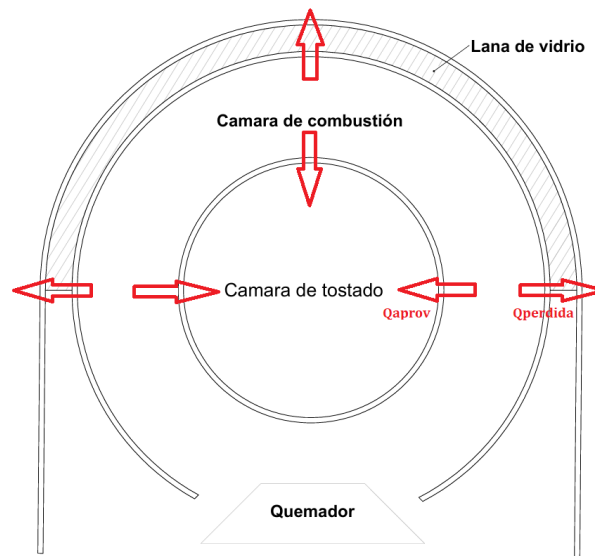
Fuente: Propia.

Para el diseño del sistema de quemadores en primera instancia es necesario calcular las temperaturas y calores presentes, con el fin de conocer que tanta potencia debe poseer el quemador para un funcionamiento óptimo y alcanzar la temperatura deseada para el tueste del café (200°C).

6.1 Temperaturas y calores de la máquina.

En la máquina tostadora de café están presentes dos flujos de calor que parten desde la cámara de combustión y van orientados uno del otro de forma opuesta. El flujo dirigido hacia el exterior de la maquina es el calor perdido por el sistema y el flujo entrante hacia la cámara de tostado es el calor aprovechado, el cual se encarga de tostar los granos de café, estos flujos de calor se pueden apreciar en la figura 39.

Figura 39. Flujos de calor en la maquina tostadora de café.

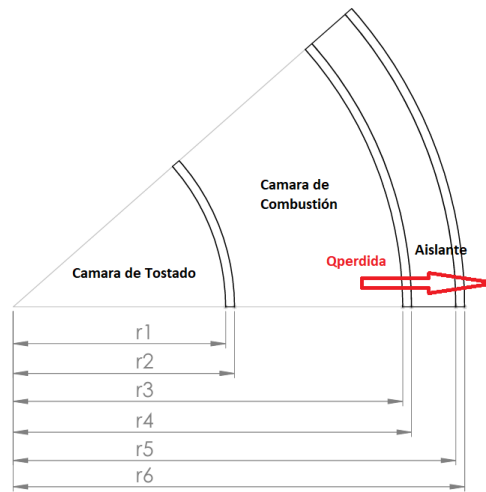


Fuente: Propia.

Una vez conocida la dirección que tomara cada uno de los flujos, se procede a analizar cada uno de los flujos de calor por separado para poder calcular las temperaturas y el valor total de los calores relevantes en el sistema.

6.1.1 Calculo de calor perdido hacia el exterior. Para el cálculo del calor que fluye hasta el exterior se debe analizar el sistema desde la cámara de combustión hasta la capa externa de la máquina, como se observa en la figura 40.

Figura 40. Capas del sistema para flujo de calor perdido al exterior.



Fuente: Propia.

Para el cálculo se aplica la ecuación general del flujo de calor:

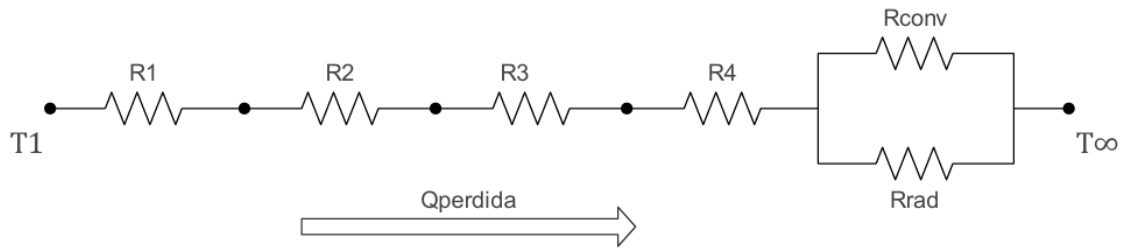
$$Q_{perdida} = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad \text{Ec. (6.1)}$$

Donde:

- $Q_{perdida}$: Calor perdido hacia el exterior. [W]
- T_{∞} : Temperatura ambiente. [°C]
- T_1 : Temperatura en la cámara de combustión. [°C]
- $R_{equivalente}$: Resistencia térmica equivalente del flujo de calor. [°C/W]

Como se observa en la ecuación 6.1 es necesario hallar la resistencia equivalente, para ello se plantea una red de resistencias desde la cámara de combustión al exterior de la maquina como se muestra en la siguiente figura.

Figura 41. Red de resistencias térmicas para el flujo de calor perdido.



Fuente: Propia.

La resistencia térmica equivalente será igual a la suma de todas las resistencias:

$$R_{equivalente} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad \text{Ec. (6.2)}$$

Cada una de las resistencias se determina utilizando las ecuaciones de resistencias térmicas de conducción y convección en cilindros, según actué en el sistema.

Analizando la red de resistencias térmicas de la figura 41 tenemos que la resistencia térmica equivalente del sistema está dada por la siguiente expresión.

$$R_{equivalente} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{ainox} \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_L \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_6}{r_5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_a \cdot L} + \frac{1}{(h_\infty + h_r) \cdot A_\infty}$$

Como se evidencia necesitamos los valores de las distancias de los radios de los cilindros y las áreas transversales de las capas por donde fluye el calor hacia el exterior, estos valores se evidencian en la siguiente tabla.

Tabla 13. Distancias y Áreas del sistema para flujo al exterior.

Distancias	
r_3 (m)	0,290
r_4 (m)	0,291
r_5 (m)	0,324
r_6 (m)	0,331
Areas	
A_1 (m^2)	1,41
A_∞ (m^2)	1,61

Fuente: Propia.

Los datos correspondientes a la conductividad térmica del acero inoxidable y el aislante de lana de vidrio, como también el coeficiente de convección y radiación fueron extraídos de tablas de libros de transferencia de calor y se plasmaron en la siguiente tabla.

Tabla 14. Coeficientes del sistema para flujo al exterior.

Coeficientes	
k_{ainox} ($W/m^\circ C$)	14,9
k_L ($W/m^\circ C$)	0,046
k_a ($W/m^\circ C$)	14,9
h_1 ($W/m^2^\circ C$)	5
h_∞ ($W/m^2^\circ C$)	5
h_r ($W/m^2^\circ C$)	11

Fuente: Propia.

En el caso del coeficiente de convección del aire dentro de la cámara de combustión como en el exterior se presenta convección natural, por lo cual se utilizó su valor más bajo para simplificar los cálculos.

Teniendo en cuenta los valores anteriormente mencionado y sustituyendo en la expresión de la resistencia térmica obtenemos:

$$R_{equivalente} = 0,658 \frac{^{\circ}C}{W}$$

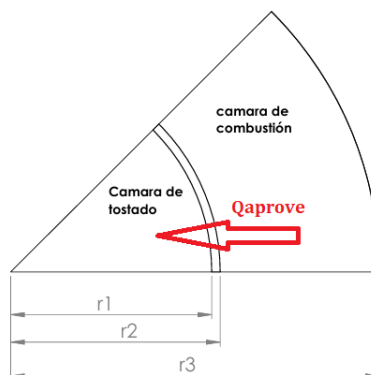
Conocida la resistencia térmica equivalente del sistema reemplazamos en la ecuación 6.1

$$Q_{perdida} = \frac{T_1 - 27}{0,658}$$

No conocemos la temperatura en el interior de la cámara de combustión por lo que se utilizara el cálculo del flujo de calor aprovechado para conocer dicha temperatura.

6.1.2 Calculo del calor aprovechado. El flujo de calor que se dirige hacia el interior de la maquina tostadora es el encargado de proporcionar la energía a los granos de café para su tueste, este flujo es el calor aprovechado por el sistema. El flujo se dirige desde la cámara de combustión hacia la cámara de tostado como se muestra en el siguiente esquema.

Figura 42. Capas del sistema para el flujo de calor aprovechado.



Fuente: Propia.

Para el cálculo del flujo de calor aprovechado se aplica la expresión:

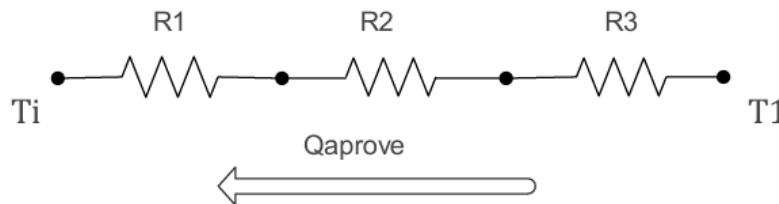
$$Q_{aprov} = \frac{T_1 - T_i}{R_{equiAprov}} \quad \text{Ec. (6.3)}$$

Donde:

- T_1 : Temperatura interior de la cámara de combustión. [°C]
- T_i : Temperatura interior de la cámara de tostado. [°C]
- $R_{equiAprov}$: Resistencia térmica equivalente del flujo aprovechado. [°C/W]

Al igual que con el calor perdido se plantea una red de resistencias desde la cámara de combustión hacia el interior de la cámara de tostado, dicho esquema se realiza con el fin de un mejor análisis del proceso.

Figura 43. Red de resistencias térmicas para el flujo de calor aprovechado.



Fuente: Propia.

La resistencia equivalente será igual a la suma de las resistencias que van desde T_1 a T_i :

$$R_{equivAprov} = R_1 + R_2 + R_3 \quad \text{Ec. (6.4)}$$

Para el cálculo de cada resistencia térmica utilizamos las ecuaciones de resistencias por convección y conducción planteadas anteriormente por lo tanto tenemos que:

$$R_{equivAprov} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_a \cdot L} + \frac{1}{h_1 \cdot A_1}$$

En las siguientes tablas se presentan las distancias, coeficientes y áreas necesarias para el cálculo de la resistencia equivalente:

Tabla 15. Distancias y Áreas del sistema para flujo aprovechado.

Distancias	
r_1 (m)	0,177
r_2 (m)	0,178
Áreas	
A_1 (m^2)	0,87
A_i (m^2)	0,865

Fuente: Propia.

Tabla 16. Coeficientes del sistema para flujo aprovechado.

Coeficientes	
k_a ($W/m^{\circ}C$)	14,9
h_1 ($W/m^2^{\circ}C$)	5
h_i ($W/m^2^{\circ}C$)	18

Fuente: Propia.

El coeficiente de convección del aire dentro de la cámara de tostado se tomó teniendo en cuenta que esta tiene una velocidad baja por lo cual se espera que se presente convección natural. Con lo anteriormente mencionado y reemplazando en la ecuación 6.6 obtenemos el resultado de la resistencia térmica equivalente:

$$R_{equivAprov} = 0,211 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Si visualizamos bien la ecuación 6.5 aun no podemos obtener el valor de T_1 ni el valor total del calor aprovechado por lo cual procedemos a analizar la energía necesaria para que los granos de café se tuesten.

6.1.3 Energía requerida para el tueste de los granos de café. La energía que requieren los granos para ser tostados se calcula aplicando la primera ley de la termodinámica, como se muestra en la siguiente expresión:

$$Q_{aprov} = m \cdot C_p (T_i - T_{amb}) \quad \text{Ec. (6.5)}$$

Donde:

- m : Masa total de granos de café [Kg]
- C_p : Calor específico del café. [$Kj/Kg \cdot ^\circ C$]
- T_i : Temperatura en el interior de la cámara de tostado. [$^\circ C$]
- T_{amb} : Temperatura ambiente de Bucaramanga. [$^\circ C$]

La masa total será la capacidad máxima de la maquina tostadora, es decir 10 Kg de producto.

La temperatura de los granos de café será con la que ingresan a la máquina, esta será la temperatura ambiente $27^\circ C$ y la temperatura en el interior de la cámara de tostado será de $200^\circ C$, la cual es la necesaria para un buen proceso de tostado.

Para obtener el valor de C_p nos basamos en el estudio realizado por CENICAFE¹⁷, el cual calcularon el C_p del café mediante la ecuación:

$$C_p = 1,3556 + 5,7859M \quad \text{Ec. (6.6)}$$

Donde el valor de M hace referencia al contenido de humedad en base seca del café a utilizar, normalmente el contenido de humedad del café ronda entre los 10%

¹⁷ MONTOYA RESTREPO, Esther C.; OLIVEROS TASCÓN, Carlos E.; ROA MEJÍA, Gonzalo. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Cenicafé. 1990. Pág. 30.

a 13%, para el cálculo se utilizará un contenido de humedad de un 12%. Por lo tanto, al reemplazar en la ecuación 6.6 tenemos que:

$$C_p = 2,049 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$$

Con lo anteriormente mencionado se reemplaza en la ecuación 6.7 para obtener el valor de la energía necesaria para tostar los granos de café.

$$Q_{aprov} = 2952 \text{ W}$$

Esta energía equivaldría a el flujo de calor que viaja desde la cámara de combustión hacia el interior de la cámara de tostado, por lo que si reemplazamos en la ecuación 6.3 se podría calcular el valor de la temperatura en el interior de la cámara de combustión.

$$T_1 = (Q_{aprov} \cdot R_{equivAprov}) + T_i$$

$$T_1 = 822,87^\circ C$$

Si revisamos las especificaciones del material utilizado (acero inoxidable AISI 304) para la cámara de combustión y la cámara de tostado, el fabricante recomienda que el material trabaje en un rango de temperatura entre 450°C y 850°C y según el resultado obtenido se trabajara en aproximadamente 825°C, por lo tanto, se concluye que los espesores de lámina seleccionados se adecuan perfectamente con los requerimientos.

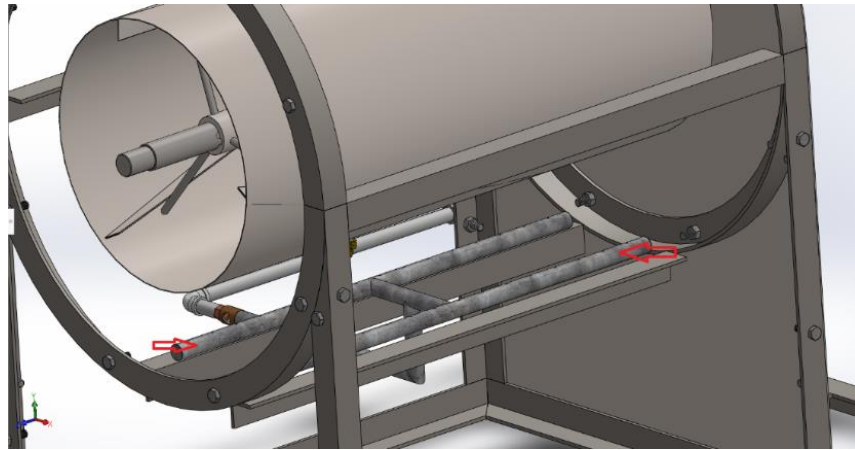
Ya calculada la temperatura en el interior de la cámara de combustión, podemos desarrollar la ecuación 6.1 y obtener el resultado del flujo de calor perdido hacia el exterior.

$$Q_{perdida} = \frac{822,87 - 27}{0,658} \rightarrow Q_{perdida} = 1209,52 \text{ W}$$

6.2 Diseño de los quemadores

Los quemadores serán construidos en tubería galvanizada de $\frac{3}{4}$ " en forma de H con el fin de poseer dos hileras de llama en la parte inferior de la cámara de tostado, dicha distribución se puede visualizar en la siguiente figura.

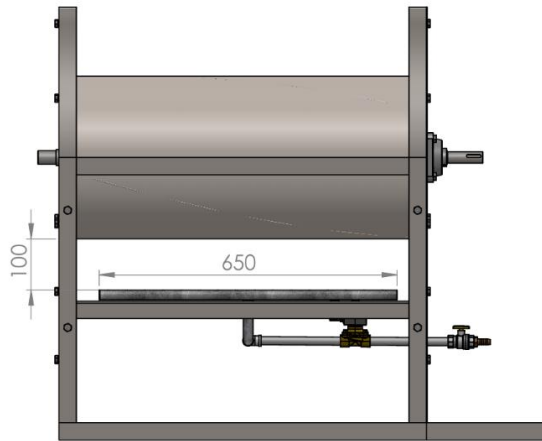
Figura 44. Distribución de los quemadores en la máquina.



Fuente: Propia.

Dicha distribución nos permite que la totalidad de la cámara de tostado se caliente ayudando a transmitir el calor de forma uniforme a los granos de café en el interior, también como se observa los quemadores van apoyados y soldados a la estructura metálica de la máquina. Los quemadores en la parte superior están perforados lo cual permitirá la salida de gas y con ayuda de unas bujías poder encender la llama, a su vez para que la llama tenga una distancia prudente y que no tienda a apagarse por sofocación se dejó una separación entre el quemador y la cámara de tostado de 10 cm como se observa en la siguiente figura.

Figura 45. Distancia entre quemador y cámara de tostado.

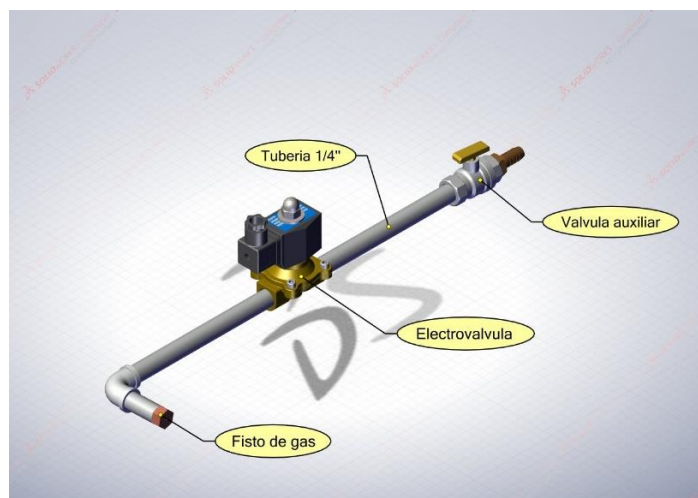


Fuente: Propia.

6.3 Sistema de alimentación de combustible

Para suministrar el gas a los quemadores es necesario implementar una serie de elementos para un funcionamiento óptimo del sistema en general. En la siguiente figura se evidencian los elementos que posee esta red de tubería para controlar el suministro de gas en el funcionamiento automatizado de la máquina. En el Anexo J se muestran los elementos seleccionados.

Figura 46. Elementos suministro de combustible



Fuente: Propia.

7. DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL

Los tableros de control son muy utilizados en la industria, ya que en él se albergan los diferentes componentes eléctricos necesarios para el funcionamiento de maquinaria como interruptores, perillas y componentes para el control de alguna variable deseada. Las principales funciones de los tableros de control es la centralización de operaciones de control, la seguridad eléctrica y mejora de la organización del sistema, es decir presentar un cableado organizado y buena visualización de los componentes para un posterior mantenimiento o resolución de algún problema futuro.

Para el diseño del tablero de control de la maquina tostadora de café es necesario establecer el tipo de variables a controlar. Para ello se describe a continuación el funcionamiento de la maquina a detalle con el fin identificar que elementos eléctricos y de control son necesarios para su aplicación en la máquina.

7.1. Descripción del funcionamiento de la maquina tostadora de café.

Para el óptimo funcionamiento y cumplir con los requerimientos planteados, la maquina tostadora de café debe funcionar de la siguiente manera.

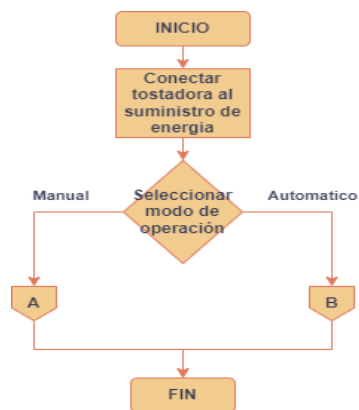
- Una vez conectada a la red de suministro eléctrico, la caja de control quedará energizada, el operario de la maquina tendrá la opción de seleccionar dos tipos de uso (trabajo manual o automático).
- Al seleccionar uno de los dos modos, se envía una señal a la válvula solenoide la cual se energizará y se activará, empezando así a suministrar gas a los quemadores.
- Al poco tiempo (4 segundos) de energizada la válvula, el chispero empieza a funcionar generando la llama en los quemadores.
- Dependiendo del modo seleccionado el motor monofásico debe empezar a rotar en contra de las manecillas del reloj, con el único fin de ocasionar que

los granos de café por el diseño de las aspas se dirijan hacia el interior de la cámara de tostado.

- Mientras la cámara de tostado está rotando, se estará monitoreando la temperatura al interior de ella, mediante un sensor de temperatura el cual estará conectado a un controlador de temperatura, esto se realiza para controlar la temperatura dentro de la cámara de tostado la cual no debe superar los 200°C, si temperatura se sobrepasa la válvula solenoide se cerrará y dejará de suministrar gas a los quemadores.
- Una vez pasados aproximadamente 25 min, el motor cambiara su rotación a favor de las manecillas del reloj, para finalmente extraer los granos de la máquina.

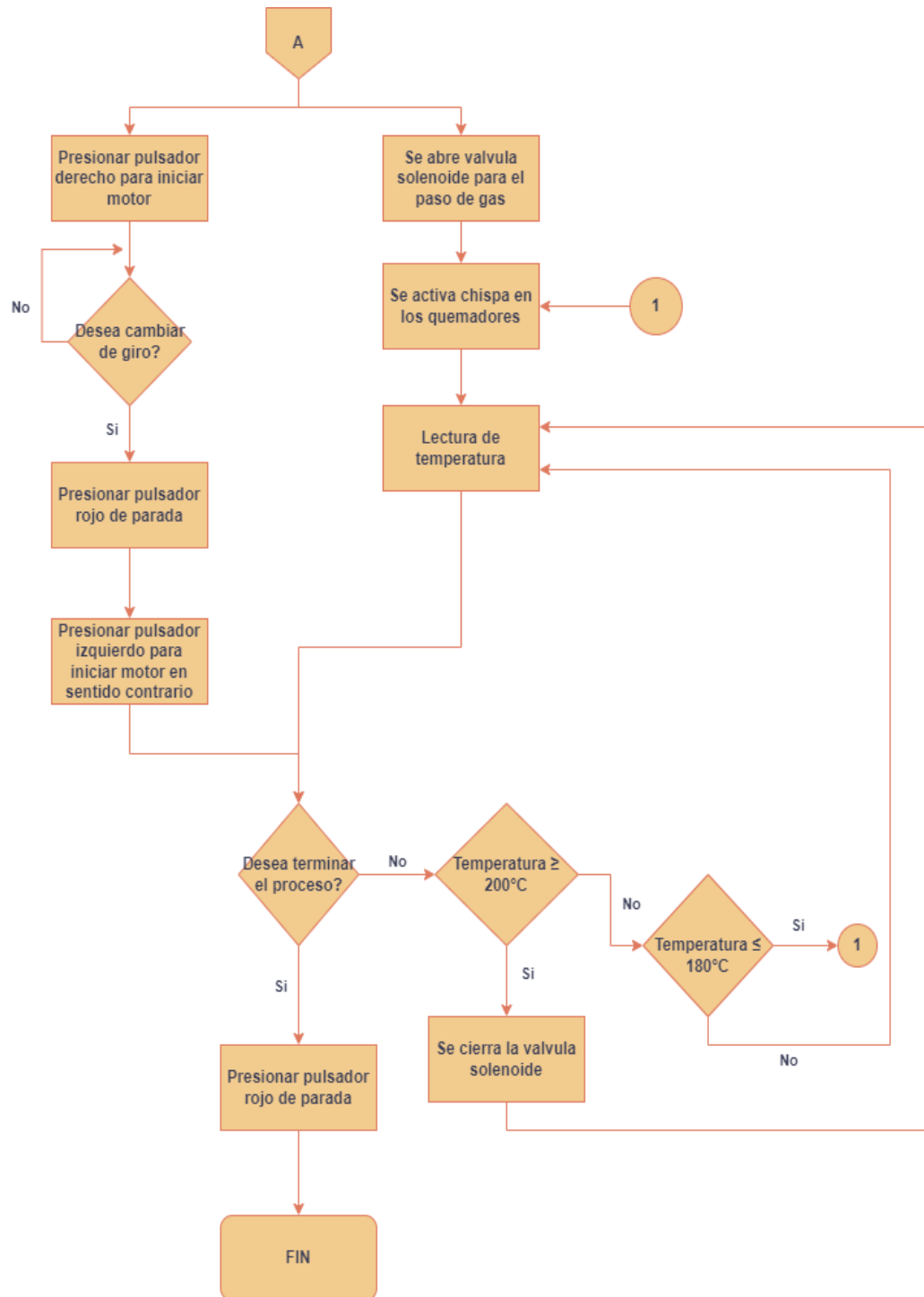
Como se puede analizar del funcionamiento de la máquina anteriormente mencionado, la caja de control debe poseer uso manual y automático, aplicación de un controlador de temperatura con su respectivo sensor para garantizar los 200°C y para el manejo de las señales enviadas a la válvula solenoide y el chispero, como también al cambio de rotación del motor y el sistema controlador de temperatura, se utilizará un controlador lógico programable PLC. A continuación, se presenta el diagrama de flujo general del sistema de control de la maquina tostadora.

Figura 47. Diagrama de flujo general de la máquina.



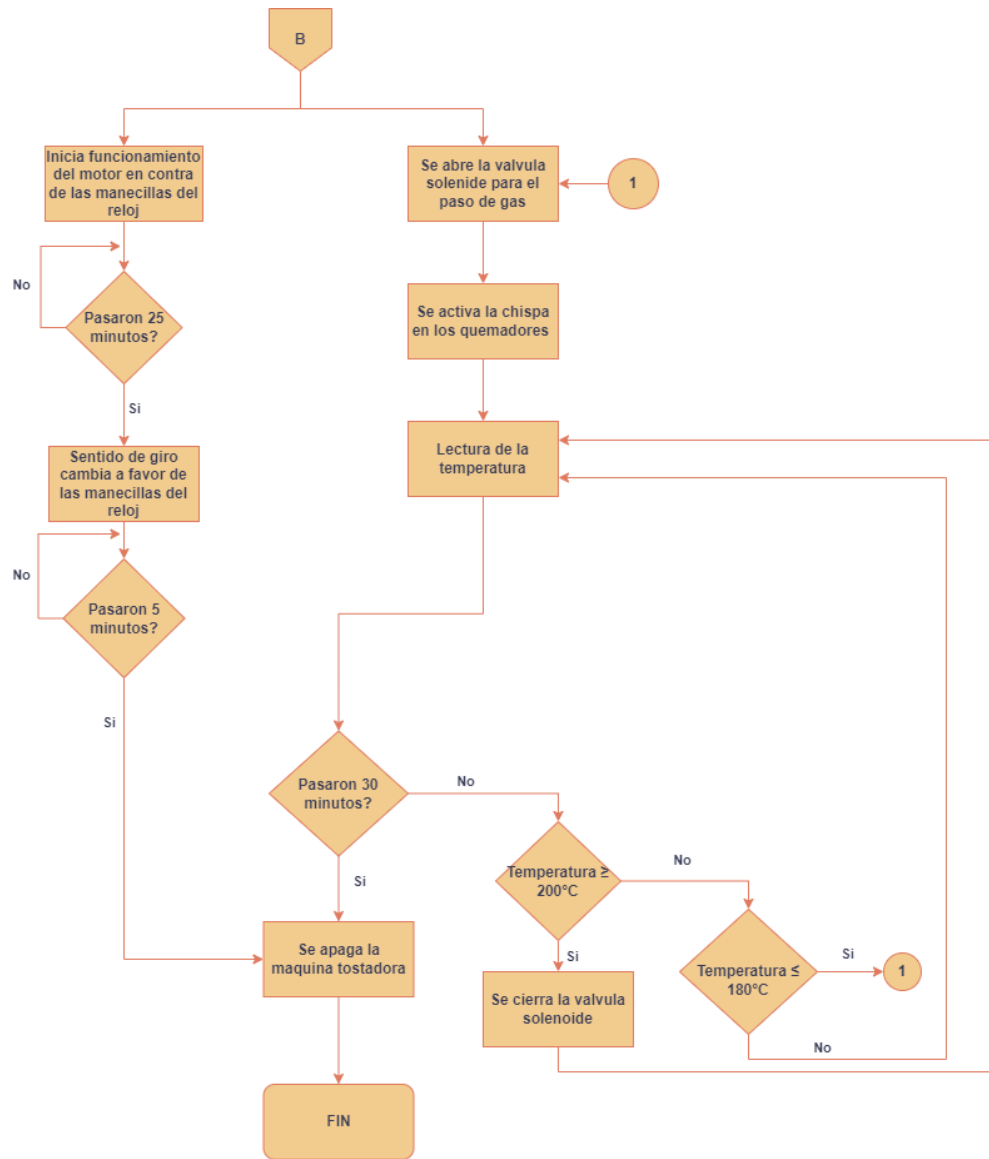
Fuente: Propia.

Figura 48. Diagrama de flujo modo manual de la máquina.



Fuente: Propia.

Figura 49. Diagrama de flujo modo automático de la máquina.



Fuente: Propia.

7.2. Selección de componentes principales del tablero de control.

Para la selección de los componentes es necesario conocer los parámetros de la tensión eléctrica a la cual estará operando la máquina.

- Tensión eléctrica: 110 V CA a 60 Hz

Para controlar todo el proceso de tostado y automatizar nuestra maquina tostadora de café es necesario implementar un controlador lógico programable (PLC) el cual ayudará a controlar el funcionamiento general de la máquina como también suplirá con los requerimientos de seguridad para el operario y facilidad para operar la maquina tostadora. También es necesaria la implementación de un controlador de temperatura y un sensor de temperatura los cuales estarán encargados de controlar la temperatura al interior de la cámara de tostado y así obtener un control total del proceso. Cada uno de estos elementos fue seleccionado según los requerimientos planteados en el capítulo 3, los cuales nos proporcionaras un buen tueste del café, este proceso de selección se puede observar en el Anexo K con sus respectivas hojas de datos.

7.3 Montaje tablero de control.

En el interior de una caja metálica de 40 x 30 x 20 y con ayuda de un experto electricista se instalaron los rieles din y las borneras, que servirán como apoyo para la instalación y conexión de los diferentes elementos que intervienen en el circuito eléctrico.

Ya con los soportes en su lugar se posicionaron tanto el PLC como los contactores y sus correspondientes protecciones eléctricas por si existe algún tipo de cambio de corriente o corto, con el fin de proteger la integridad de los componentes, evitando su daño, en la tapa de la caja metálica se realizaron perforaciones en el lugar donde se posicionan el controlador de temperatura, los pulsadores y la muletilla como se observa en la figura 50. Luego de posicionados los elementos se procedió a su conexión como se muestra en la figura 51.

Figura 50. Posicionamiento pulsadores y componentes del tablero de control.



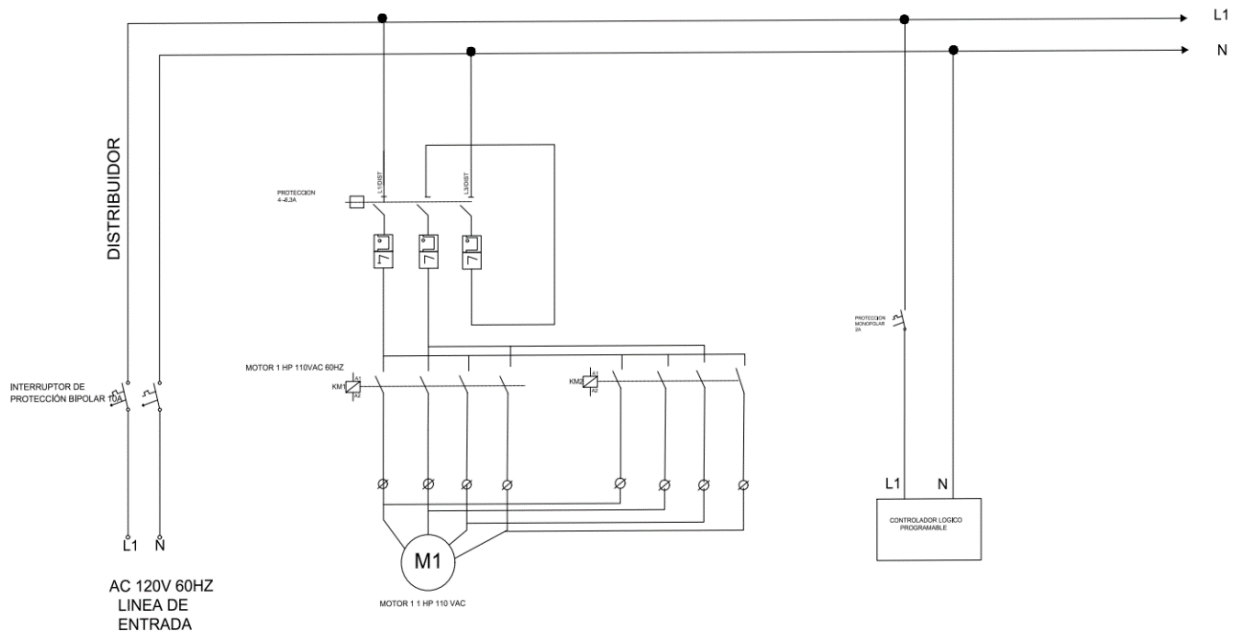
Fuente: Propia.

Figura 51. Conexiones eléctricas de la caja de control.



Fuente: Propia.

Figura 52. Esquema eléctrico del tablero de control



Fuente: Propia.

En el Anexo L se puede observar el esquema eléctrico en detalle y las conexiones realizadas en el PLC.

7.4 Programación LOGO 230RC.

La programación del Logo se realizó mediante el software Logo Soft Comfort, el cual es un programa especial para la programación PLC, donde es posible la escritura de lenguajes de programación de forma gráfica mediante diagramas de funciones o diagrama de contactos. En nuestro caso se usó en la programación el lenguaje de diagramas de contactos el cual se implementó para el sistema de control de temperatura como también para el accionamiento automático de la maquina mediante temporizadores aplicados en el PLC. La programación del logo se puede observar en el Anexo M, donde se observan la lógica cableada asociada a todos los componentes que actúan, con sus respectivos temporizadores.

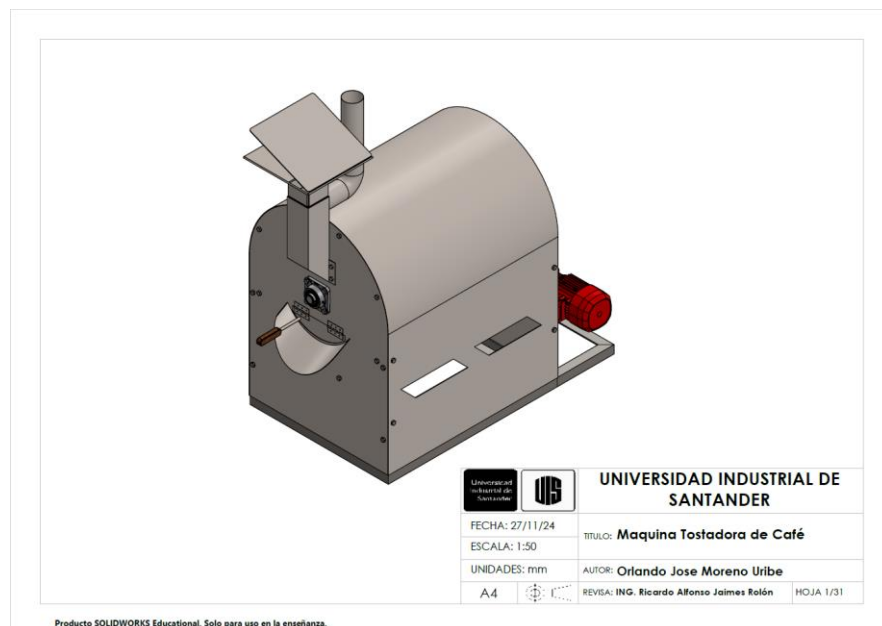
8. CONSTRUCCION Y PRUEBAS

8.1 Elaboración de planos.

Una vez terminado el proceso de diseño en detalle, se procedió a realizar los planos técnicos de la máquina tostadora de café, mostrando dimensiones calculadas de cada una de las piezas que constituyen el prototipo como también los equipos seleccionados de catálogos.

Los planos son parte fundamental ya que una vez obtenidos es posible llevar a cabo el proceso de construcción de piezas y ensamblaje final de la máquina. A continuación, se muestra una vista previa de los planos realizados.

Figura 53. Planos técnicos de la maquina tostadora de café.



Fuente: Propia.

Para observar los planos técnicos en su totalidad, dirigirse al Anexo M.

8.2 Construcción del prototipo.

La fabricación del prototipo de la maquina tostadora de café con capacidad máxima de 10 Kg se realizó en un taller, en la zona industrial de Bucaramanga con ayuda de un trabajador experto en ornamentación, el cual realizo los procesos de soldado y ensamblaje de la maquina en general.

En el caso que fue necesario de maquinado de piezas y rolado, se decidió realizar estos procesos en empresas especialistas en mecanizado cercanas al lugar de construcción de la máquina para facilidad de transporte. Todo el proceso de construcción se evidencia en el Anexo N.

Al culminar la construcción siguiendo las dimensiones plasmadas en los planos del proyecto se obtuvo el prototipo presente en la siguiente figura.

Figura 54. Prototipo maquina tostadora de café construido.



Fuente: Propia.

8.3 Pruebas del modelo.

Una vez construido el prototipo de la maquina tostadora de café diseñada en los capítulos anteriores, se somete a una serie de pruebas que nos indicaran el estado general de la máquina y si cumple con las expectativas.

Para ello se realizarán pruebas de funcionamiento sin producto, pruebas de funcionamiento con producto y se analizarán los granos de café tostados obtenidos.

A continuación, se observan los resultados obtenidos en las pruebas con producto y sin producto, en cada una de sus funciones (manual y automático)

8.3.1 Funcionamiento sin carga. El procedimiento realizado en cada prueba esta detallado en el Anexo M.

Tabla 18. Prueba de funcionamiento manual sin carga.

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO SIN CARGA	
Fecha de inspección: 10/12/2024	
Modo: Manual	
Tiempo de inspección: 25 min	
REFERENCIA	ESTADO
Motor	OK
Transmisión de potencia	OK
Funcionamiento eléctrico	OK
Quemadores	OK
Camara de tostado	OK

Tabla 17. Prueba de funcionamiento automático sin carga.

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO SIN CARGA	
Fecha de inspección: 10/12/2024	
Modo: Automático	
Tiempo de inspección: 25 min	
REFERENCIA	ESTADO
Motor	OK
Transmisión de potencia	OK
Funcionamiento eléctrico	OK
Quemadores	OK
Camara de tostado	OK

El prototipo sin producto en su interior funciona de forma óptima sin ningún contratiempo.

8.3.2. Funcionamiento con producto.

Para las pruebas de funcionamiento con producto se utilizaron tandas de aproximadamente 10 kg de café pergamino previamente pesadas, cada tanda de 10 kg equivale a dos baldes llenos de granos de café como se muestra en la figura.

Figura 55. Tanda de café pergamino para pruebas.



Fuente: Propia.

Tabla 19. Prueba de funcionamiento manual y automática con carga.

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CON CARGA	
Fecha de inspección: 10/12/2024	
Modo: Manual y Automático	
Tiempo de inspección: 25 min	
REFERENCIA	ESTADO
Motor	OK
Transmisión de potencia	OK
Funcionamiento eléctrico	OK
Quemadores	OK
Camara de tostado	OK

8.4. Resultados.

Una vez terminado el proceso de tostado de las tandas, se verifica que tan optimo fue el proceso mediante la coloración de los granos de café, para ello se extrajo una muestra de 5 Kg de café y se inspecciono en qué grado de la escala Agtron se clasifica el producto extraído. En la figura 55 se observa la muestra de café tostado obtenido en una de las tandas.

Figura 56. Muestra de café tostado.



Fuente: Propia.

Como se observa se tuvo un tostado que en la escala Agtron equivaldría a un tueste medio, es decir posee un aroma fuerte y gustos no tan amargos al momento de ser molido, lo cual lleva al sabor característico de una buena taza de café.

Por lo tanto, al analizar tanto las inspecciones de funcionamiento el productor obtenido podemos concluir que el prototipo es totalmente funcional, la parte automatizada no presentó ninguna falla de funcionamiento ni sobrecalentamiento, el sistema de quemadores con ayuda del sensor de temperatura pudo controlar la temperatura en el rango de 190°C a 200°C, el motor no presento ningún

contratiempo al momento de los cambios de giro y la cámara de tostado al momento de realizar el movimiento no genera ningún roce indicando que la tolerancia que se dejó entre la lámina frontal y la cámara de tostado fue la más óptima.

A continuación, se deja link de evidencia del funcionamiento de la maquina en formato video.

<https://www.youtube.com/watch?v=EdMFVkixsfg>

El manual de uso y mantenimiento de la presente maquina tostadora de café con capacidad máxima de 10 Kg, se podrá revisar en el Anexo Q.

9. ANALISIS DE COSTOS

En el mercado existen diferentes tipos de máquinas tostadoras de café, las cuales varían su precio dependiendo de la cantidad de café que se va a procesar. En el presente proyecto se diseñó y construyó una maquina tostadora con una capacidad de 10 kg, la cual será comparada en esta sección con modelos presentes en el mercado viendo así su factibilidad para el uso de pequeños caficultores.

9.1. Costos del Proyecto.

En primer lugar, para el análisis de costos, es necesario determinar el valor total de la máquina, teniendo en cuenta los costos de licencias de softwares, costos de materiales y manufactura.

En la tabla 23 se presentan los costos referentes a los materiales utilizados para la construcción de las piezas diseñadas y seleccionadas de catálogos de fabricantes.

Tabla 20. Costos de materiales de fabricación.

Materiales de fabricación			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Lámina de acero inoxidable A304 Calibre 14 1524 x 3048-2B	1	\$ 835.000	\$ 835.000
Lámina de acero inoxidable A304 Calibre 14 1219 x 2440-2B	1	\$ 620.000	\$ 620.000
Ángulo A36 3/16 x 1.1/2 x 6 m	2	\$ 89.500	\$ 179.000
Platina de acero inoxidable A304 1.1/2 x 3/16	1	\$ 24.000	\$ 24.000
Barra de acero inoxidable A304 1 7/16" x 1 m	1	\$ 85.000	\$ 85.000
Barra de acero inoxidable A304 3/8" x 2 m	1	\$ 35.000	\$ 35.000
Piñón 40B25 Intermec	1	\$ 55.000	\$ 55.000
Piñón 40B30 Intermec	1	\$ 70.000	\$ 70.000
Cadena ANSI 40 x 1.4 m	1	\$ 120.000	\$ 120.000

Unidad de rodamiento SKF	2	\$ 131.223	\$ 262.446
Tubo galvanizado 3/4" x 2 m	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Tubo galvanizado 1/4" x 1m	1	\$ 30.000	\$ 30.000
Aislante Lana de Vidrio 1.22m x 1 x 1 1/2"	2	\$ 27.200	\$ 54.400
Pintura en aerosol alta temperatura	1	\$ 20.168	\$ 20.168
Motor DIXUS monofásico de 1/2 HP	1	\$ 550.000	\$ 550.000
Reductor de velocidad DIXUS relación 30 1/2 HP	1	\$ 625.000	\$ 625.000
Tornillería variada		\$ 34.000	\$ 34.000
Pulsadores verde y rojo	3	\$ 145.200	\$ 435.600
Pulsador de seta de parada de emergencia	1	\$ 162.800	\$ 162.800
Controlador de temperatura PID TC4NS-24R	1	\$ 285.480	\$ 285.480
Sensor de temperatura tipo k	1	\$ 90.000	\$ 90.000
Logo! 230RCE	1	\$ 630.000	\$ 630.000
Cofre 40 x 30 x 20 para tablero eléctrico	1	\$ 350.000	\$ 350.000
Válvula solenoide E-MC 2V025-08	1	\$ 125.000	\$ 125.000
		Total	\$ 5.727.894

Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 24 se muestran los costos de manufactura e instalaciones eléctricas de la máquina.

Tabla 21. Costos de manufactura de la maquina tostadora.

Maquinado y otros servicios			
Descripción	Horas	Valor unitario	Valor total
Corte de lamina	6	\$ 13.000	\$ 78.000
Doblez	5	\$ 13.000	\$ 65.000
Torneado	2	\$ 35.000	\$ 70.000
Soldadura	9	\$ 30.000	\$ 270.000
Instalación eléctrica	15	\$ 44.000	\$ 650.000
		Total	\$ 1.133.000

Fuente: Propia.

Para el ensamblaje de la maquina se contrató un trabajador experto en ornamentación y un ingeniero experto en programación del logo, por lo tanto, en la tabla 25 se presentan los costos de las horas trabajadas.

Tabla 22. Costos correspondientes a trabajadores.

Ensamblaje de la maquina			
Descripción	Horas	Valor unitario	Valor total
Trabajador	15	\$ 32.000	\$ 480.000
Programación logo	10	\$ 50.000	\$ 500.000
		Total	\$ 980.000

Fuente: Propia.

En la tabla 26 se representan los costos correspondientes a licencias de softwares utilizados y gastos varios en la realización del proyecto.

Tabla 23. Costos de licencias y gastos varios.

Licencias y gasto varios				
Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Licencias Softwares				
Excel 2020	Año	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Word 2020	Año	1	\$ 120.000	\$ 120.000
SolidWorks 2021	Año	1	\$ 400.000	\$ 400.000
			Subtotal:	\$ 640.000
Recursos humanos				
Director de proyecto	Hora	20	\$ 55.000	\$ 1.100.000
Estudiantes	Hora	250	\$ 6.000	\$ 1.500.000
			Subtotal:	\$ 2.600.000
Total				\$ 3.240.000

Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta todos los costos presenten en el proyecto, en la siguiente tabla se evidencia el costo total de todo el proyecto.

Tabla 24. Costos totales del proyecto.

Costo Total de la maquina tostadora de café	
Descripción	Valor
Materiales de fabricación	\$ 5.727.894
Maquinado y otros servicios	\$ 1.133.000
Licencias de softwares y gastos varios	\$ 3.240.000
Ensamblaje de la maquina	\$ 980.000
Imprevistos del 10% del valor de los materiales	\$ 572.790
Total	\$ 11.653.684

Fuente: Propia.

El valor total de la maquina tostadora de café es de \$11.653.684 de pesos, los materiales y costos de manufactura fueron financiados en su totalidad por los autores y las licencias fueron proporcionadas por la universidad.

9.2. Comparación con máquinas tostadoras de café en el mercado.

Uno de los principales objetivos de este proyecto es construir una maquina tostadora de café asequible para los pequeños y medianos caficultores del departamento de Santander. Para ello cotizamos y comparamos precios de tostadoras de café presentes en el mercado para evaluar la factibilidad y que tanto ahorro se podría obtener con la construida en el presente proyecto. Este análisis se puede ver en el Anexo P.

CONCLUSIONES

- En el presente proyecto, se logró completar el diseño de una maquina tostadora de café, con una capacidad 10 Kg, la cual cumple con los requerimientos establecidos. El diseño posee todos los subsistemas planteados los cuales son: sistema de alimentación, sistema de transmisión de potencia, sistema de quemadores, compartimiento del proceso de tostado y caja de control. A su vez, se realizaron en cada uno de los componentes de la maquina simulaciones mediante el software SolidWorks, para validar su buen diseño o selección de componentes para evitar fallas en el funcionamiento.
- En las pruebas realizadas, en los 25 min que se realizó el proceso de tostado se obtuvo como producto final granos de café tostados homogéneamente y según la escala Agtron se consiguió un tueste medio, obteniendo aroma intenso y gusto no tan amargo.
- Al analizar los costos de la maquina tostadora de café fabricada, se concluye que son más bajos que los costos que conlleva la compra de una de estas máquinas presentes en el mercado. La tostadora construida tuvo un costo total de \$11.653.684 COP, revisando en el mercado se encontraron diferentes precios para la misma capacidad de tostado de 10 Kg, obteniendo precios que van desde los \$15.000.000 COP hasta los \$23.000.000 COP, siguiendo estos precios se puede observar que existe un ahorro significativo y cumpliendo así con el requerimiento de bajos costos de fabricación.
- La máquina tostadora de café cuenta con su respectivo manual de uso y mantenimiento, con la finalidad de mostrar su correcto ensamblaje, funcionamiento y cuidados necesarios para su correcta aplicación.

BIBLIOGRAFIA

ARCILA, Jaime; FARFÁN, Fernando; MORENO, Argemiro; SALAZAR, Luis Fernando y HINCAPIÉ, Edgar. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná. CENICAFÉ. 2007.

ARCINIEGA CUENCA, Juan José. Diseño, simulación y propuesta de automatización de una máquina de café con capacidad de 25 lb, para tostado, dirigida a la producción cafetalera. Tesis de grado de Ingeniero Electromecánico. Loja.: Universidad Nacional de Loja. 2016.

BERNABÉ DÁVILA, Luis y RIVERA CALONGOS, Carlos. Diseño de una maquina tostadora de café mediante flujo del aire caliente en lecho fluidizado para una capacidad de una tonelada. Tesis de grado de Ingeniero Mecánico Electricista. Pimentel. Perú.: Universidad Señor de Sipán. 2018.

BUDYNAS, Richard G y NISBETT J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shingley. 9 ed. McGrawHill. 2012.

COELLO OCHOA, Víctor Manuel. Diseño y construcción de una maquina tostadora de café con capacidad de 3 Kg utilizando una fuente energética de biomasa (pellets). Tesis de grado de Ingeniero Mecánico. Ecuador.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2023.

CUYA CURO, Enrique. Cosecha y postcosecha en el cultivo de café. Perú. 2013.

CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. Mc GrawHill. 2007.

FIGUEROA HERNANDEZ, Esther; PEREZ SOTO, Francisco y GODINEZ MONTOTA, Lucila. La producción y el consumo del café. ECOFRAN. 2015.

Giner, Josep. (2015). El tueste de café. Forumcafé.

HAMROCK, Bernard J; JACOBSON, Bo O y SCHMID, Steven R. Elementos de máquinas. Mc GrawHill. 2000.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA. Manual de Producción sostenible de café. República Dominicana. DEWEY. 2019.

MONTOYA RESTREPO, Esther C.; OLIVEROS TASCÓN, Carlos E.; ROA MEJÍA, Gonzalo. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Cenicafé. 1990. Pág. 30.

MONTILLA PEREZ, Jimena; ARCILA PULGARIN, Jaime; ARISTIZÁBAL LOAIZA, Manuel; MONTOYA RESTREPO, Esther; PUERTA QUINTERO, Gloria; OLIVEROS TASCÓN, Carlos y CADENA GÓMEZ, Gabriel. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. Chinchiná. CENICAFÉ. 2008.

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. Pearson educación. 2006.

MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. Manual básico de buenas prácticas para el tostado de café. Quito: Swisscontact / MIPRO, 2016.

MOTT, Robert L. Resistencia de materiales. 5 ed. Pearson PrenticeHall. 2009.

LOZADA TIPÁN, Luis Carlos y PICO MANTILLA, Flavio Javier. Diseño y construcción de una tostadora continua de cebada. Tesis de grado de Ingeniero Mecánico. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. 2009.

RODRIGUEZ LUCAS, Luis Fernando. Diseño de una maquina tostadora de ajonjolí de 40 Kg/h de capacidad. Tesis de grado de Ingeniero Mecánico. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. 2011.

Solá, Albert. (2005). Tostado y molido del café. Forumcafé.