



Universidad **Mariana**

Desarrollo de prototipo semiautomático para el tueste de café en el departamento de Nariño

Kevin Camilo Benavides Marcillo

Wilson Mateo López Mora

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa Ingeniería Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

Desarrollo de prototipo semiautomático para el tueste de café en el departamento de Nariño

Kevin Camilo Benavides Marcillo

Wilson Mateo López Mora

Informe de investigación para optar por el título de: Ingeniero Mecatrónico

Mag. Edison Viveros Villada

Asesor

Universidad Mariana

Facultad Ingeniería

Programa Ingeniería Mecatrónica

San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007 Universidad Mariana

Agradecimiento

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los docentes y personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

Agradezco a mi asesor de tesis Edison Viveros Villada, por la orientación, paciencia y dedicación durante este proceso de investigación. Sus valiosos aportes y enseñanzas me han permitido crecer como investigador y como profesional.

Agradezco también a la universidad mariana, quien me brindo una educación de calidad y me apporto el conocimiento. Sus enseñanzas y experiencias han sido fundamentales para la realización de este trabajo de grado.

Quiero agradecer a mis compañeros y compañeras de estudio, por su compañía, colaboración y apoyo durante todo el proceso. Sus críticas constructivas y consejos han sido fundamentales para la motivación de mejorar como persona y como un profesional.

Agradezco también a mi familia y amigos, por su amabilidad, cariño y apoyo incondicional.

Sus palabras de aliento me han dado fortaleza en todo momento.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Kevin Camilo Benavides Marcillo

Agradecimiento

En este momento de mi vida en el que culmino una etapa importante, no puedo dejar de expresar mi profunda gratitud a todas aquellas personas que me han apoyado en el camino.

En primer lugar, agradezco a mi director de tesis Edison Viveros Villada, por su orientación, su paciencia y sus valiosas sugerencias en la elaboración de este trabajo. Sus enseñanzas y su compromiso han sido fundamentales en mi formación académica y profesional.

También quiero agradecer a mis profesores y compañeros de carrera, por su guía, su motivación y su ejemplo en el camino hacia la excelencia académica.

A mis amigos y seres queridos, les agradezco su compañía, su cariño y su apoyo incondicional en los momentos difíciles. Su aliento ha sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi familia. A mi madre, mi padre, mis hermanos y abuelos, por su amor, su paciencia y su comprensión en los momentos en que he necesitado su apoyo. Gracias por ser mi ancla en los momentos difíciles, por celebrar conmigo mis triunfos y por acompañarme en cada paso de mi camino.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y sin la ayuda de cada una de estas personas no habría sido posible. Espero que este agradecimiento les haga sentir el profundo aprecio y gratitud que siento hacia cada uno de mis compañeros y familiares.

Wilson Mateo López Mora

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a aquellas personas y familiares que han sido mi fuente de inspiración y motivación. Primero que todo, a mis abuelos, quienes me han brindado su amor incondicional, su paciencia y el constante apoyo en todo momento, gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo y la dedicación.

Agradezco y dedico este trabajo también, a mis padres. Sus consejos, palabras de aliento y amor incondicional, ya que han sido la fuerza que me ha mantenido con moral y motivación en el transcurso de mi diario vivir.

Por último, deseo dedicar esta tesis a mis compañeros, quienes me han brindado su amistad, compañía y apoyo. Gracias por poner en práctica el trabajo en equipo, y por compartir momentos de felicidad en el proceso de estudio e investigación.

Kevin Camilo Benavides Marcillo

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo en primera instancia a Dios, ya que me dio salud y sabiduría para afrontar los problemas que se presentaron al llevar a cabo este proyecto, en segunda instancia le agradezco a mis padres por apoyarme siempre en este proyecto de vida el cual emprendí ya hace 6 años quiero agradecerles por apoyarme mental y económicamente ya que sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible.

Para terminar, agradezco a Evelyn Mora quien es mi pareja sentimental ya que ella siempre ha estado apoyándome y dándome mucha fortaleza para poder afrontar y sobrellevar todos los inconvenientes presentados en este proceso.

Wilson Mateo López Mora

Contenido

Introducción	16
1. Resumen del proyecto	18
1.1. Descripción del Problema	18
1.2 Justificación.....	20
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo general.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4 Marco Referencial O Fundamentos Teóricos.....	22
1.4.1. Marco de antecedentes	22
1.4.1.1. Criterios de búsqueda y bases de datos	22
1.4.1.2. Palabras claves.	22
1.4.1.3. Análisis de estudios	23
1.4.1.4 Descripción de artículos.....	24
1.4.1.5 Internacionales	26
1.4.1.6 Nacionales.	27
1.4.2 Marco teórico	29
1.4.2.1. Proceso de tuestión.....	31
1.4.2.2 Sistemas de tueste.....	32
1.4.2.2.1 Tostadoras por cargas.	32
1.4.2.2.2 Tostadoras para torrefacto	32
1.4.2.3 Fases de la tuestión.	33
1.4.2.4 variables importantes del proceso de tuestión.....	34
1.4.2.4.1 Conducción.....	35
1.4.2.4.2 Convección.	35
1.4.2.4.3 Por Radiación.	35
1.4.2.4.4 Deshidratación.....	35
1.4.2.4.6 Caramelización.....	36
1.4.2.4.7 Enfriamiento	36
1.4.3.1 Tipos de café que se pueden tostar y sus temperaturas	36

1.4.3.1.1	Café con sabores artificiales.....	36
1.4.3.1.2	Arábica.....	36
1.4.3.1.3	Robusta.....	37
1.4.3.1.4	Liberica.....	37
1.4.3.3	Transferencia de calor y masa.....	37
1.4.3.4	Torrefacción.....	38
1.4.3.5	Transformación del café.....	39
1.4.3.6	Maquinaria.....	41
1.4.3.6.1	Tipos de tostadoras.....	41
1.4.3.7	Variables básicas del tueste.....	47
1.4.4	Marco conceptual.....	48
1.4.5	Marco contextual.....	50
1.4.6	Marco legal.....	50
1.5	Metodología.....	51
1.5.1	Línea de investigación.....	51
1.5.2	Tipo de investigación.....	51
1.5.3	Hipótesis de la investigación.....	52
1.5.4	Descripción metodológica.....	52
1.5.5	Validez interna.....	55
1.5.6	Validez externa.....	55
2.	Presentación de resultados.....	56
2.1	Análisis del primer objetivo.....	56
2.1.1	El tueste del café.....	56
2.1.2	¿Porque se tuesta el café?.....	56
2.1.2.1	Tabla comparativa tipos de tostadoras.....	57
2.1.3	Control del proceso.....	59
2.1.4	Niveles de tueste.....	60
2.1.5	Curvas de tueste.....	63
2.1.5.1	Curvas de sabor.....	65
2.1.5	Tiempo de tueste.....	66
2.1.6	Tueste torrefacto.....	67

2.1.7 Diagrama de flujo de producción.....	68
2.1.8 Cuadro descriptivo de los componentes existentes	69
2.2 Análisis del Segundo Objetivo	71
2.2.1 Diseño mecánico	71
2.2.2 Diseño electrónico	92
2.3. Análisis del Tercer Objetivo	102
2.3.1 Pruebas de Tostión.....	102
2.3.1.1 Primera prueba	103
2.3.1.1.1 Ajuste de la capacidad de carga	103
2.3.1.2 Segunda prueba	104
2.3.1.3 Tercera prueba.....	105
2.3.2 Comparación de métodos: Sensorial vs. Colorimétrico.....	106
2.3.2.1 Análisis detallado del método sensorial visual	106
2.3.2.1.1. Selección y tostado.....	106
2.3.2.1.2. Molienda.....	106
2.3.2.1.3. Olor seco	107
2.3.2.1.4. Infusión.....	107
2.3.2.1.5. Romper la costra y oler.	107
2.3.2.1.6. Cata.....	107
2.3.3 Uso del Colorímetro para Verificación	107
3 Conclusiones	108
4 Recomendaciones.....	110
Referencias bibliográficas	111
Anexos.....	116

Índice de Tablas

Tabla 1 Proceso de tuestión del café	34
Tabla 2 Bandas industriales	46
Tabla 3 Tipos de rodamientos	47
Tabla 4 Tipos de tostadoras	57
Tabla 5 Cuadro descriptivo de los componentes existentes	69
Tabla 6 Especificaciones actuales de máquinas de producción	71
Tabla 7 Producción esperada del prototipo	72
Tabla 8 Comparación de métodos	106

Índice de Figuras

Figura 1 Filtros de búsqueda	22
Figura 2 Vigencia del tema	23
Figura 3 Taxonomía	30
Figura 4 Diagrama de flujo del proceso	31
Figura 5 Diagrama de bloques proceso	32
Figura 6 Proceso de tuestión de café.....	40
Figura 7 Tostadora por convección.....	42
Figura 8 Tostadora a gas	42
Figura 9 Tostadora eléctrica	43
Figura 10 Despiece tostador eléctrica	43
Figura 11 Tostadora de microondas	44
Figura 12 Tornillo sin fin	45
Figura 13 Diagrama de arquitectura funcional.....	60
Figura 14 Niveles de tueste	62
Figura 15 Curvas de tueste	64
Figura 16 Curva base 1	64
Figura 17 Curva base 2.....	65
Figura 18 Curvas de sabor.....	66
Figura 19 Flujo grama producción.....	68
Figura 20 Ecuación 1 promedio de densidades.....	72
Figura 21 Ecuación 2 cálculo masa del café	73
Figura 22 Ecuación 3 volúmenes del café.....	73
Figura 23 Ecuación 4 volúmenes del tambor	74
Figura 24 Ecuación 5 medidas del tambor	74
Figura 25 Ecuación 6 peso del tambor	75
Figura 26 Ecuación 7 cálculo de torque	75
Figura 27 Ecuación 8 potencia del motor.....	76
Figura 28 Ecuación 9 resistencia eléctrica	76
Figura 29 Ecuación 10 flujo másico.....	77

Figura 30 Ecuación 11 potencia necesaria de la resistencia.....	77
Figura 31 Materiales tolva.....	78
Figura 32 Comparación de aspectos materiales tolvas.....	79
Figura 33 Precios de materiales tolvas	80
Figura 34 Selección material.....	81
Figura 35 Materiales estructura	81
Figura 36 Comparación de materiales de la estructura	82
Figura 37 Precios de materiales estructura.....	83
Figura 38 Selección de material	83
Figura 39 Materiales Tornillo sin fin y eje.....	84
Figura 40 Comparación de aspectos materiales eje y tornillo	85
Figura 41 Precios de materiales eje y tornillo	86
Figura 42 Selección de material tornillo sin fin	86
Figura 43 Límite elástico y fijación de la estructura	87
Figura 44 Simulación	88
Figura 45 Límite elástico tolva.....	89
Figura 46 Simulación tolva	89
Figura 47 Limite elástico tambor	90
Figura 48 Simulación tambor	91
Figura 49 Modelado tostador	91
Figura 50 Estructura de funcionamiento.	93
Figura 51 Diagrama de flujo programación	94
Figura 52 TFT LCD 2.8”.....	95
Figura 53 Datasheet L293D	96
Figura 54 Simulación proteus	97
Figura 55 Diagrama esquemático.....	98
Figura 56 Diagrama circuito	99
Figura 57 Impreso circuito	100
Figura 58 Montaje circuito	100
Figura 59 Engranajes.....	101
Figura 60 Acabado del prototipo.....	102

Figura 61 Pruebas Colorimétricas 1	103
Figura 62 Pruebas Colorimétricas 2	104
Figura 63 Pruebas Colorimétricas 3	105

Índice de Anexos

Anexo A Plano estructura	117
Anexo B Plano cubierta tambor	118
Anexo C Plano tambor rotatorio	119
Anexo D Plano bandeja de enfriado	120
Anexo E Paletas tambor	121
Anexo F Motorreductor 9v.....	122
Anexo G Plano cubierta	123
Anexo H Modelado tambor rotatorio	124
Anexo I Modelado bandeja	125
Anexo J Modelado interno	126
Anexo K Modelado tostador	127
Anexo L Vista lateral derecha	128
Anexo M Piñones de engranaje.....	129
Anexo N Piñón de tambor	130
Anexo O Soporte tambor.....	131
Anexo P Cultivo de café.....	132
Anexo Q Proceso de secado artesanal tipo invernadero	133
Anexo R Construcción	134
Anexo S Soldadura eléctrica de piezas	135
Anexo T Soldado de tambor.....	136
Anexo U Perforaciones cilindro y bandeja de secado	137
Anexo V Programación Arduino.....	138

Introducción

La torrefacción de café, implica el tostado de los granos con el fin de desarrollar los sabores y aromas característicos. La automatización en este proceso puede tener beneficios significativos en términos de eficiencia y calidad del producto final. Además, se busca reducir el impacto ambiental. Durante la torrefacción, se eliminan la mayor parte de la humedad en los granos de café, lo cual da lugar a una serie de reacciones químicas conocidas como pirolisis. Estas reacciones provocan cambios en la composición química del café y el desarrollo de compuestos relacionados con los sabores y aromas del café preparado (López et al., 2020).

Los prototipos automatizados para la torrefacción de granos tienen como objetivo controlar la temperatura y la humedad durante el proceso. Estos prototipos utilizan tecnología innovadora y pueden adaptarse a las necesidades específicas de las pequeñas y medianas empresas tostadoras, mejorando así el proceso empírico de tostado. La semiautomatización en este proceso, puede mejorar la eficiencia y la calidad del producto final, al tiempo que se busca una mayor sostenibilidad y reducir el impacto ambiental (Campos et al., 2019).

De acuerdo con (Ramírez, 2018), la búsqueda de implementar energías mixtas se refiere a la combinación de diferentes fuentes de energía, como la electricidad, la solar, la eólica, la biomasa, entre otras. Al utilizar una combinación de estas fuentes de energía, se puede lograr una mayor eficiencia energética y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables. En el caso del tueste de granos, se requiere calor para llevar a cabo el proceso de torrefacción. La utilización de energías mixtas puede permitir la integración de fuentes de energía renovable en este proceso, lo que podría conducir a una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y ayudar a mitigar el impacto ambiental. Por ejemplo, se podría combinar el uso de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables con la generación de energía térmica a partir de biomasa o paneles solares.

Es importante tener en cuenta que la implementación de sistemas de energías mixtas para el tueste de granos requiere un diseño adecuado y una infraestructura apropiada para la integración de diversas fuentes de energía. Además, se deben considerar factores como la disponibilidad y los

costos de las distintas fuentes de energía, así como la capacidad de adaptación de las empresas tostadoras a estas tecnologías.

Para este proyecto se tomaron muy en cuenta ciertos datos reales extraídos de páginas reconocidas las cuales nos brindan mucha información al respecto de este proceso de torrefacción, teniendo en cuenta dichos datos se analizará la factibilidad de este proyecto respecto a las necesidades y si su versatilidad es beneficiosa para implementarlo en los ámbitos planteados, para que todo este proceso de torrefacción sea muy independiente.

Para esta actividad de torrefacción se tomarán muy en cuenta diversas variables como son humedad del grano, nivel de fermentación, tiempo de tuestión, grado de tuestión y tipo de producto entre otras, dichas variables son muy importantes a la hora de realizar este proceso ya que depende mucho del estado de estas variables para realizar un excelente proceso.

1. Resumen del proyecto

En esta investigación se propone diseñar y construir una máquina tostadora de café eficiente y versátil para uso comercial. La máquina estará diseñada para tostar café de alta calidad según el porcentaje de humedad establecido del producto, manteniendo el control preciso de la temperatura y el tiempo de tostado para garantizar resultados consistentes y óptimos. El diseño de la máquina se centrará en la facilidad de uso, la durabilidad y la seguridad.

La máquina estará equipada con un sistema de control preciso que permitirá ajustar la temperatura y el tiempo de tostado, adaptándose a diferentes tipos de café y preferencias de tueste. Además, tendrá la versatilidad necesaria para tostar una variedad de granos de café, desde los más suaves hasta los más intensos, y ofrecerá opciones para tuestes claros, medios y oscuros, según las indicaciones. Se implementarán medidas de seguridad confiables para proteger a los operadores y componentes, previniendo accidentes durante el proceso de tostado. El diseño estructural de la máquina facilitará su limpieza y mantenimiento, garantizando un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo. Asimismo, se proporcionará un soporte técnico completo del prototipo, incluyendo servicios de reparación y mantenimiento, para asegurar su funcionamiento continuo y confiable durante toda su vida útil.

En resumen, el prototipo de la máquina tostadora de café propuesta, será una solución integral para pequeños productores de café que buscan el desarrollo de la calidad y consistencia de sus productos tostados, al igual que optimizarán sus operaciones y reducirán los costos agregados.

1.1. Descripción del Problema

Debido a la progresiva demanda alimentaria a nivel mundial, y a la creciente necesidad de innovar y mejorar la calidad de los alimentos por las tasas nutricionales presentadas a nivel mundial se ha vuelto indispensable el mejoramiento de la tecnología en la transformación de materia prima, mejorando la calidad del producto con el mínimo impacto ambiental. El café se encuentra entre las cinco bebidas más populares a nivel mundial, ocupando el segundo lugar después del agua. Según datos actualizados hasta 2020, el consumo promedio de café per cápita a

nivel global es de aproximadamente 75 tazas al año. Sin embargo, es importante destacar que en Perú el consumo per cápita es más elevado, alcanzando las 131 tazas anuales. En contraste, en mercados más consolidados y con una larga tradición en el consumo de café, como América del Norte y Europa Occidental, se registran consumos per cápita de 577 y 843 tazas respectivamente (Heredia, 2020).

De acuerdo con (Gordon, 2019), en términos de sostenibilidad ambiental, al utilizar energías alternativas, se reduce el impacto ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual ha sido un tema de interés a nivel mundial, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Además, mejorar la tecnología del tueste con energías mixtas aumenta la eficiencia energética al utilizar la fuente más adecuada según la demanda en cada etapa del proceso, lo que conlleva a una utilización más eficiente de los recursos y a una reducción en los costos de energía.

Este proyecto se va a realizar enfocado a comunidades productoras que carecen de maquinaria, para que les facilite realizar el proceso de tostión ya que la producción del café en el departamento de Nariño ha ido en crecimiento en los últimos años, los cultivadores de café solo tienen la opción de cultivar el grano y venderlo, sin posibilidad de llevar a cabo el procesamiento de este producto para aprovechar al máximo su producción, sin que otras empresas a dicho departamento saquen los derivados del grano.

Sabiendo que la producción de café va en crecimiento se ha planteado el desarrollo de este prototipo para dar solución a los problemas mencionados anteriormente, y así permitir que distintos productores implementen más procesos a su materia prima y puedan aprovechar de mejor manera su producción.

1.1.1. Formulación del problema.

¿Cómo desarrollar un prototipo semiautomático para la torrefacción de café, enfocado a los productores agrícolas en el departamento de Nariño?

1.2 Justificación

A pesar de que algunos productores tuestan su propio café artesanalmente, la mayoría de estos, especialmente los productores locales y pequeños productores, no tienen la capacidad económica ni la experiencia para llevar a cabo este proceso. Es por esto que estos caficultores se ven obligados a vender su café verde a empresas tostadoras, perdiendo la posibilidad de ofrecer un producto que sea 100 % elaborado de manera local. El tueste en el origen no solo mejoraría la producción de café de las fincas, sino que también ayudaría a preservar la historia y la experiencia del origen (Castellano, 2020).

Además, las ganancias de los caficultores se verían aumentadas, dado que las empresas tostadoras de café son las que al final le dan el valor agregado a la producción al ser ellas las responsables de darle el aroma al mismo. Por lo tanto, estas empresas se están llevando un gran porcentaje de la ganancia y los caficultores se quedan con una pequeña parte, la cual en muchas ocasiones no es suficiente para sostener sus fincas, haciendo que su negocio deje de ser rentable.

Las ventas anuales del café en el mundo representan alrededor de 200.000 millones de dólares, de los cuales solo entre el 6 al 10 % es lo que reciben los caficultores. Para el 2019, la libra de café suave, el más producido por Colombia, se cotizaba en la bolsa de valores de Nueva York en \$1.02 USD y sus costos de producción se situaban en \$1.10 USD, lo que quiere decir que el productor está asumiendo una pérdida de \$0.08 USD por libra, esto sin contar el valor de la mano de obra familiar. Si se tuviera en cuenta, producir una libra de café costaría aproximadamente \$1.7 USD, lo que asciende la pérdida a \$0.68 USD por libra (Posada, 2019).

La cadena de valor del café verde dentro del país productor se puede describir como la siguiente: Productores, compradores locales, transportistas, tostadores, exportadores, distribuidores, consumidores. De aquí, la ganancia por cada sector por libra de café son las siguientes: \$0.92, \$0.13, \$1.5, \$1.2, \$3.8, \$7.45 USD respectivamente. Si se considera un caso como Nestlé, multinacional que compra el café verde directamente a los productores, lo exporta, lo tuesta, lo empaca y lo distribuye, la empresa se está quedando con aproximadamente el 93.8 %

del precio al consumidor final, por lo tanto, el productor recibe solo el 6 % del precio final del producto (Posada, 2019).

Al desarrollar una tostadora de fácil adquisición, mantenimiento y transporte, se permite que los pequeños caficultores puedan acceder a este servicio, para la producción de un café 100 % de sus fincas, utilizando una parte de su cosecha, sin la necesidad de vender sus cultivos a compradores locales de café verde. Además, esto no solo mejoraría sus ingresos, sino que también tendrían la posibilidad de hacer un seguimiento completo de su producción y así mejorar la calidad del grano a consumir. Este trabajo también contribuye a tecnificar el sector agro, con soluciones mecánicas a procesos como el propósito de este trabajo. Por último, se deja claro que el proceso de secado del café es preliminar, pues este trabajo está enfocado en el desarrollo del sistema de tueste.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo semiautomático, para la torrefacción de café en el departamento de Nariño.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Identificar los términos de tueste del café para definir los parámetros de diseño del prototipo orientado a la generación de producto de buena calidad y de forma semiautomática.
- Diseño y construcción de prototipo mecánico para la tueste de café que permita una óptima calidad de producto final, según los términos de tueste dados por la industria para la variedad de café castillo.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo mecánico, mediante un colorímetro para verificar los niveles de tueste del café.

1.4 Marco Referencial O Fundamentos Teóricos

1.4.1. Marco de antecedentes

1.4.1.1. Criterios de búsqueda y bases de datos. Se realizaron a partir de las palabras claves del trabajo de investigación. Posteriormente se procede a realizar la búsqueda avanzada únicamente en la base de datos Scopus, filtrando solamente los artículos más citados en los últimos cinco años.

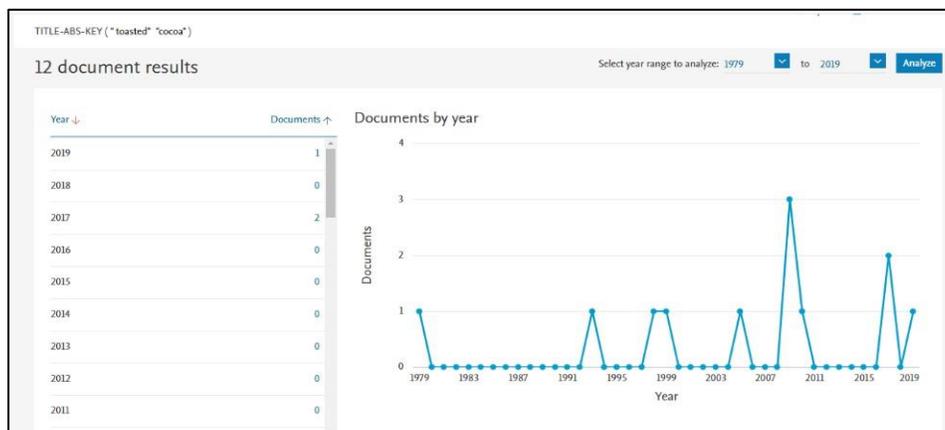
1.4.1.2. Palabras claves. Se emplean diversos criterios de búsqueda con el objetivo de encontrar artículos altamente relevantes para el proyecto de investigación. Para ello, se utilizan palabras clave específicas como " Coffee ", "Toaster", "automation", "roasting", "efficiency", "prototype", y "temperature control". Esta selección de palabras clave permite realizar un filtrado preciso, obteniendo así resultados que estén relacionados con el tema de estudio

Figura 1

Filtros de búsqueda



Nota: Figura extraída de Scopus

Figura 2*Vigencia del tema*

Nota: Figura extraída de Scopus

1.4.1.3. Análisis de estudios. En los últimos años se han generado diferentes estudios con el proceso del tostado de café, algunos de los aspectos clave que se abordan en los estudios sobre el proceso son: Reacciones Químicas: Se analizan las reacciones químicas que tienen lugar durante el proceso de tostado del café, como la caramelización de los azúcares, el pirólisis de los compuestos orgánicos y la Maillard, que es la reacción entre los aminoácidos y los azúcares. Perfil de Tueste: Se investiga cómo el perfil de tueste, es decir, la combinación de temperatura y tiempo de tostado, afecta al sabor, aroma y otros atributos sensoriales del café. Se utilizan métodos analíticos como la espectroscopia y el análisis sensorial para evaluar los perfiles de tueste.

Efecto del Equipo de Tueste: Se estudia cómo diferentes tipos de equipos de tostado, como tostadoras de tambor o tostadoras de flujo de aire caliente, afectan al proceso de tostado y a la calidad del café resultante.

Influencia de los Parámetros de Tueste: Se analiza cómo factores como la temperatura de tostado, el tiempo de tostado, el flujo de aire y la humedad relativa afectan al proceso de tostado y a las características del café.

Evaluación de la Calidad del Café Tostado: Se realizan análisis sensoriales y fisicoquímicos para evaluar la calidad del café tostado, incluyendo atributos como el aroma, el sabor, el cuerpo y la acidez.

Optimización del Proceso de Tostado: Se investigan métodos para optimizar el proceso de tostado del café, con el objetivo de maximizar la calidad y consistencia del café tostado, al tiempo que se minimizan los costos y el impacto ambiental.

1.4.1.4 Descripción de artículos. Artículos más citados entre 2016 y 2021

Entre los artículos más citados se encontró este realizado por (Medina y Arias, 2020), quienes realizaron el Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila. en la facultad de ingeniería mecánica electrónica y biomédica de la universidad Antonio Nariño en la ciudad de Neiva Huila en Colombia, este proyecto quiere dar solución a la problemática que se evidencia en cuanto a la situación económica de los agricultores de esta zona que en su mayoría no cuentan con una posición económica muy favorable entonces lo que se plantea es diseñar un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor de tuestión con materiales mucho más económicos y asequibles a los agricultores, esto se plantea con controladores PID los cuales son encargados de controlar las temperaturas y velocidades requeridas, en primera instancia se harán simulaciones para comprobar si todo lo establecido y diseñado funcionara correctamente, para hacer el control de la temperatura se implementara un sensor de tipo PT100 al cual se le realizan estudios y cálculos para obtener una lectura buena de las temperaturas, se usa el método de conversión de voltaje a temperatura mediante aproximación polinómica de la respuesta no lineal, dada por la siguiente ecuación: $RTD(T) = RTD_0(1 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3(T - 100))$ Donde se denota RTD (T) como elemento resistivo a T (Ω),

RTD0 como elemento resistivo a temperatura referencia (Ω), T Elemento de temperatura en ($^{\circ}\text{C}$), a_1 , a_2 , a_3 , han como coeficiente de temperatura de la resistencia.

Este artículo llamado Automatic coffee roaster design using Arduino realizado mediante la utilización de Arduino es muy interesante ya que muestra los distintos procesos de tuestión del café el cual quiere dar solución a la problemática de que algunos clientes no saben cómo realizar la tuestión de este grano, se da solución a esto creando un dispositivo con un programa que el cual contiene todos los términos de tuestión de este grano, haciendo así mucho más sencillo el proceso de tuestión, es muy novedoso ya que implementa una aplicación de teléfono Android en la cual se muestran los distintos procesos que se pueden llevar a cabo y así terminar con un producto de muy buena calidad y muy fácil de realizar. Dicha maquina obtuvo excelentes resultados en la tuestión del café ya que dependiendo del tiempo que el usuario desee tostar el café entrega un producto de muy buena calidad y acorde con los requerimientos.

En este artículo realizado por (Díaz, Ormazá y Rojano, 2018) llamado: Efecto de la Tuestión del Café (*Coffea arabica* L. Var. Castillo) sobre el Perfil de Taza, Contenido de Compuestos Antioxidantes y la Actividad Antioxidante, se basa en el análisis de los antioxidantes retenidos en el proceso de tuestión del café, este proceso se realiza mediante el funcionamiento a distintos tiempos y temperaturas de un mismo tostador para así poder tener datos más precisos a la hora de determinar la cantidad de químicos retenidos. Los métodos y materiales se presentan en once subsecciones donde se describe el proceso de tuestión realizado al café, en este artículo se determinó que con más tiempo de tuestión la concentración de flavonoides se ve en disminución y con tiempos menores se da una concentración más alta de estos, Con relación a la retención de taninos en las muestras de café tostadas a diferentes tiempos, se encontró que este compuesto no se degradó térmicamente a tiempos mayores de tuestión, por el contrario, se incrementó su concentración conforme aumentó la duración del tostado con una concentración máxima de 495 mg expresados como mg de catequina eq. / 100g de muestra. 8 este proyecto realizado por: (Hurtado, Ortiz, 2020) Facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas, carrera de Ingeniería Electromecánica Universidad técnica Cotopaxi. Llamado “Diseño e implementación de una tostadora automática para el mejoramiento de la producción de cereales tostados en la microempresa molinos san Luis” este proyecto está pensado para el mejoramiento y la automatización de la microempresa molinos san Luis, este sistema busca dar solución a la problemática que se presenta a la hora de producir derivados de los cereales como son las harinas las cuales no presentan una homogeneidad adecuada para realizar otros procesos, se realiza

también para disminuir el error humano el cual es muy frecuente y así disminuyendo la mano de obra humana, se muestran partes importantes como son: cámara de tostado, sistema motriz, cámara de calentamiento y sistema de control, dicha máquina consta de unas aspas giratorias de madera para así evitar el desgaste del acero AISI 304 tiene una capacidad máxima de 23 kg para así obtener una mejor homogeneidad en el tueste, dicha maquina está diseñada para cumplir con los requerimientos y necesidades del cliente cumpliendo con los parámetros de tiempo y temperatura a la hora de realizar el tueste de cereales, esta máquina tiene un impacto tecnológico muy bueno ya que se caracteriza por tener un sistema de control automático el cual se encarga de regular y controlar todos los procesos, tiene un impacto ambiental muy positivo ya que reduce el uso de leña la cual genera demasiado humo a la hora de tostar el cereal, esto se logra usando energía eléctrica y un suplemento de gas GLP.

1.4.1.5 Internacionales. Diseño de Planta Tostadora de Café, (Reyes, 2003). Universidad de San Carlos de Guatemala, A partir de este documento se pueden observar aspectos del mercado como la oferta y la demanda. En el mercado internacional, los granos de café se clasifican generalmente como cacao en dos categorías: en primer lugar, los granos utilizados en la producción de chocolate convencional y otros derivados como el cacao en polvo, el alcohol y la manteca; el segundo es el grano que otorga ciertas características específicas (aroma o sabor) al chocolate fino, clasificándose el primero como normal y el segundo como bueno.

La oferta mundial de producción de cacao en grano ha aumentado significativamente en las últimas dos décadas, pasando de 1,67 millones de toneladas en 1980 a 2,81 millones de toneladas en 2002. Cabe señalar que de 1995 a 2001, la producción alcanzó una producción sin precedentes, alcanzando más de 3 millones de toneladas por año, alcanzando un máximo en 2000 de 3,8 millones de toneladas.

(Abarca, 20017). “Estudio sobre el proceso de tostado de café (coffea arabica) en tostadores convencionales” Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San José, Costa Rica 2017. Este documento es importante por las técnicas de otros sistemas se aplican todas Rotación cilíndrica ya que es el método de tueste más utilizado; sin embargo, existen otras técnicas de diseño que permiten utilizar otros equipos para tostar café.

1.4.1.6 Nacionales. (Álvarez, 2014). Proponiendo automatizar el proceso de tostado de café en lecho fluidizado. Restrepo. Universidad Tecnológica de Pereira. De este documento, es importante destacar el diseño de 2 patentes, que nos introducen paso a paso en ideas de diseño de la máquina: Patente WO 8 01271: “Equipo compuesto por de una cámara de tostado con una base cilíndrica y componentes de pared fijados entre sí. Dispuesta coaxialmente en la cámara hay una extensión hacia abajo con un orificio espaciado en la superficie de la base y una salida en la parte superior de la cámara. Corriente se hace fluir hacia abajo a través del tubo central a alta velocidad de Impacto sur le Surface de la base y lo desvía radialmente hacia afuera luego fluye hacia arriba a través de la salida de Escape en la parte premium camera. Esta columna de aire calentado crea un patrón de circulación toroidal de los granos de café de lecho fluidizado con un tostado rápido y uniforme de los granos.

(Rincón, Cano, 2010). Desarrollo de un prototipo de laboratorio para control de calidad de tostado variable de granos de café tostado, utilizando visión artificial» Universidad Javeriana Bogotá D.C. Recursos Estos datos nos dan ideas que podrían ser implementadas en nuestro proyecto el cual es la visión artificial, es una rama de la inteligencia artificial que tiene como objetivo modelar la imagen digital obtenida por un sensor, tiene la capacidad de “ver” el lugar de trabajo y la computadora (computadora) para interpretarla, para que de esta manera puede ser utilizado para la toma de decisiones. Es importante señalar que los sensores operan en el rango de sensibilidad a la luz visible, infrarrojos y rayos X.

1.4.1.7 Regionales. “Características del café tostado, a partir del ecotopo ecológico E-220^a, Producido en las ciudades de Buesaco y La Unión - Dpto. de Nariño, del ecotopo E - 220 A Tueste, en la tostadora de tambor horizontal TC - 150 RG con una capacidad máxima de 150 gr”. El calentamiento se realiza por resistencia, lo que asegura un asado limpio y sin humo. Cada tueste se hizo por triplicado, utilizando 100 gramos de una mezcla de café especial 50° y café especial más de 50°. Cada muestra se envasa y etiqueta antes y después de cada tueste. Diseño estadístico. Se siguió un diseño completamente al azar representando cada finca un tratamiento determinado por región, altura y variedad

(Bastidas, Ibarra, 2018). Estudio de factibilidad para establecer una planta de café (Samaniego Nariño). De este documento nos basamos el diseño y entrega de la instalación, conociendo factores como: tipo de máquina, tiempo de producción, tiempo de funcionamiento, cantidad de materia prima, etc.

(Arellano, Narváez, s, f) Innovación social desde la creación de valor en café de alta calidad en la región de Nariño. En este folleto se pueden ver algunos de los principios mecánicos y esquemas de clasificación involucrados en el tueste del café ya que tiene un elemento principal llamado azúcar. Estas curvas son cambios esenciales en la temperatura del proceso de tostado del café, ya que permiten mejorar la calidad final del café tostado. Las curvas de tueste se elaboran antes del inicio del proceso y dependen de la calidad y tipo de tueste del café, el grado a alcanzar y el sabor final obtenido.

La investigación sobre el tostado del café ha llevado a varios hallazgos importantes. El análisis del perfil químico y antioxidante del café tostado muestra que los diferentes tiempos y temperaturas de tostado afectan significativamente la retención de antioxidantes y otros compuestos beneficiosos. Por ejemplo, tiempos de tueste más prolongados dan como resultado concentraciones más bajas de flavonoides, mientras que el contenido de taninos puede aumentar con tiempos de tueste más prolongados. Las innovaciones en el diseño del tostador, como el uso de controles PID y sistemas automáticos, permiten un control preciso de la temperatura y la velocidad del tambor, optimizando la calidad y consistencia del tueste. Estos sistemas utilizan sensores avanzados para monitorear y ajustar las condiciones en tiempo real, aumentando la eficiencia y reduciendo el error humano. Además, el desarrollo de dispositivos con interfaces amigables y aplicaciones móviles facilita el proceso de tueste a los usuarios, garantizando resultados de calidad. Estos avances están diseñados para ofrecer soluciones asequibles y efectivas a los pequeños productores y consumidores de café, mejorando sus productos finales y haciéndolos más competitivos en el mercado.

1.4.2 Marco teórico

Este es un proyecto en el cual se hará la toma de datos como son; tiempo de tuestión, temperatura, y diferentes aspectos a tener en cuenta para llevar a cabo una excelente torrefacción del producto y así aprovechar al máximo sus propiedades.

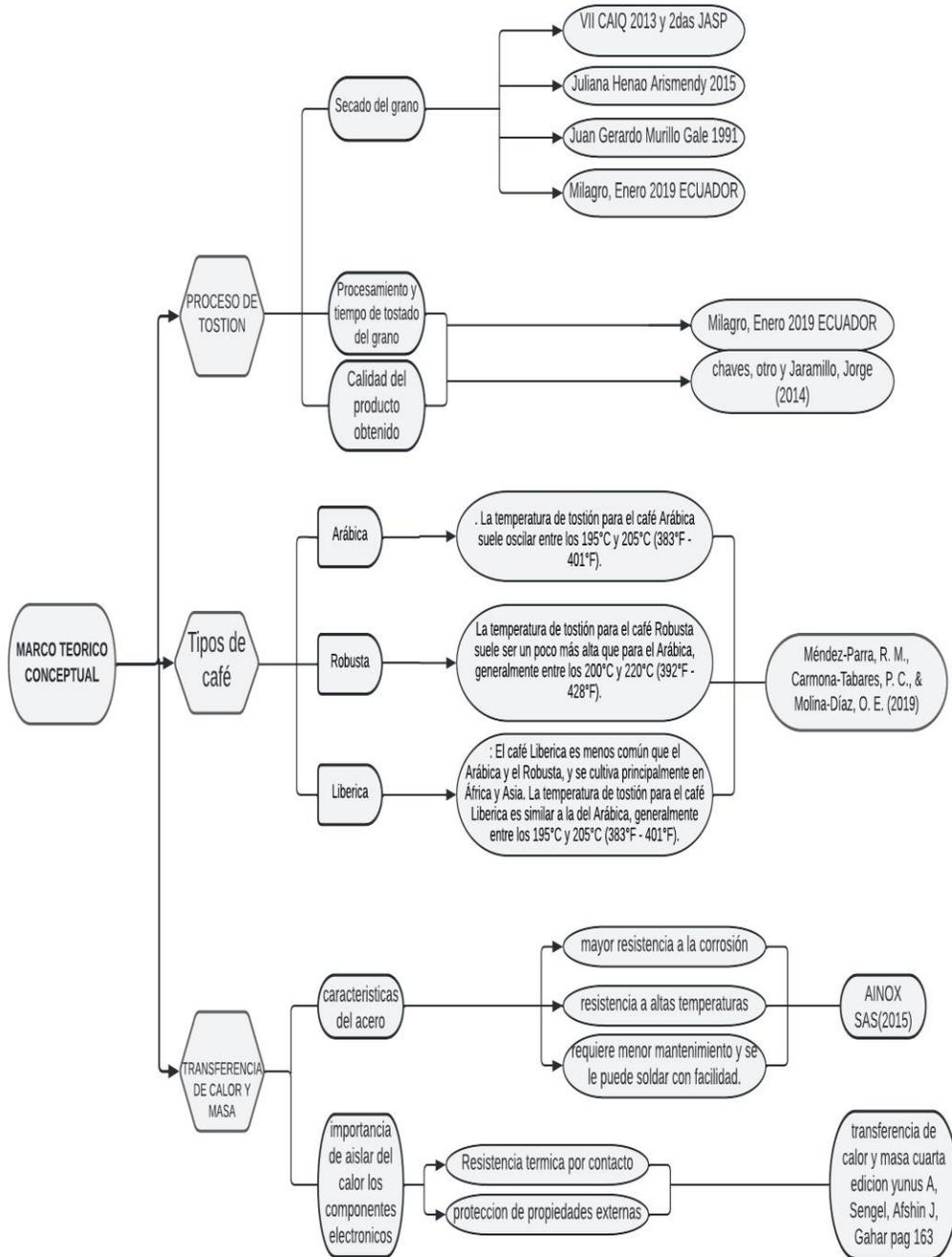
Para empezar un ciclo de tostado se debe llevar a cabo principalmente un precalentamiento de la máquina a la temperatura apropiada para que este producto salga con sus mejores características y aromas, luego de calentada la máquina se procede a agregar el producto a tostar en cilindro de acero inoxidable, ya que se ha cumplido todo el proceso de tuestión, la máquina apaga la fuente de calor y procede a verter el café en la bandeja de enfriado, seguido de esto se enciende el extractor para un enfriamiento parejo y controlado.

El proceso anteriormente mencionado se quiere lograr mediante la utilización de tarjetas programables, ya sean de Arduino o diseñadas mediante la utilización de microcontroladores PIC, lo cual va a realizar la función de controlar los procesos de acuerdo de acuerdo a los requerimientos ingresados por el usuario u operador, como se observa en la (figura 3) para llevar a cabo la toma de temperaturas y controlar estas mismas, se establecen dentro de la programación los parámetros dados por la industria cafetera, esta máquina también tendrá incluida una pantalla en la cual se irá mostrando el porcentaje de proceso que se va efectuando, con lo que se estará seguro de que el tueste se está realizando correctamente.

Para lograr esto es necesario elaborar la programación para estas tarjetas ya sea en Arduino o con integrados PIC con el fin de brindar un correcto funcionamiento.

En la siguiente figura se muestra el desarrollo del proyecto de una manera breve donde está estipulado la diferente información recopilada como son el proceso de tuestión los tipos de tueste que se van a establecer y que tan viable es la transferencia de calor y masa como también la importancia de aislar del calor los componentes electrónicos para su correcto funcionamiento.

Figura 3
Taxonomía



1.4.2.1. Proceso de tuestión. En la (figura 4) se aprecia los pasos para llevar a cabo el proceso de tuestión, este proceso es una etapa crucial en la producción de café, durante la cual los granos verdes de café se someten a calor controlado para desarrollar sus características de sabor, aroma y color. Durante este proceso, los granos de café experimentan una serie de transformaciones químicas y físicas que afectan profundamente su perfil de sabor final. La temperatura y el tiempo de tostado son cuidadosamente controlados para lograr resultados específicos, desde tuestes claros con sabores más ácidos y suaves hasta tuestes oscuros con sabores más intensos y amargos. La tuestión también es un proceso que requiere habilidad y experiencia por parte del tostador, ya que pequeñas variaciones en el proceso pueden tener un gran impacto en el resultado final del café. En resumen, el proceso de tuestión es fundamental para crear la amplia variedad de perfiles de sabor que se encuentran en el café, y es una parte esencial en la producción de café de alta calidad.

Figura 4

Diagrama de flujo del proceso

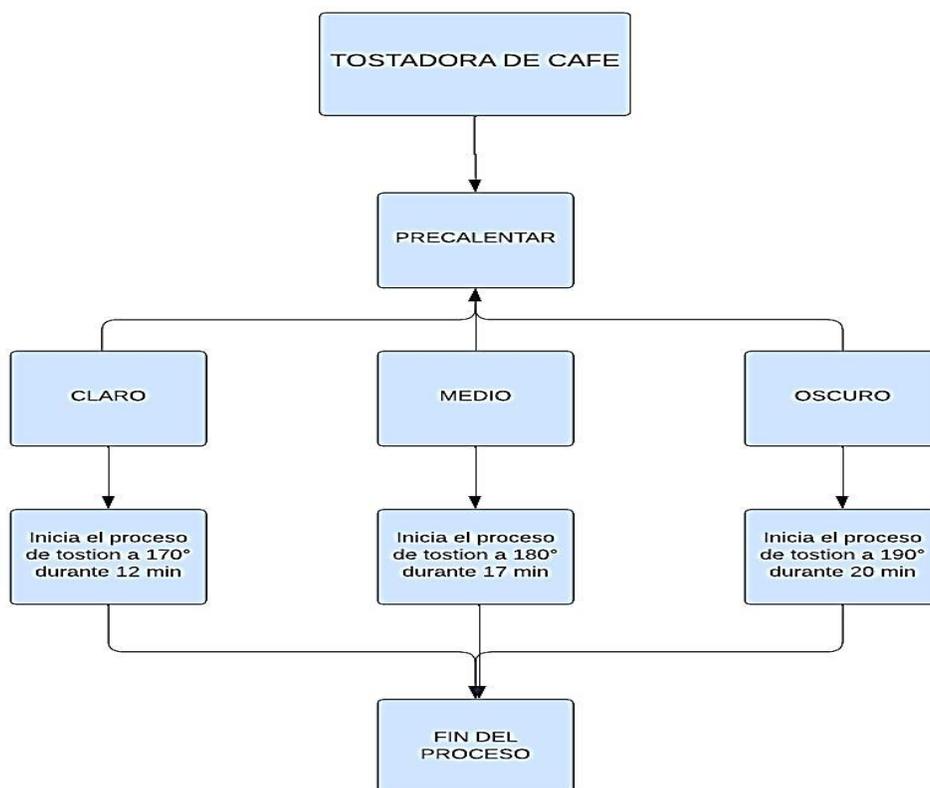
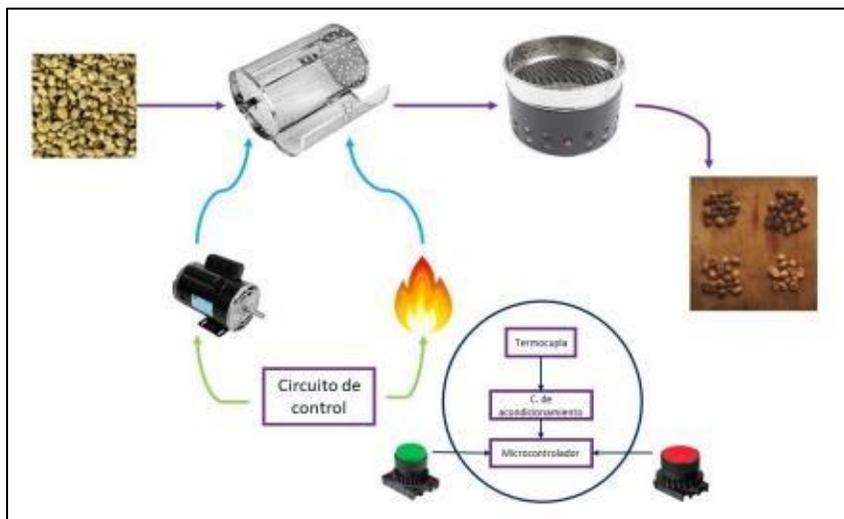


Figura 5

Diagrama de bloques proceso



Fuente Jaramillo, 2022

1.4.2.2 Sistemas de tueste. Hay dos divisiones tostadoras de café por cargas y tostadoras de café en continuo, según se encadenen procesos de tueste uno tras otro o sea un único proceso continuamente alimentado.

1.4.2.2.1 Tostadoras por cargas. Es el sistema más utilizado, existe una gran diversidad de máquinas con capacidades de tueste que oscilan entre los 150 gramos (gr) hasta 300 kilogramos (kg). El funcionamiento interno se rige por el sistema de tostado en tambor.

1.4.2.2.2 Tostadoras para torrefacto. El funcionamiento de una tostadora por torrefacto es similar al de otras tostadoras de café en términos de aplicar calor a los granos para tostarlos. Sin embargo, la diferencia radica en la etapa adicional en la que se agrega azúcar al proceso de tostado.

En una tostadora por torrefacto, los granos de café se colocan en un tambor o cámara de tostado y se calientan como en una tostadora convencional. Sin embargo, durante el proceso de

tostado, se introduce azúcar en forma de jarabe o polvo de azúcar. Este azúcar se carameliza durante el proceso de tostado, recubriendo los granos de café y añadiendo un sabor dulce y caramelizado al café final.

Las tostadoras por torrefacto suelen requerir un diseño y control especializado para garantizar que el azúcar se caramelicé de manera uniforme sin quemar los granos de café. Además, es importante tener en cuenta que el café torrefacto tiene un sabor distinto y puede no ser del agrado de todos los consumidores.

1.4.2.3 Fases de la tostión. En la tostión hay cinco fases principales que son: Crecimiento, Deseccación, disgregación, tostado completo y enfriamiento. Los primeros cambios se presentan a 50°C en las capas superficiales, a los 100°C el color verde del café comienza a cambiar a color amarillo, en este momento empieza la desecación donde se desprende vapor de agua y comienza la volatilización desarrollando además un olor parecido al de un “pan tostado”. Alrededor de los 120°C a 130°C el grano adquiere un color castaño que varía poco a poco a coloraciones pardas, aumentando su volumen, pero su olor aun no es característico. Alrededor de los 180°C el olor comienza a ser característico y a causa de la pirolisis (descomposición de grandes estructuras químicas por medio de calor) aparecen productos gaseosos como vapor de agua, CO₂, CO, compuestos volátiles por la descomposición de los carbohidratos, proteínas y grasas que son los causantes del aumento del volumen en el grano, el cual comienza a tomar una coloración marrón y se caramelizan los azúcares. (Mattia, 2017).

En este momento se inicia una fase de descomposición caracterizada por el rompimiento de la estructura celular de los granos debido a sobrepresiones internas (crepitación), producción de humo y la aparición del aroma del café, en este instante las reacciones endotérmicas alcanzan su punto máximo.

Posteriormente comienzan las reacciones exotérmicas debido al calor de reacción dentro del grano, que hacen que éste alcance temperaturas hasta 200°C aproximadamente. Después de alcanzada la óptima caramelización de azúcares se obtiene la tostación completa en donde desciende el contenido de agua a valores entre 1.5% y el 3.5% en peso. La zona de tostión se

encuentra entre los 180°C a 250°C siendo la temperatura óptima, la comprendida entre los 210°C y 230°C, por encima de ésta ocurre la sobretostión en donde se acentúan, el desprendimiento de humos, los granos se ennegrecen, el volumen ya no aumenta y en el peor de los casos se carbonizan, se hacen más quebradizos y el aroma desaparece. Para detener el proceso de tostión del café es necesario generar un enfriamiento rápido e inmediato de los granos, ya sea por medio de una corriente de aire o por apagado con aspersion de agua. La temperatura de tostión es muy importante ya que tiene una fuerte influencia sobre las cualidades del café. La duración de la tostión es aproximadamente de 5 a 12 minutos (bajo condiciones dadas). Este tiempo varía según el equipo que se utilice y la cantidad de almendra de café adicionada. En la tabla 1 se puede resumir el proceso de tostión (Giner, s, f).

Tabla 1

Proceso de tostión del café

Temperatura del grano (°C)	Color	Volumen	Proceso
100	Amarillo	No se modifica	Deseccación y pérdida de agua.
120-130	Castaño	No se modifica	Reacciones de reducción de azúcares y aminoácidos.
130-180	Marrón	Aumenta	Caramelización de azúcares.
180-200	Marrón	Aumenta	Producción de CO ₂ por pirogenación de carbohidratos, proteínas y grasas.
200-230	Marrón	Aumenta	Agrietamiento del grano (crepitación) y afloramiento del aceite en la superficie.
250	Negro sin brillo	Deja de aumentar	Sobretostión, se Carboniza y el aroma desaparece.

Fuente. (Prieto, López, 2012)

1.4.2.4 variables importantes del proceso de tostión. Con el fin de identificar las variables más importantes que intervienen en el proceso de tostión, es necesario considerar las principales características y las condiciones que determinan la calidad del café tostado.

El café es el producto de mayor complejidad entre el grupo de los alimentos y bebidas. Su constitución involucra entre 700 a 850 compuestos constituyentes del aroma y el sabor. La formación de estos compuestos depende de la variedad, el clima, el suelo, la nutrición y las prácticas culturales de producción. Estos compuestos no se pueden apreciar en el café verde, puesto que se desarrollan durante la tostión. (Mattia, 2017).

1.4.2.4.1 Conducción. (Ordoñez et al., 2016). Transmisión de calor por contacto, es un método de difícil control de la tostión puesto que es imposible obtener una calidad consistente utilizando este método.

1.4.2.4.2 Convección. (Ordoñez et al., 2016). Es el método más eficiente y el más efectivo. En este caso el grano de café flota en una corriente de aire caliente. Las tostaciones son rápidas. Se logra un mayor hinchamiento del grano. Por su homogeneidad produce más bebida.

1.4.2.4.3 Por Radiación. (Fischer, 2018). Se realiza mediante la radiación infra roja, ésta generalmente, produce un sobrecalentamiento en la superficie del grano y como el café es un mal conductor del calor, se quema en la superficie externa e impide la transmisión del calor a las capas internas dejándolos crudos.

1.4.2.4.4 Deshidratación. (Fischer, 2018). Al elevarse la temperatura interna del grano a cerca de 100 °C el agua que contienen sus tejidos se vaporiza. Por tal razón, la evaporación del agua genera una pérdida de peso, la reducción de los carbohidratos y eliminación de la película plateada. La pérdida de agua representa entre 13 y 20% del peso del café.

1.4.2.4.5 Reacción de la tostión. Se producen reacciones complejas pirolíticas. Se transforman los precursores en los 700 a 850 componentes que dan el aroma y sabor. Hay un hinchamiento celular (las paredes celulares pueden resistir hasta 25 bar de presión de gas).

Producción de CO₂ (5 a 12 lb. /Kg de café). Durante la tostión se producen las siguientes reacciones químicas:

(Mattia, 2017). Descomposición de aminoácidos y pérdida de proteínas (que participan en la formación del aroma, sabor amargo y compuestos metal-quelutados del café).

1.4.2.4.6 Caramelización. (Fischer, 2018). Reacción de oscurecimiento de los azúcares calentados por encima de su punto de fusión en ausencia de proteínas o aminoácidos.

1.4.2.4.7 Enfriamiento. (Mattia, 2017). Una vez que se ha alcanzado el nivel de tostado deseado, los granos de café se enfrían rápidamente para detener el proceso de tostado y evitar que los granos se quemen. Esto se puede lograr mediante la exposición de los granos a corrientes de aire frío o mediante el uso de equipos de enfriamiento especializados. El enfriamiento rápido también ayuda a preservar los sabores y aromas recién desarrollados en los granos de café tostado. El enfriamiento con aire se hace con 400 m^3 para 100 kg de aquí se hace cálculos respectivamente según los kg o gr a tostar.

1.4.3.1 Tipos de café que se pueden tostar y sus temperaturas. Los productos más relevantes son los presentados a continuación:

1.4.3.1.1 Café con sabores artificiales. en la actualidad existe gran variedad y tipos de café, sin embargo se le puede dar un factor característico agregándole ciertos sabores como son la vainilla, la canela, licor de almendras y muchos más sabores que pueden dar un toque característico y hacerlo un café diferente, pero a la gran mayoría de las personas les agrada mucho el café en su sabor natural, el cual se obtiene a través del proceso de tuestión el cual se debe realizar con las temperaturas y tiempos adecuados para así obtener un café de muy buen sabor con sus toques amargos y asidos en su punto.

1.4.3.1.2 Arábica. (Sab, 2020). El café Arábica es una de las variedades más populares y apreciadas. Se caracteriza por su suavidad, acidez pronunciada y notas afrutadas y florales. La temperatura de tuestión para el café Arábica suele oscilar entre los 195°C y 205°C . El café Castilla es una variedad de esta especie conocida por ser de alta calidad. La temperatura de tostado del café Castilla, al igual que ocurre con otras variedades de café, puede variar dependiendo del perfil

de sabor que se quiera conseguir. En general, el tostado del café se realiza en un rango de temperatura que oscila entre 180 °C y 240 °C.

1.4.3.1.3 Robusta. (Sab, 2020). El café Robusta tiene un sabor más fuerte y amargo en comparación con el Arábica. Se caracteriza por su cuerpo completo, alta concentración de cafeína y notas terrosas. La temperatura de tueste para el café Robusta suele ser un poco más alta que para el Arábica, generalmente entre los 200°C y 220°C

1.4.3.1.4 Liberica. (Sab, 2020). El café Liberica es menos común que el Arábica y el Robusta, y se cultiva principalmente en África y Asia. Tiene un sabor distintivo, con notas afrutadas y florales, así como un cuerpo completo. La temperatura de tueste para el café Liberica es similar a la del Arábica, generalmente entre los 195°C y 205°C.

1.4.3.3 Transferencia de calor y masa. La transferencia de calor y masa es un campo de estudio ampliamente investigado en la ciencia y la ingeniería. Se refiere al proceso de transferencia de energía térmica y el transporte de masa entre diferentes sistemas.

La conducción de calor se refiere al proceso mediante el cual el calor se transfiere a través de un medio sólido debido a la conducción molecular. Dentro de este fenómeno se estudian conceptos fundamentales como la ley de Fourier, que describe la relación entre el flujo de calor, el área de transferencia y la diferencia de temperatura. Además, se analizan la resistencia térmica y los diferentes modos de conducción, como la conducción unidimensional, bidimensional y tridimensional (Gonzales et, al., 2020).

Por otro lado, la convección de calor implica la transferencia de calor debido al movimiento de un fluido. En este caso, se examinan conceptos como la transferencia de calor por convección natural, que ocurre debido a las diferencias de densidad y el gradiente de temperatura en el fluido, y la convección forzada, que se produce por la circulación forzada del fluido mediante un agente externo. Asimismo, se analizan los coeficientes de transferencia de calor convectiva y las correlaciones empíricas utilizadas para determinar estos coeficientes.

De acuerdo con (Quiroz, 2021), la radiación térmica se refiere al intercambio de energía térmica a través de ondas electromagnéticas. En este contexto, se investigan aspectos como la ley de Stefan-Boltzmann, que establece la relación entre la energía radiante y la temperatura de un cuerpo negro, así como el poder emitido por un cuerpo negro. También se estudian las propiedades de las superficies reflectantes en relación con el intercambio de radiación térmica.

La transferencia de masa, por otra parte, se refiere al transporte de especies químicas en un medio. En este campo se analizan fenómenos como la difusión molecular, que describen el movimiento aleatorio de moléculas y la resultante mezcla de especies químicas. Además, también se consideran la difusión en fluidos, la convección de masa y los coeficientes de transferencia de masa, que son parámetros utilizados para medir las tasas de transferencia de masa en diferentes sistemas (Carreño y Gómez, 2020).

Finalmente se deduce que, la conducción es el movimiento a través de un medio sólido, mientras que la convección es el movimiento de líquidos. La radiación térmica se refiere al intercambio de energía térmica a través de ondas electromagnéticas, y la transferencia de masa está relacionada con el transporte de especies químicas. Para cada uno de estos fenómenos existen ciertos conceptos y principios que se estudian en el marco de la teoría de la transferencia de calor y masa.

1.4.3.4 Torrefacción. En el proceso de tostado de café, uno de los sistemas más comunes es el utilizado en un tostador cilíndrico que rota constantemente. Esta rotación asegura que los granos estén en movimiento continuo y se tuesten de manera uniforme; cada tipo de grano tiene un tiempo y nivel de tostado óptimos, y variables como el porcentaje de humedad, el tiempo y la temperatura de tostado afectan el sabor final del café (Puerta y Echeverri, 2019).

Durante el proceso de tostado, la composición química de los granos experimenta cambios significativos. El agua presente en los granos se disipa, y diversas reacciones químicas convierten los azúcares y almidones en aceites, los cuales contribuyen en gran medida al aroma y sabor característicos del café. A medida que los granos se tuestan, aumentan su tamaño

aproximadamente al doble, y el azúcar presente en ellos se carameliza, cambiando el color de verde a marrón (Madrid et, al, 2019).

El color y aspecto del grano tostado dependen del tiempo de exposición a altas temperaturas. Cuanto más largo sea el tiempo de tostado, más oscuro será el grano. Por lo general, el tostado del café se lleva a cabo durante un período de 10 a 20 minutos, a temperaturas que oscilan entre 180°C y 250°C. Según (Barrantes, 2019), variar estas condiciones durante el tostado influye en la preparación de una buena taza de café, así como en las características finales del café tostado. Un tostado breve puede resultar en un café con sabor a nuez y poco cuerpo, ya que los aceites no se liberarán por completo.

Es importante destacar que los granos tostados oscuros contienen menos acidez y cafeína en comparación con los granos más claros. Sin embargo, también tienen un período de conservación más corto debido a la mayor cantidad de aceites en la superficie. Los granos tostados oscuros tienen un sabor ahumado, penetrante y quemado, que puede ocultar el verdadero sabor del grano (Gonzales, et, al, 2020). Por otro lado, los granos tostados claros tienen un sabor más intenso y una mayor acidez en comparación con los tostados oscuros, lo que permite que las cualidades del grano se mantengan presentes. Los tostados más claros suelen realizarse con granos de mayor calidad, ya que en este caso se busca resaltar el sabor real del grano. El tiempo y la temperatura de tostado influyen en el color y sabor final del café. Los granos tostados oscuros tienen menos acidez y cafeína, mientras que los tostados claros mantienen las cualidades del grano.

1.4.3.5 Transformación del café. La etapa de tostado del café es fundamental dentro de su proceso de elaboración. Un buen tueste tiene un mayor impacto en la calidad de una taza de café que la selección de la mezcla utilizada. Durante el proceso de tostado, los granos de café verde se someten a altas temperaturas durante un tiempo específico. En este intervalo, el café experimenta una pérdida de peso que oscila entre el 15% y el 20%, principalmente debido a la evaporación del agua y en menor medida a la pirolisis de algunos componentes activos (Acuña et, al., 2020).

La investigación de (Pabón, 2020), concluye que a medida que los granos se tuestan, aumentan su volumen entre un 100% y un 130% en comparación con su estado inicial como

granos verdes. Además, su color amarillo verdoso se transforma en un tono marrón, que puede variar en intensidad dependiendo del grado de tostado seleccionado. La composición química del grano de café, que incluye azúcares, grasas, proteínas, sustancias nitrogenadas no proteicas y ácidos, experimenta una transformación significativa tanto en términos cuantitativos como cualitativos debido a las altas temperaturas del proceso de tostado.

El tostado del café es una fase vital en su proceso de producción. Durante esta etapa, los granos verdes se someten a altas temperaturas, lo que resulta en la evaporación del agua y la pirólisis de algunos componentes activos. El tostado también conlleva cambios en el volumen y el color de los granos, así como transformaciones químicas en su composición. Estos procesos son cruciales para obtener la calidad y características deseadas en una taza de café (Gordón Casco, 2019).

Figura 6

Proceso de tosti3n de caf3



Nota: Figura extraída de Heredia Tarifeño, 2020.

1.4.3.6 Maquinaria

1.4.3.6.1 Tipos de tostadoras. En la industria existen varios tipos de tostadoras, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas, dependiendo de las necesidades de trabajo del usuario.

- **Tostadoras de tambor.** Son las tostadoras más comunes y tradicionales. Utilizan un tambor giratorio donde se colocan los granos de café y se tuestan mediante calor indirecto.

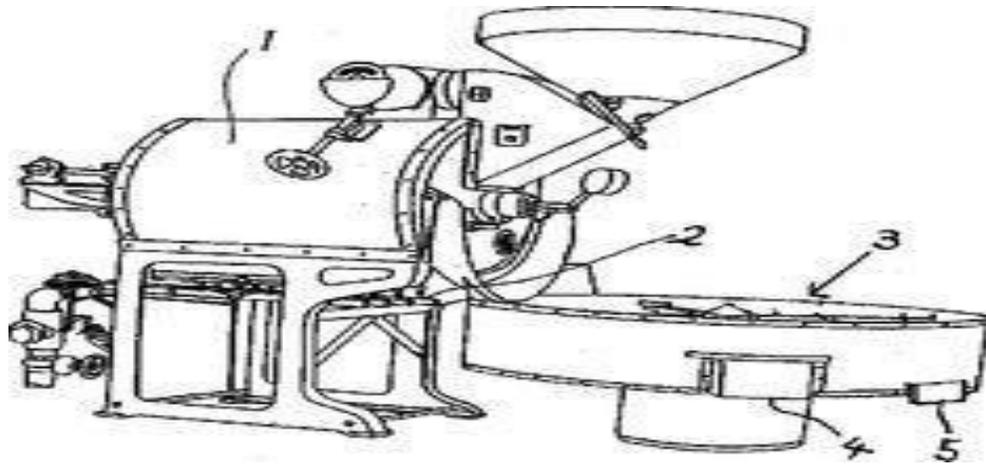
Permiten un control preciso de la temperatura y el tiempo de tostado, lo que las hace ideales para tostar lotes pequeños o grandes de café. (Macrae, 1987).

- **Tostadoras de lecho fluido.** Utilizan aire caliente para tostar los granos de café mientras están en movimiento dentro de una cámara de tostado. Este método de tostado proporciona una distribución uniforme del calor y un tostado rápido y consistente. Son populares en la industria comercial debido a su eficiencia y capacidad para tostar grandes cantidades de café. (Farah, 2019).

- **Tostadoras de convección.** Funcionan calentando el aire y circulándolo alrededor de los granos de café para tostarlos de manera uniforme. Son similares a las tostadoras de lecho fluido, pero su diseño puede variar. Son adecuadas para tostar lotes pequeños o medianos de café y son populares entre los tostadores domésticos. (Steiman, 2013).

Figura 7

Tostadora por convección



Fuente (Tos, s, f)

- **Tostadoras de gas.** (Fischer, 2018). Utilizan gas natural o propano como fuente de calor para tostar los granos de café. Son comunes en entornos comerciales e industriales debido a su potencia y capacidad para tostar grandes volúmenes de café de manera eficiente.

Figura 8

Tostadora a gas

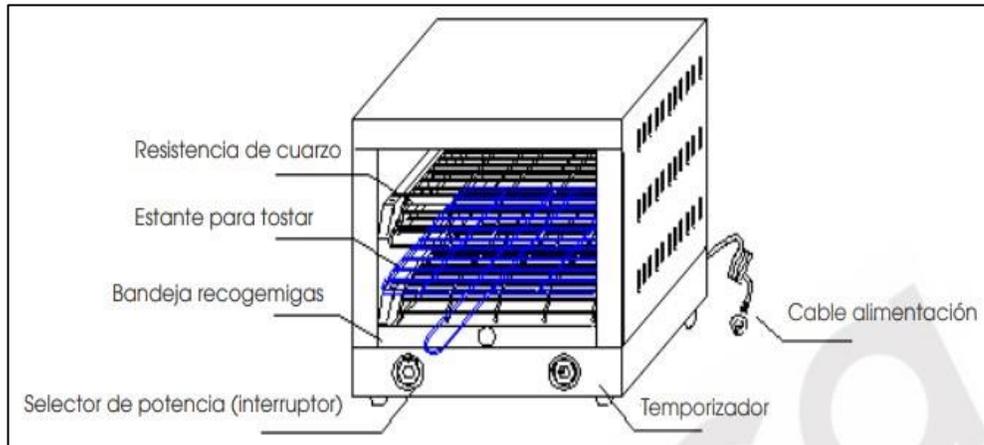


Fuente (Roaster, TKMSX-15)

Tostadoras eléctricas. Utilizan electricidad como fuente de calor para tostar los granos de café. Son populares en entornos domésticos y comerciales más pequeños debido a su facilidad de uso y menor requerimiento de espacio. (Eunasa, 2020)

Figura 9

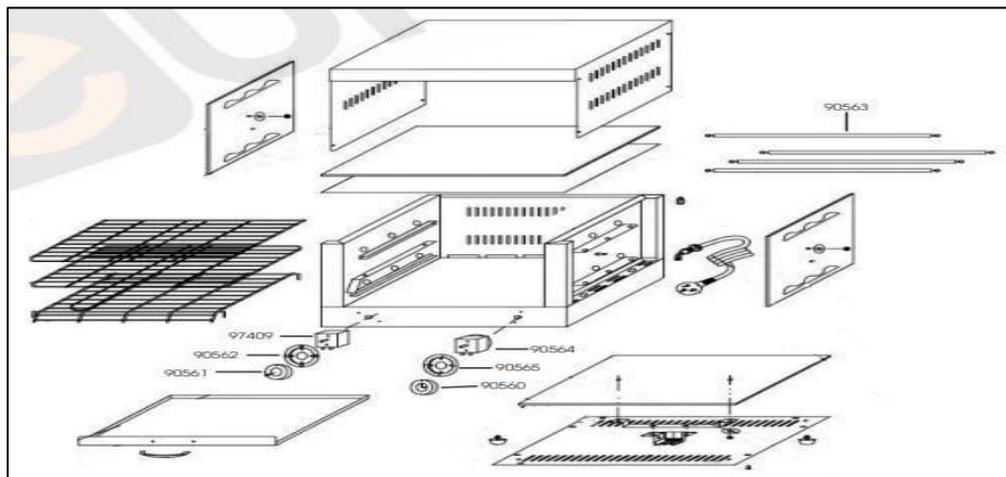
Tostadora eléctrica



Fuente (Eunasa, 2020)

Figura 10

Despiece tostador eléctrica



Fuente (Eunasa, 2020)

Tostadoras de microondas. (Tos, s, f). Utilizan microondas para calentar los granos de café y tostarlos de manera rápida y uniforme. Son menos comunes que otros tipos de tostadoras y generalmente se utilizan en entornos domésticos o experimentales.

Figura 11

Tostadora de microondas



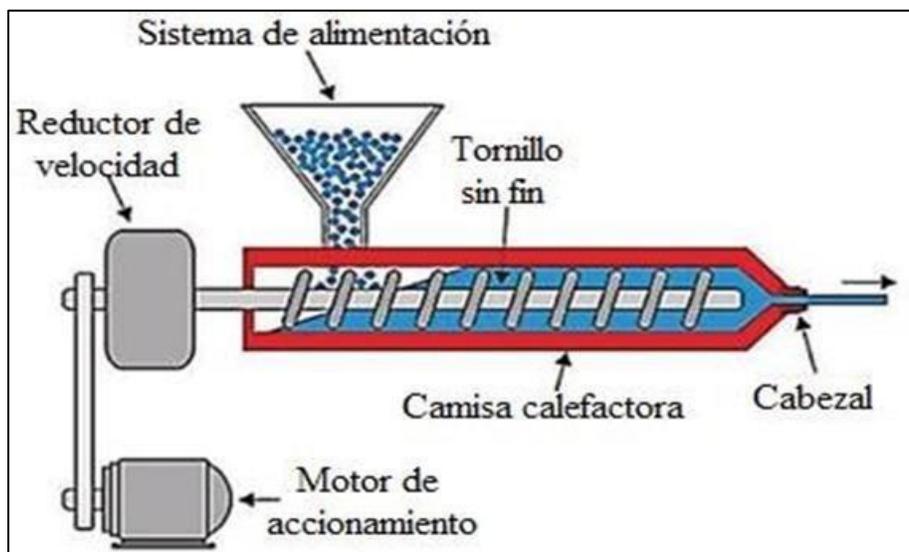
Fuente (Tos, s, f)

- **Partes de una tostadora.** La tostadora necesita de diferentes componentes específicos, para llevar a cabo cada una de las etapas y así lograr una transformación de manera efectiva y segura.

- **Tornillo sin fin.** Este tipo de tornillo sin fin se usa en la parte inferior del tambor para expulsar o extraer los granos de un determinado de producto. La rapidez del tornillo está dada por un sistema reductor de velocidad a través de engranajes o bandas desde un motor. Está diseñada para productos granulados o en polvo (Valarezo y Vizúete, 2016).

Figura 12

Tornillo sin fin



Fuente. (Valarezo y Vizúete, 2016).

- **Tolva de alimentación.** Es un componente importante que se utiliza para contener y alimentar el material a procesar de manera controlada. En el contexto de la tostadora de café, la tolva de alimentación es donde se colocan los granos de café crudo antes de que ingresen al proceso de tostado. El diseño de la tolva se realiza según la capacidad de producción. (Carreño, 2015).

- **Tambor rotatorio.** Es un componente fundamental que desempeña varias funciones clave durante el proceso de tostado como son; mezcla y agitación de los granos y Distribución uniforme del calor. (Castañeda, 2017)

- **Bandeja de secado o enfriamiento.** Se utiliza para manipular los granos de café antes o después del proceso de tostado ya sea secándose o enfriándose uniformemente. (Castañeda, 2017)

- **Poleas y bandas.** Son componentes importantes que ayudan a transmitir el movimiento, ajustar la velocidad, sincronizar movimientos y reducir vibraciones y ruido, teniendo en cuenta

mantener la tensión adecuada de la banda para un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de los componentes. (Vásquez, 2019)

Tabla 2

Bandas industriales

Correa sincrónica (KPS II)	
Correas agrícolas w800	
Correas v dobles	
Correas de velocidad variable	

Fuente. (Bandas industriales SA)

- **Rodamientos.** Son componentes que proporcionan soporte, guía y movimiento suave a diferentes partes de la maquinaria. Su diseño y función ayudan a reducir la fricción, el desgaste y el ruido, contribuyendo así al funcionamiento eficiente y prolongado de la tostadora. (Pérez, 2022)

Tabla 3

Tipos de rodamientos

Rodamiento de una hilera de rodillos cilíndricos	
Rodamiento de rodillos cónicos	
Rodamiento de agujas	
Rodamiento de bolas o rotula	
Rodamiento axial de bolas	

1.4.3.7 Variables básicas del tueste De acuerdo con (Campos, et, al, 2019), en el proceso de torrefacción, existen tres variables fundamentales que tienen un impacto significativo: temperatura, humedad y tiempo:

La temperatura en el proceso de tostado del café es un factor crucial y depende de varios aspectos, como el tipo de máquina utilizada, el tiempo de tostado y la intensidad del color final deseado. Durante el proceso de tostado, se pueden identificar tres fases distintas. En la primera fase, el café pierde humedad, y aunque esta etapa tiene menos influencia en el sabor final, es importante para el proceso general. En la segunda fase, se produce la expansión del grano de café y se inician las reacciones que generan gases. La tercera fase es la más lenta y fundamental, ya que en ella se desarrolla principalmente el sabor final del producto (Rojas, 2021).

Es importante tener cuidado con los cambios bruscos de temperatura durante el proceso de tostado, ya que pueden alterar las propiedades organolépticas del café. Un aumento repentino de temperatura puede acelerar la velocidad de tostado, mientras que una disminución en la temperatura prolonga el tiempo de calentamiento, sin llegar al grado de tostado deseado (Acuña, et al, 2020).

Igualmente, (Heredia, 2020). Afirma que, la humedad es otro factor crucial en el proceso de tostado del café. Se refiere al contenido de agua en relación con la masa total del grano, expresado como un porcentaje. Al ingresar los granos a la tostadora, generalmente contienen alrededor del 12% de humedad, y después del proceso de tostado, este valor puede variar entre un 2% y un 5%, dependiendo del tostador y de las características del café. Durante el tostado, la humedad presente en la superficie del grano se transfiere fácilmente al aire circundante. A medida que avanza el proceso, el agua migrará desde el interior del grano hacia la superficie para compensar la pérdida de humedad, en un proceso conocido como difusión. El aumento de la temperatura provoca un aumento en la presión de vapor de agua, que se elimina mediante extractores o sistemas de ventilación.

Por último, la temperatura y la humedad son variables fundamentales en el proceso de tostado del café. La temperatura se controla en diferentes fases del tostado y tiene un impacto en el sabor y en las propiedades organolépticas del café. La humedad inicial de los granos y su pérdida durante el tostado también desempeñan un papel crucial en la calidad y características finales del café tostado. Ambos factores deben ser controlados cuidadosamente para obtener los resultados deseados (Gordón, 2019).

1.4.4 Marco conceptual

Bache o Lote: La cantidad de café que se va a tostar utilizando el prototipo (Barrantes Montoya, 2019).

Características organolépticas: Son las características como el olor, sabor, textura y color que definen las cualidades específicas de un alimento (Gonzales, et al, 2020).

Convección: Es el método utilizado para transferir calor durante el proceso de tostado del café (Heredia, 2020)

Desecación: Es un procedimiento físico que se utiliza para reducir la humedad de un producto con el fin de evitar daños en la materia prima (Heredia, 2020).

Escala Agtron: Es una referencia de puntos utilizada para clasificar el grado y color del tueste de los granos de café, lo cual permite determinar el nivel de tostado (Quiroz, 2021).

Pirolisis: Es la descomposición de materia orgánica y otros materiales a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este es el cambio que experimenta el café al iniciar el proceso de tueste.

Proceso endotérmico: Es una reacción química en la cual se absorbe energía. En el caso del café, ocurre durante el proceso de tostado, donde la energía de los productos es mayor que la de los reactivos (Rojas, 2021).

Proceso exotérmico: Es un proceso en el cual un sistema libera energía hacia su entorno, generalmente en forma de calor. En el caso del tueste de café, ocurre al calentar el cilindro de tostado (Pabón, 2020).

Radiación térmica: Se refiere a la emisión de calor en forma de energía radiante desde un cuerpo a cierta temperatura. En el proceso de tostado de café, esto se aplica al calentamiento del cilindro de tostado mediante la emisión de calor en varias direcciones (Rojas, 2021).

Torrefacto: Es un tipo de tueste en el cual se utiliza azúcar, lo que le confiere al café sabores intensos y amargos (Ramírez Durán, 2018).

Tostadora: Es un aparato utilizado para tostar alimentos como el café y otros granos similares (Rojas, 2021).

Transferencia de calor: Es el intercambio de energía, específicamente de calor, entre dos o más cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas (López, et al, 2020).

Tueste: Es el proceso de secar un alimento sin quemarlo, logrando un color dorado y una textura crujiente en el caso del café tostado (Ramírez Durán, 2018).

1.4.5 Marco contextual

En el desarrollo del proyecto de investigación, se llevará a cabo en la ciudad de Pasto, la cual es la capital administrativa del departamento de Nariño y está situada en el centro oriente de dicho departamento, al suroccidente de Colombia. Desde el punto de vista político-administrativo, la ciudad se divide en 12 comunas y 17 corregimientos. Tiene una extensión territorial de 6.181 kilómetros cuadrados y su principal centro urbano se encuentra a una altitud de 2.527 metros sobre el nivel del mar. (Alcaldía municipal de Pasto, 2012).

La Universidad Mariana, junto con su sede de laboratorios Alvernia, es el lugar donde se lleva a cabo la construcción y se realizarán los avances correspondientes al planteamiento de la investigación. Esta institución educativa cuenta con una matrícula de más de 7.000 estudiantes y cuenta con 500 docentes. Ofrece una amplia oferta académica compuesta por 5 facultades. Es importante destacar que, además de su enfoque en la infraestructura y modernización, la universidad también tiene un compromiso con el desarrollo sostenible de la región, respaldando la conservación del medio ambiente y la equidad social.

1.4.6 Marco legal

Ley 76 de 1927: Esta ley tiene como objetivo la protección y defensa del café en Colombia. Establece disposiciones para regular la producción, comercialización y exportación del café, así como para prevenir prácticas desleales en el mercado cafetero (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2017).

Ley 76 de 1931: Esta ley provee el fomento de la industria cafetera en el país. Tiene como finalidad promover y apoyar el desarrollo de la producción cafetera, así como establecer medidas para mejorar la calidad y competitividad del café colombiano (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2017).

Ley 11 de 1972: Esta ley deroga el impuesto de exportación de café y establece disposiciones adicionales. En esta ley se eliminó el impuesto específico que se aplicaba a las exportaciones de café, lo cual tuvo un impacto significativo en la comercialización del café colombiano (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2017).

Decreto Ley 2811 de 1974: Este decreto dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Aunque no está directamente relacionado con la producción y comercialización de café, este código establece disposiciones para la protección de los recursos naturales, incluyendo aquellos relacionados con la producción cafetera (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2017).

1.5 Metodología

1.5.1 Línea de investigación

Esta investigación se enfoca dentro de la línea de investigación, diseño y desarrollo mecatrónico, la cual pertenece al grupo de investigación GRIM del programa de Ingeniería.

Mecatrónica de la universidad Mariana bajo la modalidad de innovación, optimización y desarrollo tecnológico puesto que involucra la formulación, planeación y ejecución de prototipos dando solución a problemas detectados en las comunidades.

1.5.2 Tipo de investigación

Para el presente proyecto se abordó el tipo de investigación aplicada ya que se centra en un estudio tecnológico mediante la aplicación de teorías o principios e involucra un estudio

experimental descriptivo puesto que se evalúan diferentes condiciones, como la optimización del proceso de tuestión de un alimento a partir de la materia prima en el departamento de Nariño y donde se involucran las variables “tiempo vs temperatura” “tiempo vs producto”.

En cuanto al enfoque de la investigación, se lo determina como mixto ya que es cuantitativo por la generación de datos dentro de los cálculos de diseño; como el rpm del motor, tamaño del tambor, tamaño de la tolva, bandeja de secado, especificaciones del tornillo sin fin, entre otros.

De la misma manera el enfoque es cualitativo debido a la evaluación del café como producto final, realizando pruebas para generar análisis estadísticos evaluando la eficiencia y la eficacia de la máquina.

1.5.3 Hipótesis de la investigación

El principal objetivo de la investigación es la implementación de una tostadora semi automática que brinde una mayor eficiencia en la producción de café y por ende en la recolección de información a todos los bienes asociados a la producción cafetera, sin embargo, en caso de no lograr esto, la implementación de este prototipo podría ser viable debido a que el proyecto genera automatización en la producción de alimentos para consumo humano, dando así un mayor progreso y bienestar para sectores agrícolas en el departamento de Nariño, por otro lado, también se podría establecer una autosostenibilidad en las fincas productoras nariñenses.

1.5.4 Descripción metodológica

Pertenece a la línea de investigación aplicada ya que se quiere dar solución a una problemática generando una herramienta de mucha utilidad.

El presente trabajo es una investigación descriptiva y cuantitativa. En estos estudios se muestran, narran, reseñan o identifican hechos, situaciones, rasgos, características, con el fin de delimitar los hechos que conforman el problema de esta investigación. Esto permite lo siguiente (Méndez, 2011).

1 establecer las características demográficas.

2 identificar las preferencias de consumo y la decisión frente a la compra y aceptación de un producto.

3 establecer comportamientos y necesidades.

Mediante el análisis del mercado, se identificará el comportamiento de los consumidores y de los proponentes o mercado competidor de este tipo de productos, detectando sus necesidades de consumo y la forma de satisfacerlas. Con este estudio se busca obtener una serie de datos que permitan proponer las técnicas de mercado para la venta del producto, de tal modo que se logre identificar la demanda potencial, además la oferta del mercado y factores de compra de café tostado y molido en Nariño, Colombia para determinar el mercado potencial del proyecto.

Mediante el estudio técnico se diseñará el prototipo relacionado al producto para la tostión del (café). Como la descripción de insumos, materia prima, y requerimientos en cuanto a la maquinaria y tecnología de los recursos para obtener el producto deseado, finalmente se evaluará la rentabilidad del proyecto y su estructura financiera para determinar que cumpla con el objetivo, como también llevar a cabo las siguientes fases propuestas:

Fase1 Revisar fase bibliográfica en cuanto al uso que se le da a beneficios y Propiedades como por ejemplo El café ofrece una serie de beneficios para la salud que abarcan tanto el bienestar mental como físico. En primer lugar, su contenido de cafeína puede mejorar el estado de ánimo y la concentración, lo que puede resultar en una reducción de la fatiga y el estrés. Además, su capacidad para estimular la función cognitiva ha sido respaldada por estudios que sugieren mejoras en la memoria, la concentración y la atención. Asimismo, el café es una fuente rica en antioxidantes, que desempeñan un papel crucial en la protección contra el daño celular causado por los radicales libres, lo que puede ayudar a reducir el riesgo de enfermedades crónicas como las enfermedades cardíacas y el cáncer.

Fase2: Para el diseño de la máquina se usarán software como AutoCAD, Inventor, SolidWorks; ya que permiten modelar el proyecto y realizar diferentes tipos de ensamblajes en 3D, son exactos en mediciones y de gran utilidad para obtener un excelente diseño.

Los gráficos permiten visualizar el diseño en tiempo real, mientras que otros programas solo permiten crear definidas representaciones fotográficas realistas y animaciones.

Fase3: En esta fase se procede al diseño de un circuito electrónico el cual cumpla con las funciones las cuales se necesitan para realizar el trabajo propuesto, también se debe tener en cuenta los diferentes componentes electrónicos que se van a usar, esto depende corriente, voltajes y demás para calcular los demás componentes a utilizar como capacitancia resistencia, inductancia etc...

Fase4: Programación de software utilizando Arduino en el cual se tiene mejores condiciones de operar, es importante porque el software se ha convertido en un elemento ubicuo en el actual mundo digital, esto quiere decir que está presente en todos los aspectos de la vida humana. El software brinda un excelente lenguaje de programación y comunicación, capaz de controlar diversos artefactos u objetos.

Fase 5: Para la construcción de la máquina es necesario tener todas las piezas y herramientas a disposición, para proceder al ensamblaje respectivo este se realizará en el taller de trabajo, y es necesario basarse en las recomendaciones dadas, procedente a esto se realizara el montaje de circuitos, motores y demás para poder hacer pruebas. Cabe resaltar que en el prototipado se usara materiales resistentes para diferentes factores, para que así brinde mayor seguridad, y genere mayor eficacia funcional.

Fase6: Pruebas de validación y funcionamiento dando a conocer que la máquina y el diseño fue exitoso, viable y emprendedor para la tostión de café, se harán las diferentes pruebas mencionadas ya sean de resistencia de la máquina y la calidad del producto donde se lo evaluara mediante un colorímetro, donde se analizarán los datos RGB arrojados por el mismo para

comparar con la escala agron, para cada nivel de tueste, como también físicamente las propiedades requeridas como color, olor, sabor etc.

1.5.5 Validez interna

Para la validación interna se propone realizar las experimentaciones de tostado para los granos, variando la temperatura para un tueste claro entre 196°C a 205°C, para un tueste medio entre 210°C a 220°C y para un tueste oscuro entre 225°C a 240°C empresas como Starbucks suelen tostar sus granos a temperaturas más altas para obtener sabores consistentes y oscuros, mientras que empresas como Blue Bottle Coffee usan temperaturas bajas y tiempos precisos para resaltar características específicas de cada lote de café. Se realizará distintos tuestes variando estas temperaturas dadas para cada una, evaluar los parámetros del nivel de tueste y así obtener el análisis del mejor proceso.

Además, se plantea investigar en una base de datos, sensores que hayan sido utilizados en equipos tostadores de café ya que la precisión de los sensores es fundamental para este proceso.

1.5.6 Validez externa

Para la validez externa se plantea que los productores, hagan el respectivo uso para llevar a cabo el proceso de tueste el grano y evalúen cualidades como acidez, cuerpo y color del grano, respecto al tostado tradicional para que califiquen la eficacia y el rendimiento que les pueda aportar esta máquina.

2. Presentación de resultados

2.1 Análisis del primer objetivo

Para el desarrollo del proyecto en la parte inicial se tuvieron en cuenta las causas y consecuencias de las propiedades y características que desarrolla el grano durante el proceso, como también se compararon algunos sistemas de tostadoras agroindustriales que brindan fichas técnicas donde se puede encontrar información sobre componentes y las características de estos.

2.1.1 El tueste del café

Durante toda la historia del café, el hombre ha investigado y mejorado los métodos de tueste, reconociéndose desde antaño esta operación como un proceso vital para complacer a los consumidores de la bebida, la más consumida en el mundo, tras el agua. Los métodos de tueste fueron en principio muy rudimentarios, a base de planchas curvadas, sartenes o cuencos hasta la llegada de las tostadoras de forma esférica o cilíndrica. Los que ya tenemos una cierta edad todavía recordamos estos últimos equipos, instalados en algunos establecimientos, que perfumaban los barrios del agradable aroma del café. Hoy, sobre todo en las grandes ciudades, es difícil poder disfrutar de este placer a causa de los humos del tráfico y todo tipo de olores derivados de diversas actividades, aunque si nos lo proponemos siempre se puede encontrar alguna tienda o despacho de café, situada en algún lugar más o menos a cobijo de tráfico y malos olores que nos obsequia con este agradable aroma (Castellano, 2020).

2.1.2 ¿Porque se tuesta el café?

El tueste es una etapa fundamental en la producción del café, donde en los últimos años se han logrado avances tecnológicos significativos. En la actualidad, la totalidad del café destinado al consumo masivo es tostado a nivel industrial. Sin embargo, en algunas comunidades, especialmente aquellas dedicadas al cultivo del café, todavía se tuesta el grano utilizando métodos tradicionales, como la sartén o los cuencos. En estos casos, las cantidades de café tostado son pequeñas y se destinan al consumo doméstico.

A nivel industrial, existen numerosos sistemas de tueste disponibles, como el tueste por fuego directo, aire caliente, convección, lecho fluido, entre otros. Estos sistemas permiten un control total del proceso de tueste, lo que resulta en resultados estandarizados de acuerdo a las preferencias del tostador. Además, las máquinas de tueste se pueden diferenciar por su capacidad para realizar tuestes por ciclos o de forma continua.

Si contamos con una materia prima de calidad, previamente sometida a un proceso de limpieza de impurezas y clasificación, podemos transformarla en café tostado con sabores lo suficientemente distintos como para satisfacer tanto a expertos como a consumidores en general. El tueste es similar a la cocción de los alimentos, donde, dependiendo de diversas variables, es posible obtener sabores diferentes utilizando los mismos ingredientes. Cuidar los pequeños detalles marca una gran diferencia en el sabor y aroma del producto final (Castellano, 2020).

2.1.2.1 Tabla comparativa tipos de tostadoras. Para el desarrollo del proyecto en la parte inicial se compararon algunos sistemas de tostadoras, referenciado principalmente en la productora de máquinas “Agroindustria Gallego”, esta brinda bases técnicas de información sobre componentes y las características de los productos; para los parámetros técnicos, se tiene en cuenta una máquina en específico, con el fin de tener claro diferentes aspectos.

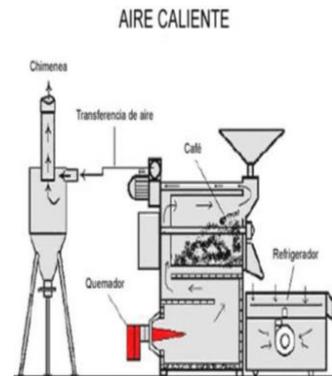
Tabla 4

Tipos de tostadoras

Componente	Descripción	Imagen
Tostadora de Tambor	El método de tostado por convección en un tambor giratorio se destaca por su capacidad para tostar café de manera uniforme y consistente en lotes grandes. Estas tostadoras suelen tener una capacidad mayor que otros tipos, lo que las hace ideales para operaciones comerciales de mayor escala. Además, ofrecen la ventaja de ser ajustables,	

lo que permite controlar tanto la temperatura como el tiempo de tostado según las necesidades específicas. Sin embargo, esta sofisticación conlleva un costo más elevado debido a la complejidad del diseño y la capacidad que ofrecen. Además, su mantenimiento puede requerir una atención regular debido a la sofisticación de su funcionamiento.

Tostadora de Fluidización El método de tostado por aire caliente, donde el aire circula a través de los granos de café, es una técnica ampliamente utilizada en tostadoras modernas. Estas máquinas pueden tener una capacidad que va desde moderada hasta alta, dependiendo de su diseño y tamaño específicos. Una de sus principales ventajas es la capacidad de ajustar la temperatura y la velocidad del aire, lo que permite un control preciso sobre el proceso de tostado. Esto puede resultar en tostados más rápido y uniforme, aunque es importante destacar que obtener resultados óptimos puede requerir ajustes finos y experimentación por parte del tostador. En términos de costos, estas tostadoras pueden variar en precio según su tamaño.



Tostadora de Aire Caliente

El método de tostado por flujo de aire caliente, donde el aire levanta y agita los granos de café, es una técnica efectiva utilizada en muchas tostadoras modernas. Estas máquinas suelen tener una capacidad que varía de moderada a alta, dependiendo de su tamaño y diseño específicos. Una de sus principales ventajas es la capacidad de controlar tanto la temperatura del aire como la velocidad del flujo, lo que permite un control preciso sobre el proceso de tostado. Esto resulta en un tostado uniforme y consistente, con la flexibilidad de ajustar la intensidad del tostado según se desee. En términos de costos, estas tostadoras suelen tener un precio que va desde moderado hasta alto debido a su diseño y funcionalidad avanzada. Es importante tener en cuenta que, debido al uso constante de aire caliente, estas máquinas pueden requerir un mantenimiento regular para limpiar los componentes y garantizar un flujo de aire adecuado, lo que asegura un tostado óptimo y consistente



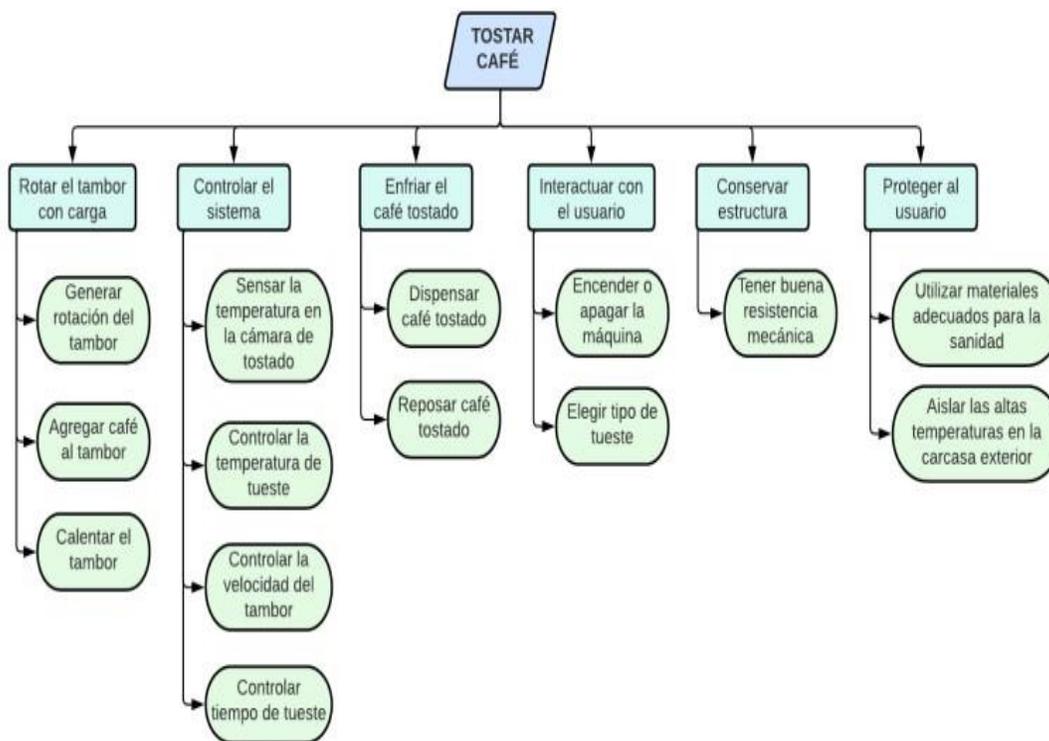
2.1.3 Control del proceso

En las variables mencionadas anteriormente, hemos mencionado el factor del color, el cual es extremadamente importante. De hecho, el color es el resultado de la aplicación de todas estas variables.

En el mercado, existen sistemas de control, más o menos sofisticados, para regular el color final del tueste. Sin embargo, la habilidad y capacidad del Maestro Tostador en este control es fundamental. Al combinar tanto la tecnología como la destreza humana, reducimos las posibilidades de error casi a cero y garantizamos la consistencia de nuestro producto, lo cual es primordial para que nuestros clientes siempre encuentren en nuestro café las mismas características de aroma y sabor. (Benavides, 2016)

Figura 13

Diagrama de arquitectura funcional



Fuente (Baqué, 2018)

2.1.4 Niveles de tueste

El proceso de tueste comienza con el secado de la humedad del grano, que generalmente se encuentra alrededor del 12%. Una vez transcurrido este tiempo, el grano comienza a expandirse y, por lo tanto, se desarrollan las reacciones químicas. Alrededor de los 170°, el café adquiere un

color canela y se produce la primera crepitación o crujido, cuya intensidad varía según el tipo y frescura del café. Además, los azúcares comienzan a caramelizarse, adquiriendo un tono más oscuro, y la piel del grano se desprende (los cafés robusta tienen más piel que los arábica).

A partir de los 190°, el café vuelve a crepitar y se desarrollan completamente sus aromas y gases. La temperatura final, dependiendo del tipo de máquina y del color deseado, puede variar entre 200° y 240° (estos valores se refieren a la temperatura del producto, ya que la temperatura de salida del quemador puede llegar a los 500°).

Una vez finalizado el tueste, el café se enfría para evitar que siga asándose. Después de enfriarse, los granos se someten a una limpieza para eliminar impurezas, tal como se hace antes de tostarlo cuando aún está verde. Durante el proceso de tueste, se produce una transformación significativa en el grano: los azúcares se caramelizan, se crean más de setecientos nuevos compuestos que contribuyen al sabor, y los aminoácidos se degradan, dando lugar a compuestos como el oxazol y la pirazina en diferentes proporciones, los cuales son responsables del aroma del café, entre otras reacciones.

Además, una vez tostado, el café contiene una cantidad considerable de gases, lo que dificulta (aunque no es imposible) su preparación inmediata. Estos gases se liberan rápidamente en las primeras horas y disminuyen gradualmente en un proceso que puede durar hasta 20 días.

En cuanto a las mermas, estas varían según el tipo de café (los robusta merman más que los arábica con igual proceso y color), la humedad del grano, el color final del tueste y la humedad final del producto. Como referencia, podemos mencionar un rango promedio del 12% al 20%.

(Ordoñez et al., 2016). Los niveles de tueste se representan a partir de la Escala de Agtron que se define como un sistema de puntos para clasificar el grado de color de diferentes tipos de tostado

Figura 14

Niveles de tueste



Fuente (Ordoñez, et, al 2016)

Tueste claro: este tipo de tueste se caracteriza por una fuerte acidez, pero un color de taza ligero y suave. Con este proceso la caramelización no afecta en mayor medida y se conserva más el sabor original. Durante este tipo de tostado, los granos alcanzan una temperatura interna de 180-205°C. Una vez alcanzada esta temperatura, los granos se agrietan o explotan y su tamaño aumenta, lo que se conoce como “primer crack”. Otra característica importante es que al tostarlo de esta forma el café retiene casi toda la cafeína y no tiene un aroma muy intenso (PER, 2020).

Este grado de cocción corresponde a una puntuación de 95 a 75 en la escala Agtron (Ordóñez et al., 2016).

Tueste medio: Este café tiene un color marrón medio y más cuerpo que el tueste claro. Al aplicar este tipo de tostado se incrementa el aroma, dulzor y acidez del café. Además, mejora la textura que se siente en la boca. (Sat, 2020). Durante este proceso, los granos alcanzan una temperatura interna que oscila entre 210°C y 220°C, ubicándose así entre “primer crack” y “segundo crack”. (Ordoñez et al., 2016). La cafeína está ligeramente reducida y en la escala Agtron puntúa entre 65 y 55

Tueste oscuro: El tostado oscuro produce granos brillantes debido a los aceites que provienen del grano y estos granos se destacan por su color marrón oscuro, casi negro. Los granos tostados a este nivel mejoran la sensación en boca y aumentan el amargor debido a la caramelización y el nivel de acidez se reduce significativamente. En este nivel, la temperatura interna alcanza los 240°C, por lo que se produce después de la “segunda grieta”. Es importante recordar que no se

suele tostar a temperaturas superiores a 250°C para evitar que se quemen los granos (Sat, 2020). Estos granos han perdido la mayor parte de su sabor original. En la escala Agtron tiene una puntuación entre 45 y 25 (Ordoñez et al., 2016).

Para el desarrollo del proceso semiautomático se propuso, que al finalizar el tueste el tambor gire en sentido contrario para hacer la extracción del café hacia la bandeja de enfriamiento, la cual se enciende sincrónicamente cuando el tambor cambia el sentido de giro.

2.1.5 Curvas de tueste

Las curvas de tueste son las pautas específicas establecidas por cada maestro tostador para transformar el café verde en café tostado. Su definición y objetivo radican en lograr una calidad particular y una consistencia precisa que caracterice a la marca.

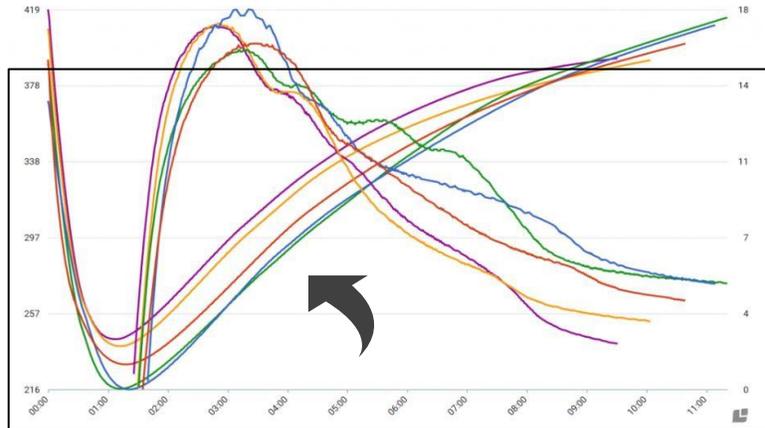
Existen tres sistemas de aplicación de las curvas de tueste:

El primero implica el uso de tres niveles de calor. Se inicia con una fase de calor alto para secar la humedad, seguida de una fase de intensidad media y, por último, una fase de menor intensidad para completar el desarrollo óptimo del producto.

El segundo sistema emplea un calor constante durante todo el proceso, mientras que el tercero se basa en el enfoque contrario al primero.

Entre los tostadores, el método más común es el primero, ya que aprovecha de manera más eficiente la energía y realza los atributos del producto. Generalmente, se controla el color del grano después del tueste. Sin embargo, el color del café molido resultante (siempre con una molienda de granulometría constante) suele ser más confiable, ya que el tono externo del grano puede diferir del interno. Por ejemplo, en un tueste rápido, esta diferencia puede ser significativa. (Ordoñez et al., 2016).

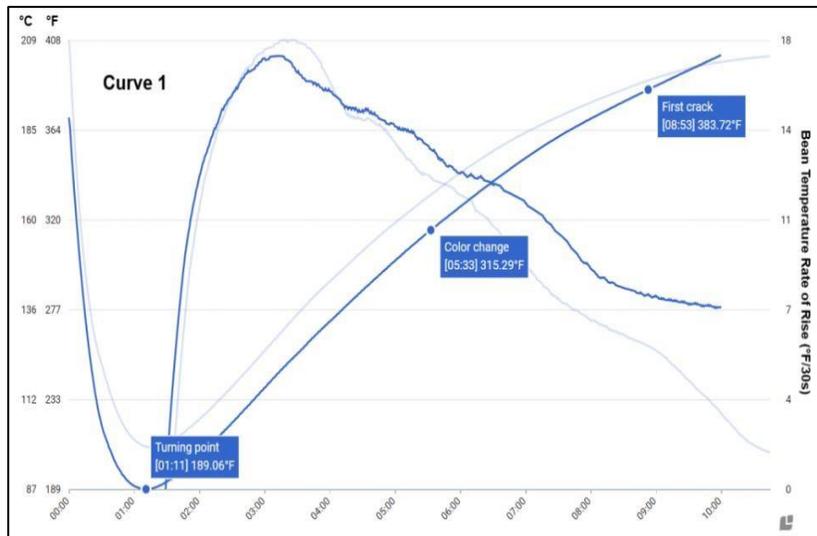
Figura 15
Curvas de tueste



Fuente (extraído de Ordoñez et al., 2016).

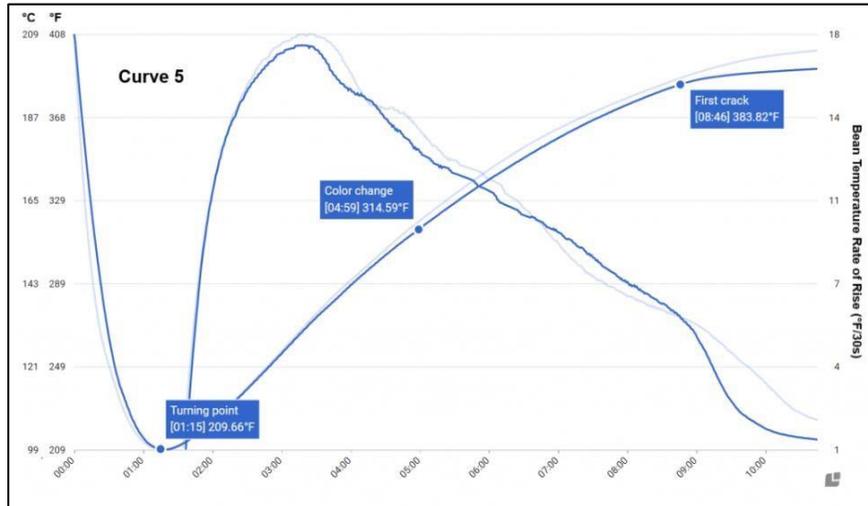
Se analizan las curvas 1 y 5 señaladas anteriormente en la (fig. 16)

Figura 16
Curva base 1



Fuente (Extraído de Ordoñez et al., 2016).

Figura 17
Curva base 2

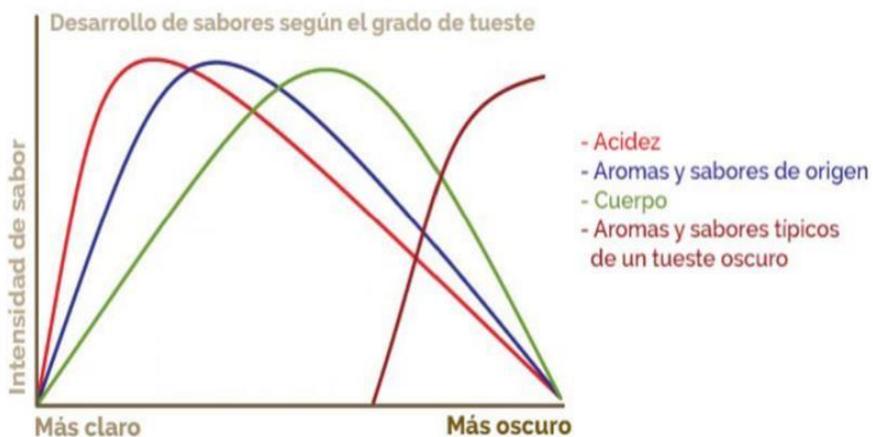


Fuente (Extraído de Ordoñez et al., 2016).

2.1.5.1 Curvas de sabor. Para el tostado, es importante tener en cuenta la densidad del grano del café, ya que aquellos grano con densidades más altas pueden soportar velocidades de transferencia de calor mayores y se pueden tostar con temperaturas iniciales más elevadas. Por el contrario, aquellos granos con densidades menores, se deben tostar con temperaturas medias al inicio y final. (Ordoñez et al, 2016).

Figura 18

Curvas de sabor



Fuente (Ordoñez et, 2016)

2.1.5 Tiempo de tueste

El tiempo de tueste varía entre 1-20 minutos, dependiendo del sistema utilizado. Este tiempo está influenciado por varios factores, entre los cuales se destacan los hábitos de consumo del país, el tipo de máquina utilizada para tostar el café, la variedad de café, si se trata de un café monovarietal o una mezcla, y si el café resultante está destinado a consumo alimentario o a la industria de la hostelería.

El sistema lento, que abarca de 12 a 20 minutos, es altamente valorado por los tostadores artesanos debido a que confiere al grano un color uniforme y una apariencia estéticamente atractiva. Por otro lado, el sistema rápido, que va de 3 a 6 minutos, se utiliza principalmente en la industria. y en grandes producciones. El grano resultante de este proceso tiene un mayor volumen y contiene más grasas, ácidos, extractos y humedad es decir que cambia las propiedades. (Giner, s, f).

2.1.6 Tueste torrefacto

Sin duda, uno de los procesos más polémicos y que genera más discusión es el tueste de torrefacto. Contrariamente a lo que muchos afirman, no se trata de un tueste prohibido y actualmente se utiliza en algunas empresas tostadoras de Portugal y Alemania, así como en varios países de Centro y Sudamérica. Sin embargo, es cierto que este proceso presenta más problemas en términos de contaminación de humos, aunque técnicamente se pueden solucionar.

En cuanto al control del tueste, el método de torrefacto no es tan sofisticado como el del tueste natural. Aunque hoy en día se utiliza la automatización en el tueste de torrefacto de la misma manera que en el tueste natural, la atención al control del proceso no es tan rigurosa.

En el caso del torrefacto, los tiempos de tueste son más largos. Primero se tuesta el café y, una vez que se ha eliminado la humedad y el grano está en desarrollo, se añade el azúcar en frío. Esto implica volver a subir la temperatura de la máquina, lo que conlleva un mayor consumo de energía. El aumento del volumen durante este proceso suele ser de alrededor del 80%. Una vez se ha alcanzado el color rojo-negro brillante deseado, se aplica un sistema de enfriado más potente que en el caso del café natural. Además de enfriar, este sistema separa los granos, ya que en caliente tienden a pegarse. Aunque la cantidad de agua al final del proceso es muy baja e incluso, en ocasiones, se omite por completo, ya que lavaría el azúcar que recubre el grano. Cabe destacar que la cantidad de humos generados durante este proceso es considerablemente mayor.

En cuanto al control del color, en el tueste de torrefacto es más complejo, ya que debemos mantener el color negro del azúcar quemado tanto en el grano como en el café molido.

La merma en el tueste de torrefacto puede variar significativamente según el momento en que se añada el azúcar y el punto final de tueste. Es importante recordar que el máximo permitido es de 15 kg de azúcar por cada 100 kg de café verde.

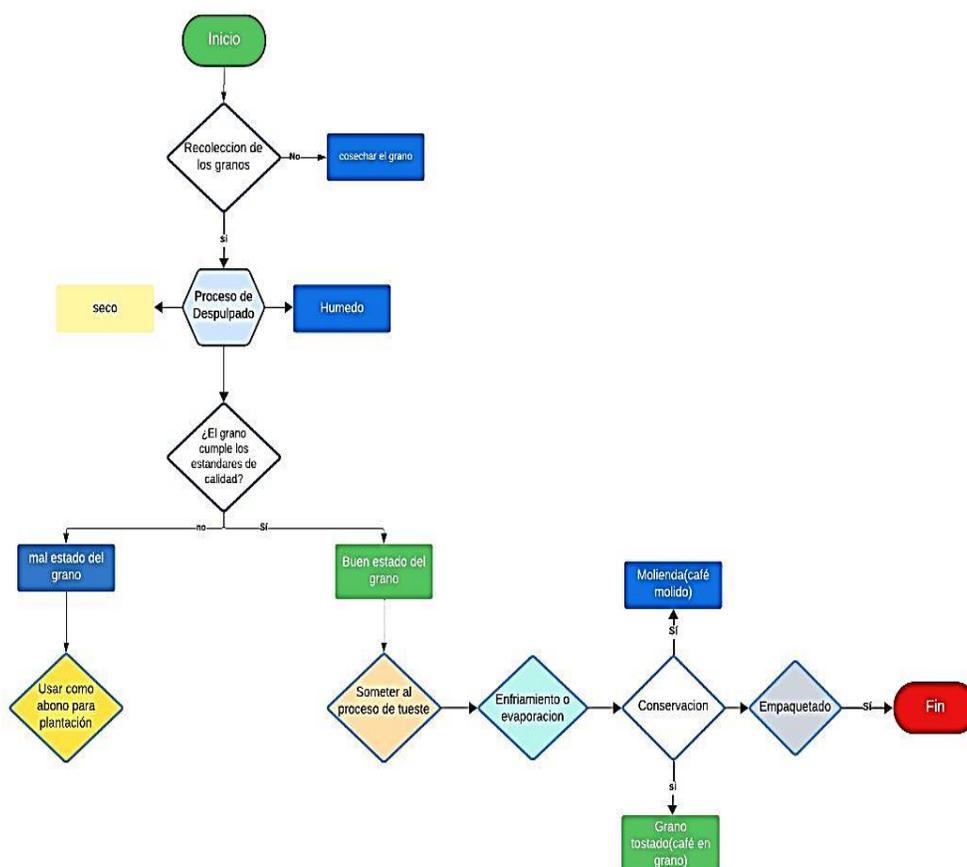
El tueste de torrefacto confiere al café un color más oscuro y un sabor amargo sin matices. Sin embargo, es cierto que, si se utilizan buenos cafés, puede preservar mejor los aromas al haber creado una capa de azúcar alrededor del grano. (Ordoñez et al., 2016).

2.1.7 Diagrama de flujo de producción

Una vez se verifican las máquinas y los procesos empleados en la finca de producción, se desarrolla un flujograma para sintetizar la información, donde se pueda identificar y verificar procesos que se puedan optimizar con el fin de mejorar la producción.

Figura 19

Flujograma producción



2.1.8 Cuadro descriptivo de los componentes existentes

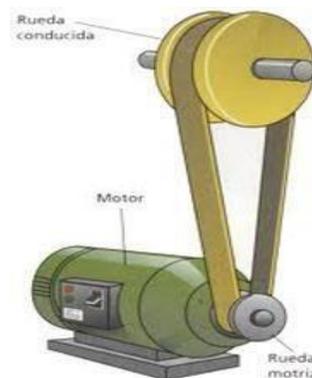
Actualmente hay componentes ya existentes que hacen parte o sirven para la construcción de la máquina que se dan a conocer a continuación en la (Tabla 5).

Tabla 5

Cuadro descriptivo de los componentes existentes

Componente	Descripción	Imagen
Estructura	Es la encargada de soportar todos los componentes mecánicos y electrónicos. Se la realizara con el material A588 el cual cumple con la propiedad de resistencia a la compresión.	
Motor	Es el encargado de realizar el movimiento de las poleas o engranajes dándole la velocidad y la potencia necesaria para ejecutar el proceso, con la capacidad de giro en ambas direcciones	
Tornillo sin fin	El tornillo sin fin es el encargado de transportar con precisión el producto a un determinado lugar. Cumple la finalidad de introducir o extraer un producto.	

Poleas (motriz) y Son las encargadas de transmitir el movimiento esto por medio de una polea conductora que se encuentra posicionada a un extremo del eje del motor, la siguiente está posicionada al extremo del eje de la extrusora siendo esta de tamaño mucho mayor para poder reducir la velocidad y tener mayor fuerza.



Tambor rotatorio Es el componente principal de la tostadora, donde se colocan los granos de café para tostar. El tambor rotatorio cumple la función de girar para asegurar una distribución uniforme del calor.



Resistencias calefactor de Proporcionan el calor necesario para tostar los granos de café en el tambor.



Aspas de enfriamiento Después del proceso de tostado, los granos de café deben enfriarse rápidamente para detener el proceso de tostado y evitar que los granos se quemen afectando sus propiedades.



Finalmente se analizaron las diferentes máquinas y maneras de tueste en la que se decidió optar por la de tueste de tambor de la cual se tomó referencias para el diseño y construcción de este proyecto.

2.2 Análisis del Segundo Objetivo

2.2.1 Diseño mecánico

El objetivo de este prototipo es desarrollar un equipo eficiente y de alta calidad que optimice el proceso de tostado y asegure la máxima conservación de los aromas y sabores del café. Esta tostadora podrá tostar 1 kg en cada operación y contará con tecnología de control de temperatura y tiempo para asegurar un tostado uniforme y consistente. El equipo estará fabricado con materiales duraderos y de fácil cuidado y estará adaptado a las condiciones del entorno rural. Además, esta inversión no sólo mejorará la calidad del producto final, sino que también aumentará la autonomía y rentabilidad de la finca al permitir la comercialización de café de origen.

Para el diseño de la máquina, inicialmente se tiene en cuenta las especificaciones actuales de los equipos, para este caso el de la máquina coffee roaster JD 5000 de la que se obtiene las especificaciones de producción. Así como también los requerimientos de producción de café que tenga la finca.

Tabla 6

Especificaciones actuales de máquinas de producción

Ítem	Valor	Unidades
Capacidad de producción de los equipos actuales	20	Kg/hora
Requerimiento de producción de la tienda.	160	Kg/día
Capacidad de material a aprovechar	80	%
Relación de producción por hora.	20	Kg/hora

Mediante el análisis de funcionamiento de la máquina JD 5000 en la tienda Obraje, situada en Pasto Nariño, sacamos los datos dados en la tabla 6 De esta manera, sacamos los parámetros y cálculos para determinar la producción de este proyecto.

Tabla 7*Producción esperada del prototipo*

Ítem	Valor	Unidades
Capacidad de producción propuesta.	3	Kg/hora
Producción en cada proceso.	1	Kg
Lapso de cada proceso.	15-20	minutos

Para el proceso de diseño de la tolva de alimentación, es necesario determinar un valor medio de densidad de los granos que se van a almacenar en la tolva. Para ello, se deben obtener los valores de densidad de diferentes granos, en este caso se tomará en cuenta el valor promedio de café en kg/m³ dado por (CENICAFE) y posteriormente calculamos su promedio. La fórmula para calcular el promedio de densidades es la siguiente:

Figura 20*Ecuación 1 promedio de densidades*

$$\bar{X}_p = \frac{\rho \text{ insumo } 1 + \rho \text{ insumo } 2 + \rho \text{ insumo } 3 + \rho \text{ insumo } 4}{n}$$

Donde **n** es la cantidad de insumos

$$\bar{X}_p = \frac{687.1+701.8+826.7+621.5}{4} = 709.87 \text{ kg/m}^3$$

Fuente: Montilla-Pérez et al., 2008

Según la propuesta del proyecto, se busca obtener 2Kg/h de café tostado, por lo que se decidió construir una tostadora que por ciclo de tostado se obtenga un 1Kg de café tostado, los cuales requieren de aproximadamente de 15-20 minutos para tostar, por lo tanto, se cumplen los 2Kg/h. Como se mencionó anteriormente, en el proceso de tostado el café puede perder entre un 15 y 20 % de su masa, por lo tanto, se debe adicionar una cantidad de café mayor para obtener la masa

que se tiene como objetivo. Para esto, se tomó como suposición que el café perderá aproximadamente 20 % de su masa, con lo cual se realiza la siguiente regla de 3:

Figura 21

Ecuación 2 cálculo masa del café

Densidad según carga	Café tostado
100 %	1Kg
120 %	x

$$x = \frac{120 \% \cdot 1Kg}{100 \%} = 1,2Kg$$

Deducimos que se deberán ingresar 1.2 Kg de café verde en la tostadora para obtener 1Kg de café tostado.

Volumen de café: Para calcular el volumen del café utilizamos la densidad y la masa encontradas en la ecuación 1 y 2, y remplazamos en la ecuación 3, donde se obtiene el volumen que ocuparía el café a tostar.

Figura 22

Ecuación 3 volúmenes del café

$$V_{cafe} = \frac{m}{\rho} = \frac{1,2Kg}{709,99Kg/m^3} = 1690cm^3$$

Volumen del tambor: Considerando el volumen del café encontrado en la ecuación 3, se calcula el volumen del tambor suponiendo que el café ocupara el 25 % del volumen del tambor es decir la cuarta parte del volumen total.

Figura 23*Ecuación 4 volúmenes del tambor*

Volumen	Porcentaje
1690cm ³	25 %
<i>x</i>	100 %

$$V_{tambor} = \frac{1690cm^3 \cdot 100\%}{25\%} = 6760cm^3$$

Medidas del tambor: El tambor tiene una forma cilíndrica, por lo tanto, sus medidas se calcularon con base al volumen encontrado en la ecuación 4 y fijando un radio arbitrario de $r = 8cm$. Donde despejamos (h) altura, como lo indicamos en la ecuación 5

Figura 24*Ecuación 5 medidas del tambor*

$$V_{cil} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$h = \frac{V_{tambor}}{\pi \cdot r^2}$$

$$h = \frac{6760cm^3}{(8cm)^2 \cdot \pi}$$

$$h = 33,62cm \approx 34cm$$

Posteriormente se realizó el diseño del tambor con las medidas y los parámetros indicados como se muestra en el plano en la figura 24, además se resalta que la parte de diseño fue realizada en SolidWorks y todas las piezas están acotadas en mm respectivamente.

Peso del tambor: En este caso se calcula el peso del tambor y el peso que soportara el tambor, incluyendo el café que se va a tostar. En este caso realizamos una sumatoria de la masa del material * gravedad y la masa del café * gravedad, indicadas en la ecuación 6

Figura 25

Ecuación 6 peso del tambor

$$\begin{aligned}W_{tambor} &= W_{mat} + W_{cafe} \\W_{tambor} &= m \cdot g + m_{cafe} \cdot g \\W_{tambor} &= 1,82 \cdot 9,81 + 1,2 \cdot 9,81 \\W_{tambor} &= 29,63N\end{aligned}$$

Dónde:

W_{mat} = peso del material

$W_{café}$ = peso del café

m = masa g = gravedad

Cálculo del torque: A partir del valor obtenido en la ecuación 6 y el radio del tambor, se halla el valor del torque que se genera mostrado en la ecuación 7.

Figura 26

Ecuación 7 cálculo de torque

$$\begin{aligned}T &= W_{tambor} \cdot r \\T &= 29,63N \cdot 0,08m \\T &= 2,37Nm\end{aligned}$$

Aquí tenemos en cuenta un factor de seguridad de 1.0 donde el torque nos quedaría de la siguiente manera; **T = 3,37 Nm**

Potencia requerida: Por último, se calcula la potencia requerida del motor para rotar el tambor a partir del valor del torque obtenido en la ecuación 7. Se supone que el tambor girara a 40 RPM, sin embargo, este valor podría ser menor.

Figura 27

Ecuación 8 potencia del motor

$$P = T \cdot \omega$$

$$P = 2,37Nm \cdot 40rpm \cdot \frac{2\pi}{60s}$$

$$P = 9,93W$$

Dónde:

T = torque

ω = velocidad angular

Aquí tenemos en cuenta un factor de seguridad de 2.0 donde la potencia (W) nos quedaría de la siguiente manera; **P = 11,93W**

Resistencia eléctrica: Para definir la resistencia eléctrica a utilizar, se debe calcular la potencia necesaria para calentar la cámara de tostión y lograr la temperatura necesaria para tostar el café. Para esto se utilizó la siguiente ecuación.

Figura 28

Ecuación 9 resistencia eléctrica

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$C_p = 0,47KCal/Kg^{\circ}C$$

Y sabiendo que el calor específico del café

Se hace la conversión

$$\text{de } \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \text{ a } \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$C_p = 0.47 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * \frac{4.18\text{Kj}}{1\text{Kcal}} = 1.96 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

Dónde:

C_p = calor específico \dot{m} = flujo másico

ΔT = diferencias de temperaturas ($t_f - t_i$)

Seguidamente para hallar el flujo másico se supone un tiempo de tuestión aproximado a 18 minutos.

Figura 29

Ecuación 10 flujo másico

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{1,2\text{Kg}}{18\text{min}} \cdot \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 0,00111 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Con los valores obtenidos en las ecuaciones 9 y 10 y suponiendo un cambio de temperatura desde temperatura ambiente (21°C) a (220°C), se obtiene la potencia necesaria de la resistencia eléctrica que se debe usar.

Figura 30

Ecuación 11 potencia necesaria de la resistencia

$$q = 0.00111 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1.96 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (t_f - t_i)$$

$$q = 0.00111 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1.96 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (220^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C})$$

$$q = 0.432 \frac{\text{Kj}}{\text{s}} = 432 \text{ W}$$

Para asegurar que la potencia de la resistencia sea suficiente, y teniendo en cuenta que se puede perder parte del calor generado, tomamos un factor de seguridad de 2.0, por lo cual se obtiene una potencia de $q = 630W$. Esta potencia se puede dividir entre varias resistencias o hacer uso de solo una.

Efectuado el desarrollo de los cálculos para cada uno de los elementos anteriores, procedemos a seleccionar el material, cabe destacar que para ello fue necesario el uso de una base de datos online de materiales que es conocida como MatWeb; se aclara que para este tipo de selección se tomó tres piezas importantes en el diseño, Tolva, Estructura, tambor, y tornillo sin fin.

A continuación, se presenta los planos y los materiales recomendados para la fabricación de las piezas, con el fin de escoger principalmente uno que tenga valores adecuados para suplir los requerimientos de las propiedades mecánicas y físicas que se ven afectadas en el entorno, como lo son, módulo de elasticidad, dureza, densidad, y, por otro lado, tenemos en cuenta la viabilidad de su costo.

Seguidamente se realiza una selección del material más adecuado para la fabricación de la tolva

Figura 31

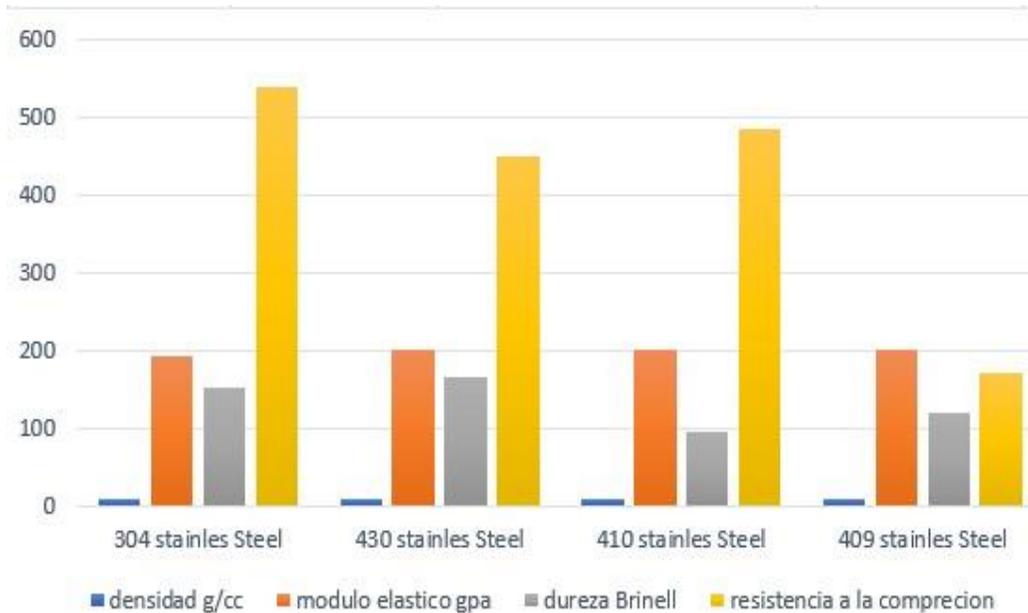
Materiales tolva

Nombre	propiedad			resistencia a la comprecion	precio \$/kg
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
304 stainles Steel	7,6	193	153	540	12000
430 stainles Steel	7,8	200	165	450	15000
410 stainles Steel	7,7	200	95	485	12500
409 stainles Steel	7,8	200	121	172	13000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Cabe mencionar, que se realiza una tabla donde contiene valores de las propiedades mecánicas a tener en cuenta cómo se logra observar en la figura 31 a partir de ello, se genera una gráfica mostrando los valores de cada uno de los materiales, así como también el costo de cada material.

Figura 32 Comparación de aspectos materiales tolvas

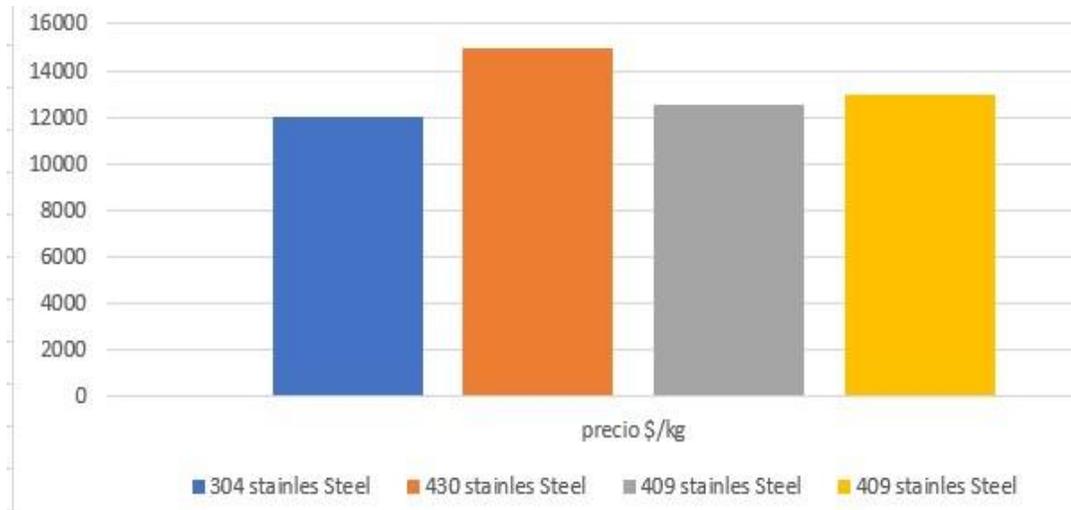


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Para el análisis de cada uno de los materiales se tuvo en cuenta las propiedades que se verán afectadas en el ámbito de diseño, como se observa en la figura 32 se tiene en cuenta los valores de su densidad, el módulo elástico, su dureza y la resistencia a la compresión, según sea conveniente para cada diseño.

Figura 33

Precios de materiales tolvas



Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

De la misma forma como se mencionó anteriormente el costo es un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño y fabricación de la pieza, de tal forma que se genera una gráfica cómo se logra observar en la figura 33 que contiene el precio aproximado de cada uno de los materiales por kg; Para realizar la elección final del material se descarta algunos materiales, teniendo en cuenta sus propiedades y su costo.

Figura 34

Selección material

Nombre	propiedad			resistencia a la compresion	precio \$/kg
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
304 stainles Steel	7,6	193	153	540	12000
430 stainles Steel	7,8	200	165	450	15000
410 stainles Steel	7,7	200	95	485	12500
409 stainles Steel	7,8	200	121	172	13000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Como se aprecia en la figura 34 el material elegido para la construcción del tambor y la bandeja de enfriado es acero inoxidable 304 (AISI 304). Esta elección se hizo principalmente por su buena resistencia a la corrosión al ser una aleación con bajo contenido en cromo, níquel y carbono, lo que lo convierte en uno de los metales más utilizados en la construcción de estructuras y contenedores de alimentos en la industria de procesos

Figura 35

Materiales estructura

Nombre	propiedades			resistencia a la compresion	precio \$/mts
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
Dura-Bar 60-40-18	6,9	169	140	415	10000
ASTM A572 Steel, grade 50	7,8	205	135	344	6000
ASTM A588 HSLA Steel grade A	7,75	205	190	480	4500
Dura-Bar 100-70-03	6,9	171	270	448	59000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

De igual forma como se realizó la selección de material para la tolva, repetimos el mismo proceso en la selección del material a trabajar para la estructura, mencionando que se tiene en cuenta otra propiedad como lo es la resistencia a la compresión.

Figura 36

Comparación de materiales de la estructura

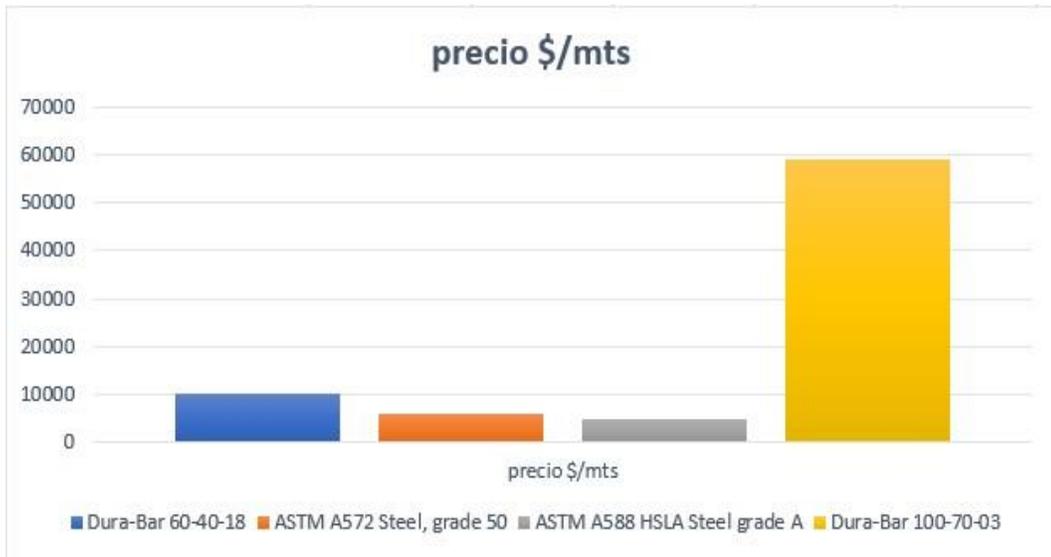


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Se sabe que la estructura será la encargada de soportar todos los componentes electrónicos y mecánicos, por lo tanto, deberá tener propiedades mecánicas que logren suplir los requerimientos, como son la resistencia a la compresión que será la que se verá afectada al poner el peso sobre la misma, estos análisis fueron arrojados por un software. Para construcciones a tamaños reales varían los precios según la ciudad que uno lo adquiera.

Figura 37

Precios de materiales estructura



Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Como se mencionó anteriormente, el costo es un ítem a destacar ya que este se tendrá en cuenta en procesos futuros de construcción en cantidades por esta razón analizamos el más conveniente.

Figura 38

Selección de material

Nombre	propiedades			resistencia a la compresion	precio \$/mts
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
Dura-Bar 60-40-18	6,9	169	140	415	10000
ASTM A572 Steel, grade 50	7,8	205	135	344	6000
ASTM A588 HSLA Steel grade A	7,75	205	190	480	4500
Dura-Bar 100-70-03	6,9	171	270	448	59000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Buscando que el valor a la resistencia a la compresión sea alto, encontramos que el material A588 que contiene propiedades mecánicas a resaltar y además teniendo en cuenta el costo beneficio.

De la misma forma, otros elementos que se tienen en cuenta son el tornillo sin fin y eje de soporte de tambor, que también se propone cinco materiales para su respectivo diseño, como se logra observar en la figura 39.

Figura 39

Materiales Tornillo sin fin y eje

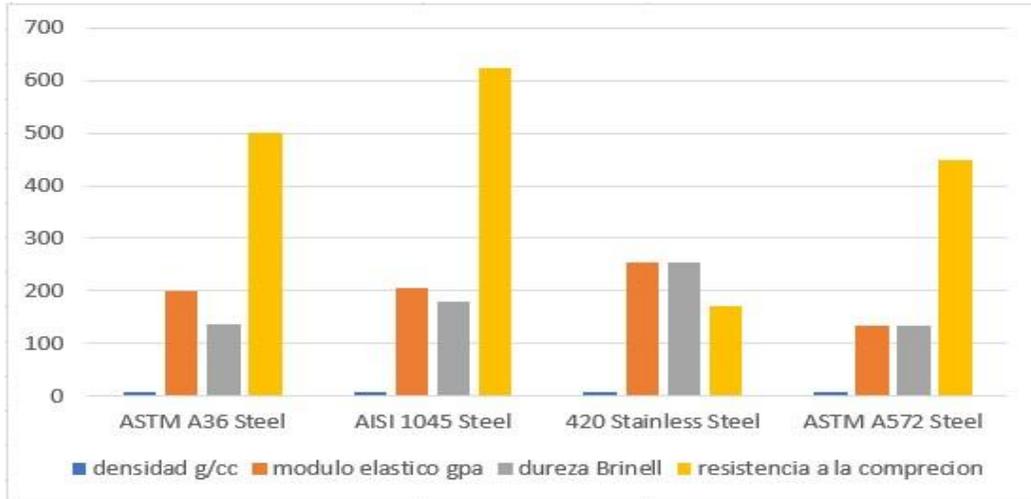
Nombre	propiedad			resistencia a la compresion	precio \$/mts
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
ASTM A36 Steel	7,85	200	137	500	10000
AISI 1045 Steel	7,85	206	179	625	6000
420 Stainless Steel	7,8	253	253	170	4500
ASTM A572 Steel	7,8	135	135	450	59000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Por las fuerzas a las que estará sometido el tornillo sin fin, se tiene en cuenta, las propiedades mecánicas y físicas que se muestran en la figura 40. Por lo tanto, se hace una comparación de cada uno de los materiales propuestos y con ello una selección como tal.

Figura 40

Comparación de aspectos materiales eje y tornillo



Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Como se logró observar en las anteriores figuras, la densidad es una propiedad física a tener en cuenta, ya que esto afectara proporcionalmente el peso de cada elemento y por ende las cargas a la estructura. Otro aspecto relevante es la resistencia a la tensión ya que el tornillo sin fin estará sometido a fuerzas axiales, tensiones entre otras.

Figura 41

Precios de materiales eje y tornillo



Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Se resalta que el precio de cada material en comparación a las anteriores selecciones, tiene un costo mayor, por lo tanto, se hace un análisis más enfocado a costo beneficio obteniendo un material apropiado.

Figura 42

Selección de material tornillo sin fin

Nombre	propiedad			resistencia a la compresion	precio \$/mts
	densidad g/cc	modulo elastico gpa	dureza Brinell		
ASTM A36 Steel	7,85	200	137	500	10000
AISI 1045 Steel	7,85	206	179	625	6000
420 Stainless Steel	7,8	253	253	170	4500
ASTM A572 Steel	7,8	135	135	450	59000

Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

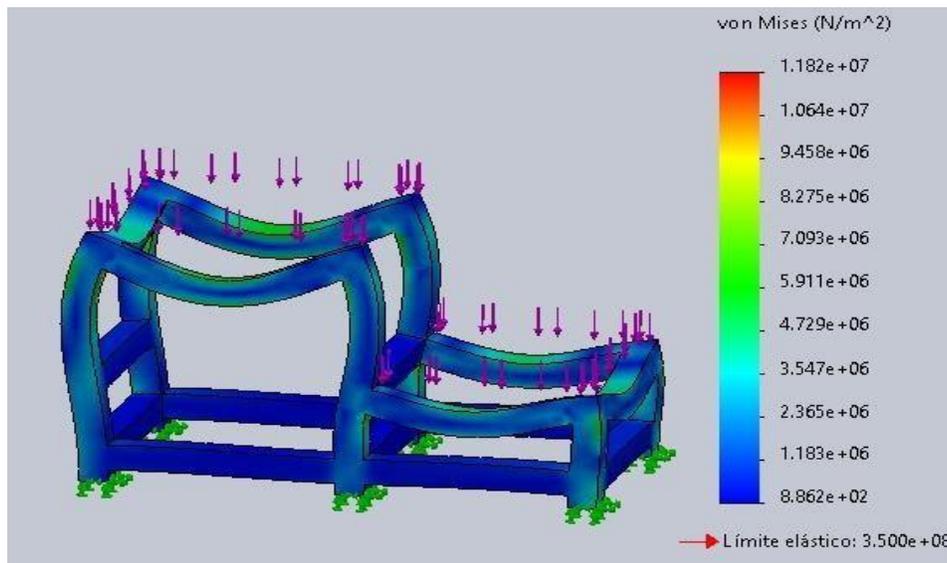
El material seleccionado es el AISI 1045 que cubre los requerimientos para el diseño y fabricación. Como se menciona anteriormente se tuvo muy en cuenta el aspecto costo beneficio del mismo.

Después de seleccionados los materiales a usar, procedemos a la simulación de la estructura, en matweb; ya que es donde estarán soportadas las tolvas con los insumos y los demás componentes se resalta que se define las dimensiones de la estructura basando se en el área que ocupan los elementos usando las medidas que fueron obtenidas mediante ingeniería inversa.

También se resalta que los subcomponentes o piezas internas de la máquina que no fueron mostrados en esta sección serán plasmados en la parte de anexos.

Figura 43

Límite elástico y fijación de la estructura



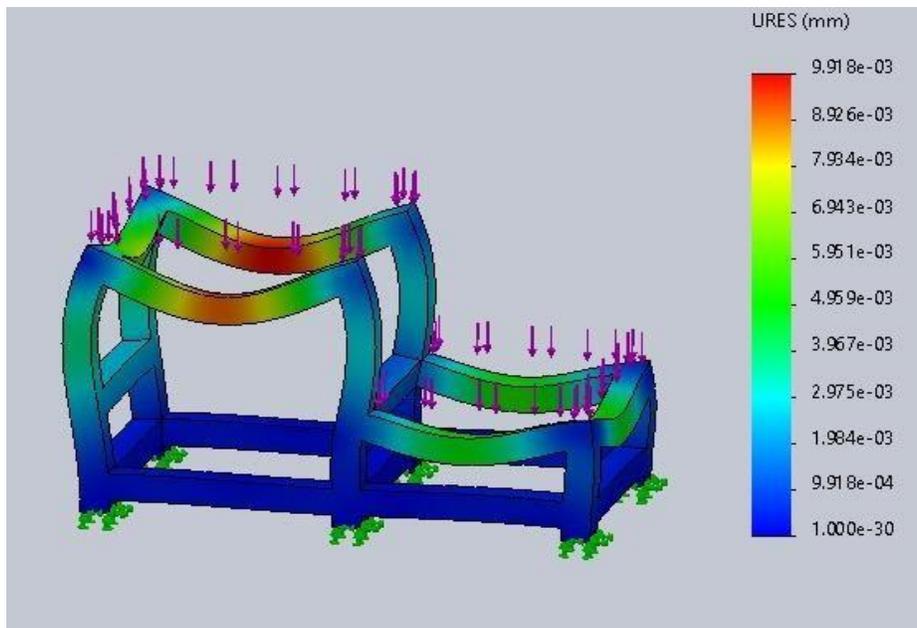
Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Como se observa en la parte inferior tenemos 6 puntos de fijación de tal manera que una vez que se apliquen las cargas o fuerzas no tendrá movimiento.

Por otro lado, podemos visualizar el límite elástico máximo y las partes que son más afectadas al aplicarles cargas exageradas.

Figura 44

Simulación



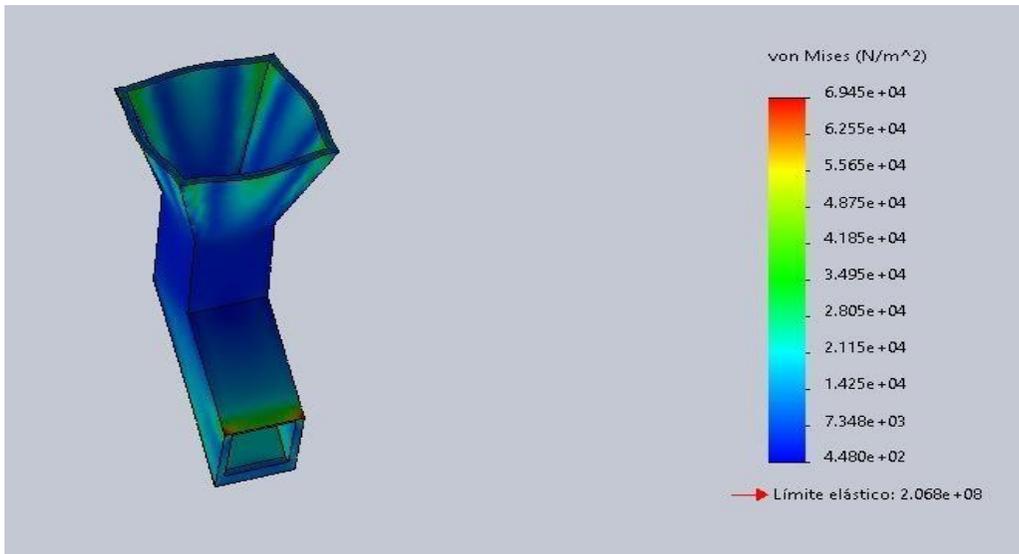
Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

En la figura 44 se observa un mapeo de calor que nos representa las partes más afectadas por las cargas, donde el color rojo es la parte más afectada y el color azul la parte menos afectada.

Resaltamos que las cargas que se aplicaron fueron de 0.450 N/mm.

Figura 45

Límite elástico tolva

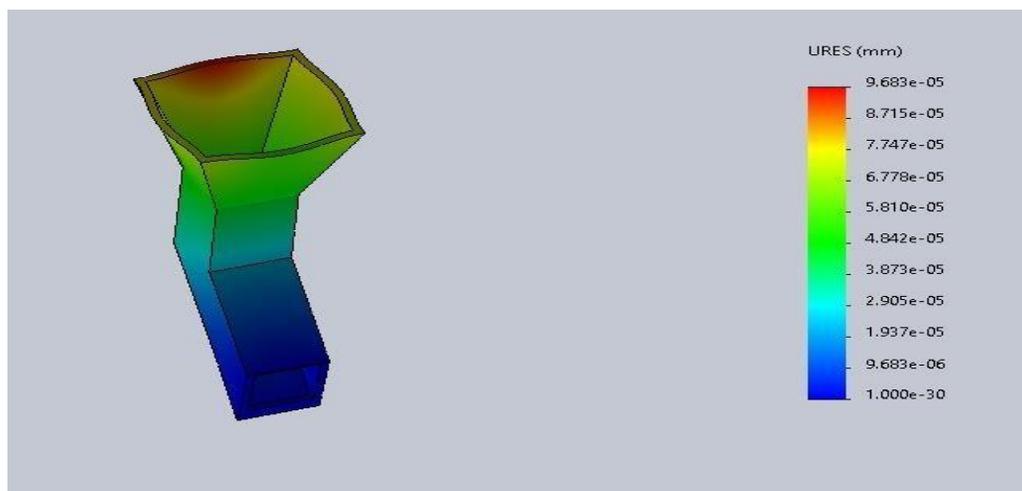


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

De la misma manera aplicamos el mismo proceso para la tolva de alimentación

Figura 46

Simulación tolva

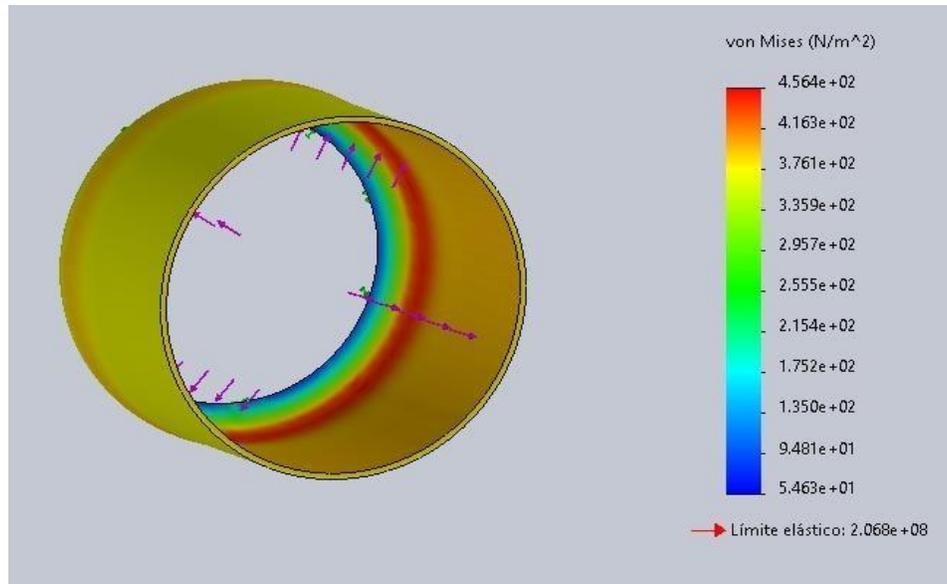


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Como podemos observar en la figura 46 aplicamos un mapeo de calor a la tolva analizando la parte más afectada aplicándole cargas de 0.450 N/mm.

Figura 47

Límite elástico tambor

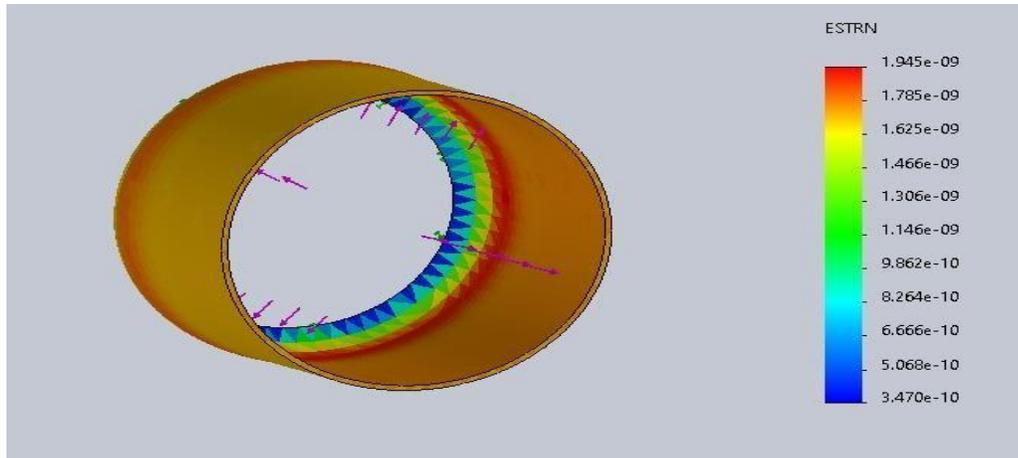


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

Por último, realizamos el mismo procedimiento con el tambor teniendo en cuenta los mismos parámetros aplicados anteriormente.

Figura 48

Simulación tambor

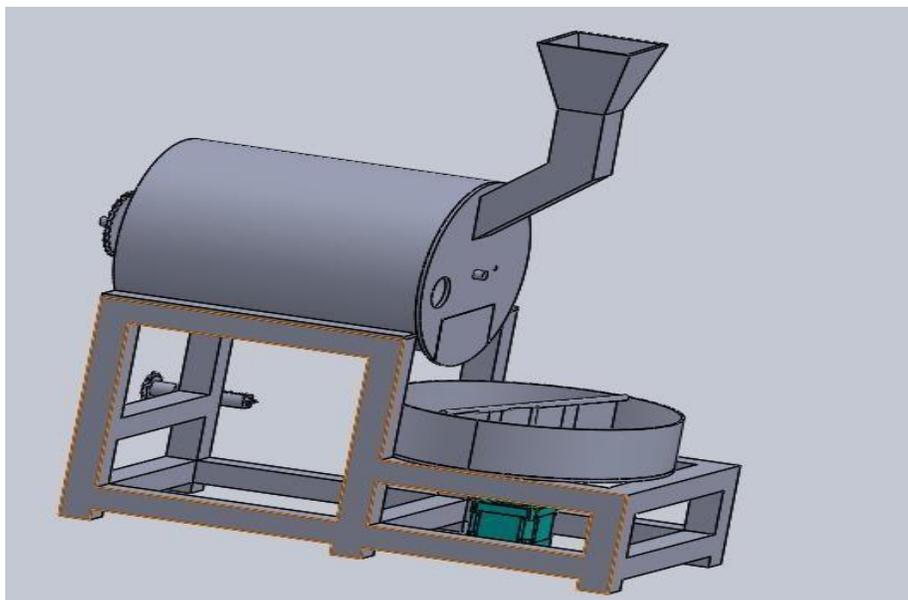


Nota: Figura extraída de MatWeb (2024)

En la figura 48 mostramos el mapeo de calor aplicado al tambor, como también las zonas más afectadas.

Figura 49

Modelado tostador



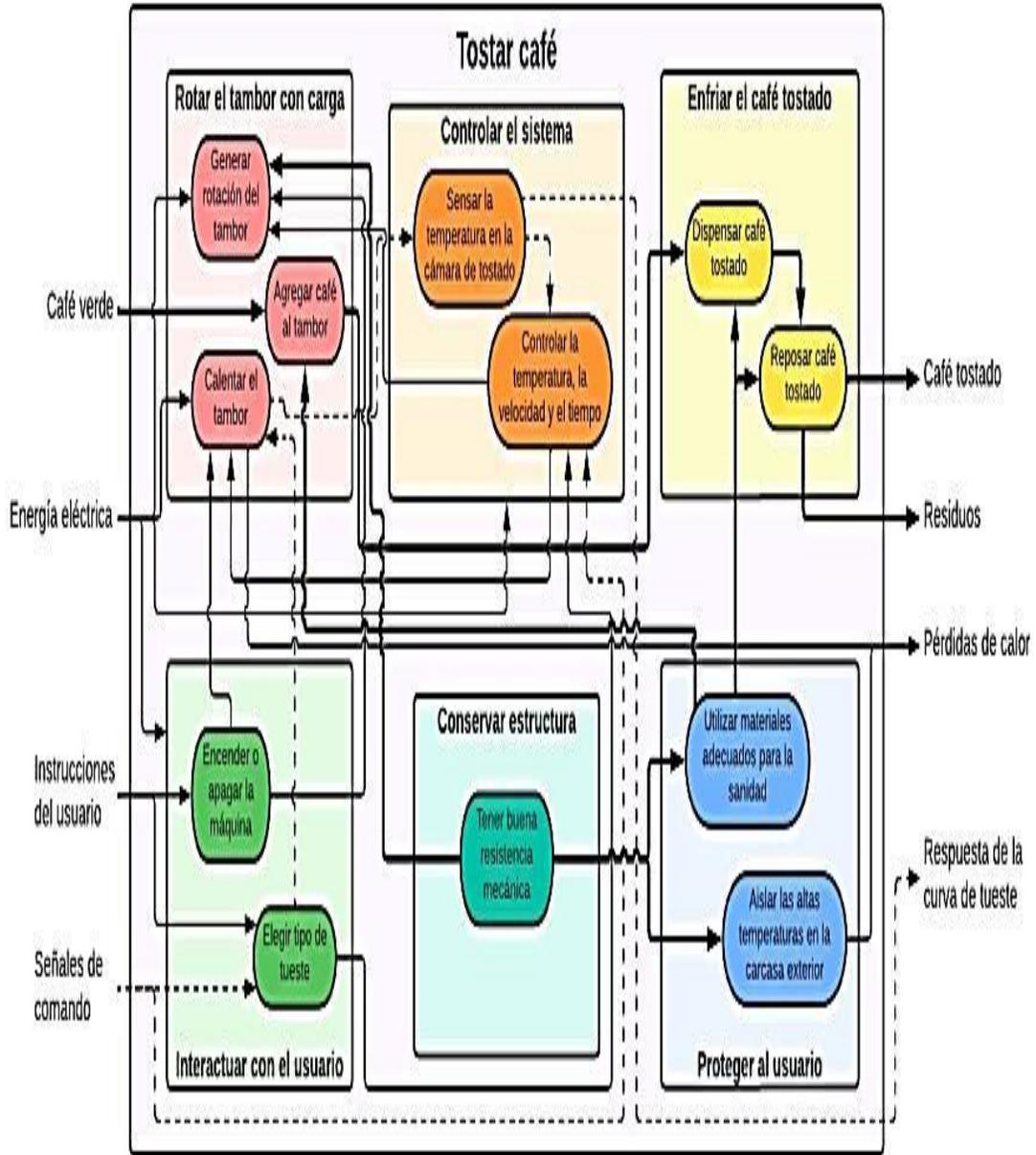
Finalmente, en la figura 49 se muestra los elementos que componen la maquina tostadora, resaltando que algunos sistemas fueron desarrollados por ingeniería inversa donde sacamos información e ideas para aplicarlas en la fabricación de la máquina, esta técnica es de gran utilidad, para ser más creativos y dar un punto de partida para el diseño de otros sistemas.

2.2.2 Diseño electrónico

Para la realización del algoritmo, se procede a identificar los procesos que este realizará, por ello se decide utilizar Arduino Mega; que es una tarjeta de desarrollo open-source construida con un microcontrolador modelo Atmega2560 que posee pines de entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. Esta tarjeta es programada en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. y para ello el algoritmo, además resaltamos que todos los Arduino existentes llevan en mismo lenguaje de programación y el fácil uso, pero en este caso nosotros usamos el Arduino mega porque ya lo teníamos adquirido durante el proceso de formación y ya tenemos conocimiento y manejo de este. Posteriormente indicamos la estructura de funcionamiento mostrada en la figura 50.

Figura 50

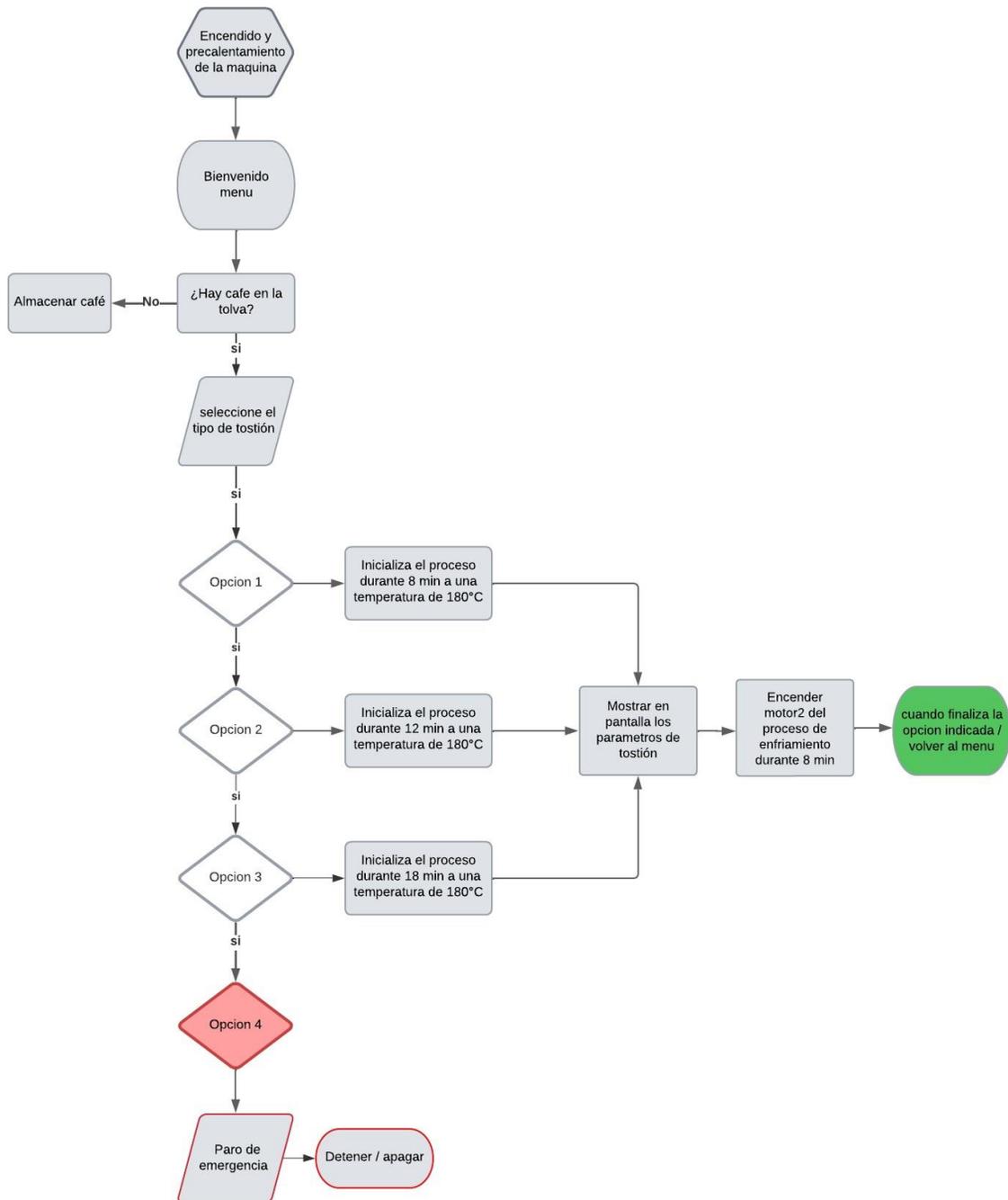
Estructura de funcionamiento.



Fuente. (Jaramillo, 2022)

Figura 51

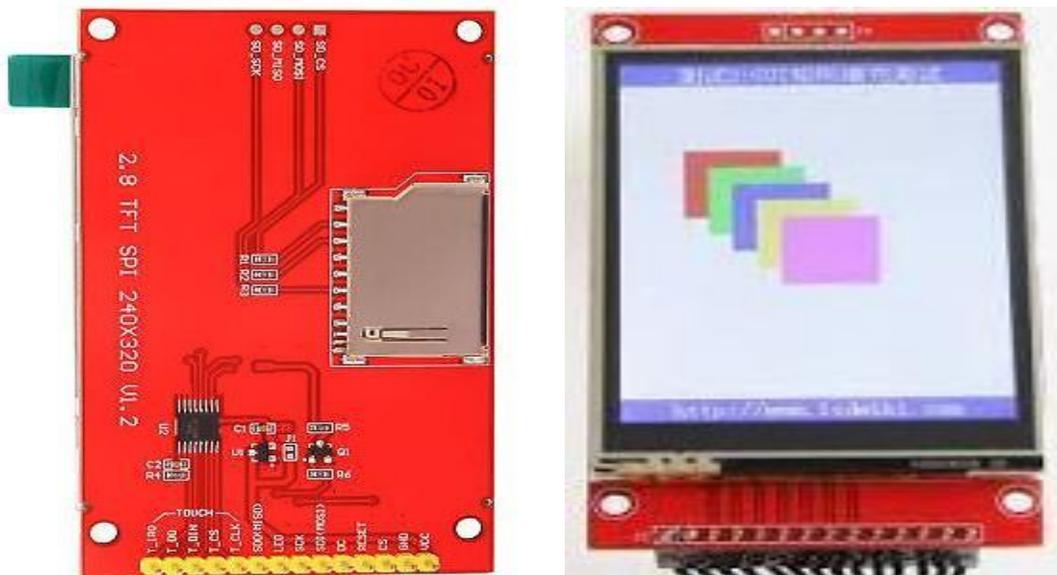
Diagrama de flujo programación



Como primer paso: se realiza la programación del menú, que se indicará por medio de una LCD TFT 2.8" (Thin Film Transistor) una pantalla resistiva táctil, esta se conecta directamente a Arduino, dando la posibilidad de implementar aplicaciones gráficas interactivas, además integra socket para memoria micro SD donde se pueden almacenar imágenes para ser visualizadas en la pantalla, puesto que es esencial para poder hacer un correcto funcionamiento del proyecto, el menú se desplegará con opción de elegir una inicialización del proceso.

Figura 52

TFT LCD 2.8"



Fuente. (Mecatrónica, 2020)

Luego de ello, se procede a realizar la conexión y lectura del L293D; es un arreglo de cuatro medios puentes H, y está diseñado para proveer corriente de control bidireccional para motores a pasos y de DC. Donde podemos controlar motores de 4.5V hasta los 36V con un corriente pico máximo de 1A.

Figura 53

Datasheet L293D



Además, usamos el módulo MAX6675 como convertidor Analógico al digital para la lectura de la temperatura especializado para termopares tipo K. Con este módulo es posible conectar fácilmente un termopar a cualquier microcontrolador a través de una interfaz SPI unidireccional cabe resaltar que los datos obtenidos se encuentran muy aproximados a los teóricos.

Seguidamente se acoplan los relés de estado sólido SPST; dispositivos conmutadores normalmente abiertos sin partes móviles, capaces de realizar millones de ciclos de operaciones. Aplicando una señal de control, un SSR enciende la corriente de carga CA, del mismo modo que los contactos móviles actúan en un contactor mecánico.

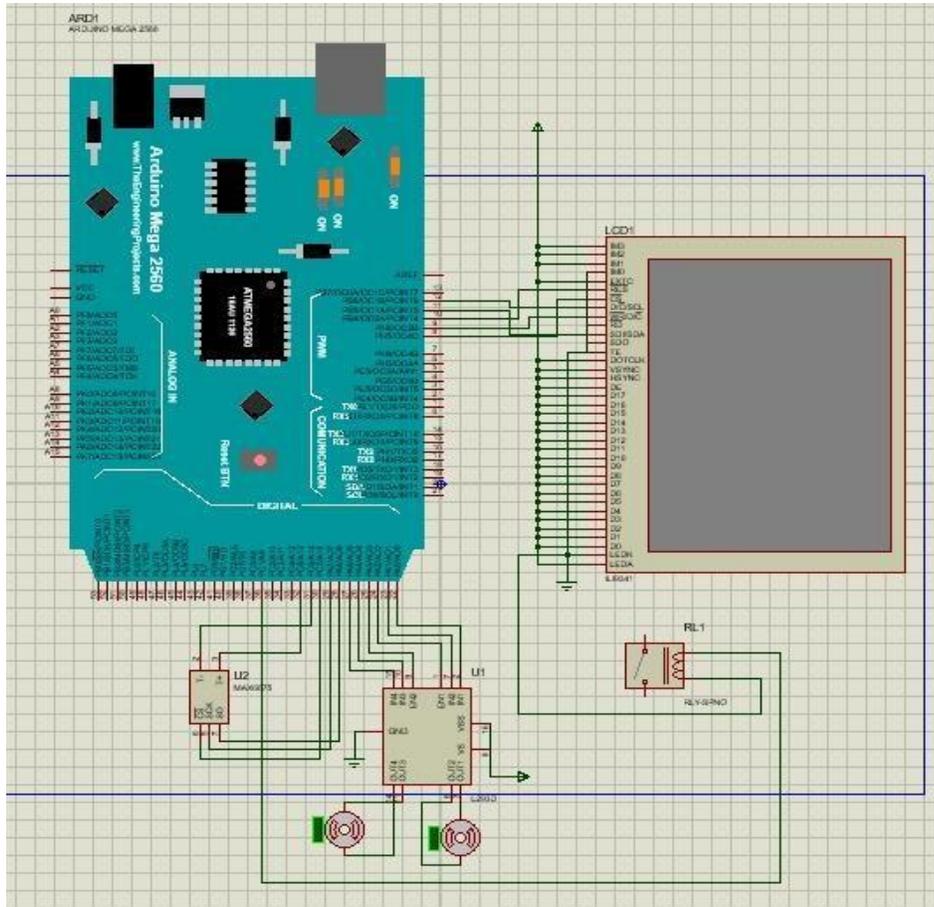
De la misma manera para hacer el control principal, se utiliza la función botones, para enviar una señal, dependiendo la opción que se halla elegido, se indicará con el aumento de la pulsación en la LCD

Una vez realizada la programación principal, se procede a realizar la programación del paro de emergencia, ya que es de suma importancia para la máquina, esto por si ocurre algún error o se debe parar de inmediato el proceso, y se realiza gracias a la función de interrupción externa, que se puede ejecutar en el microcontrolador, cortando el paso de corriente de la fuente de alimentación de este y por ende se finalizara la programación y la ejecución de la máquina.

Así mismo, se procede a realizar las respectivas conexiones en el software Proteus, esto con el fin de poder realizar las respectivas pruebas de simulación electrónica mostrado en la figura 54;

Figura 54

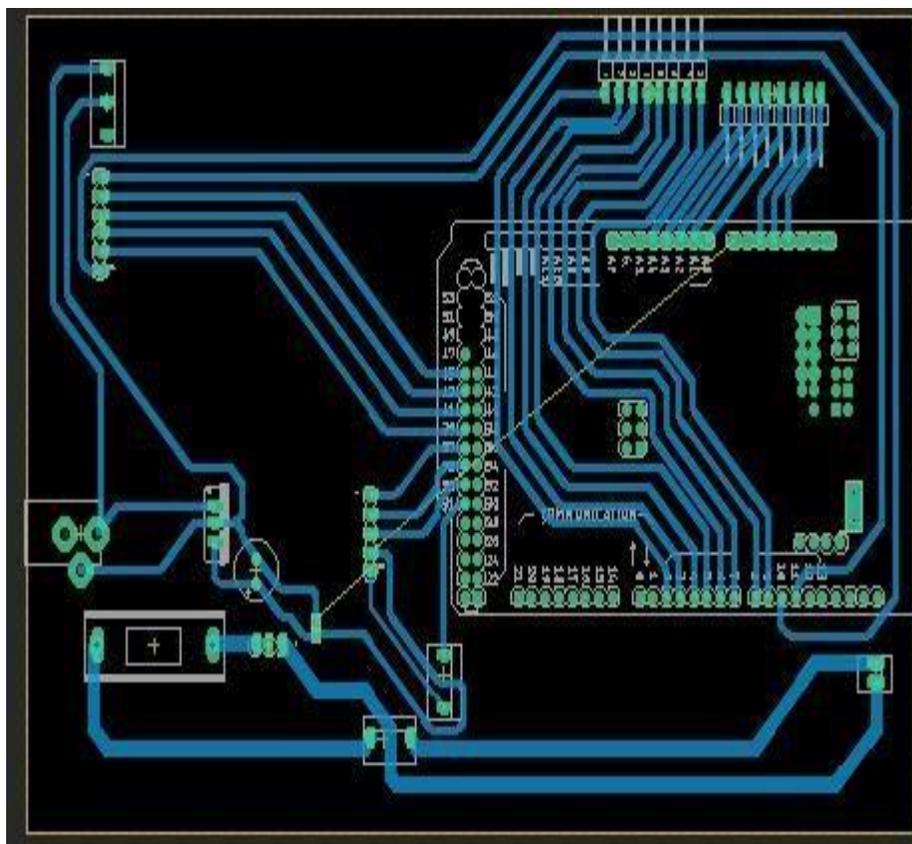
Simulación proteus



Seguidamente procedemos a hacer el diagrama esquemático para la placa respectiva, resaltando el respectivo lugar y pines que ocupara cada componente electrónico.

Figura 56

Diagrama circuito



Seguidamente procedemos a realizar el impreso de la placa pcb como también el montaje de los componentes respectivos, los resultados se muestran en las figuras 57, 58.

Figura 57

Impreso circuito

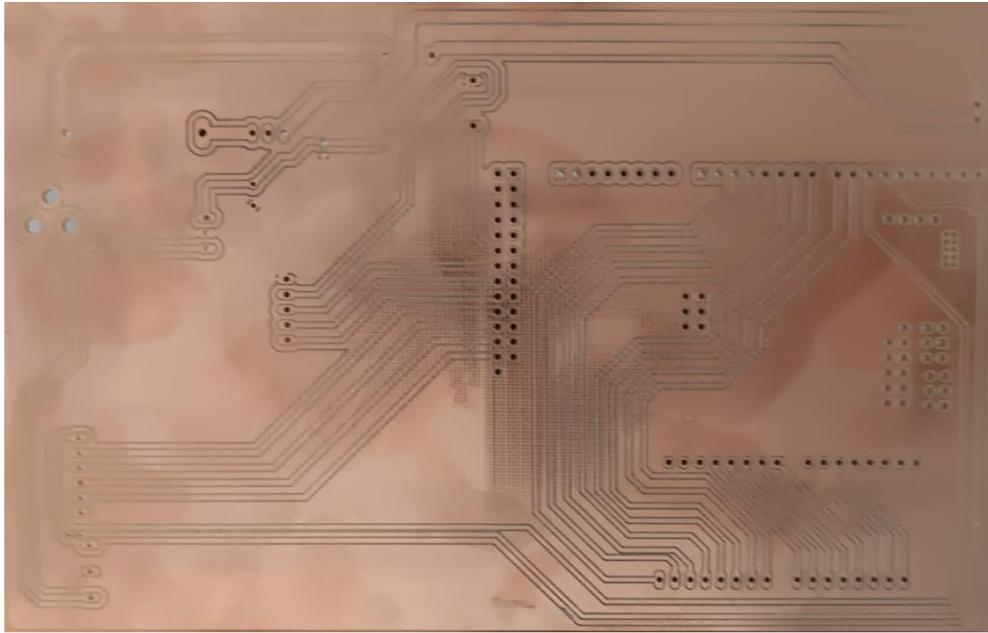


Figura 58

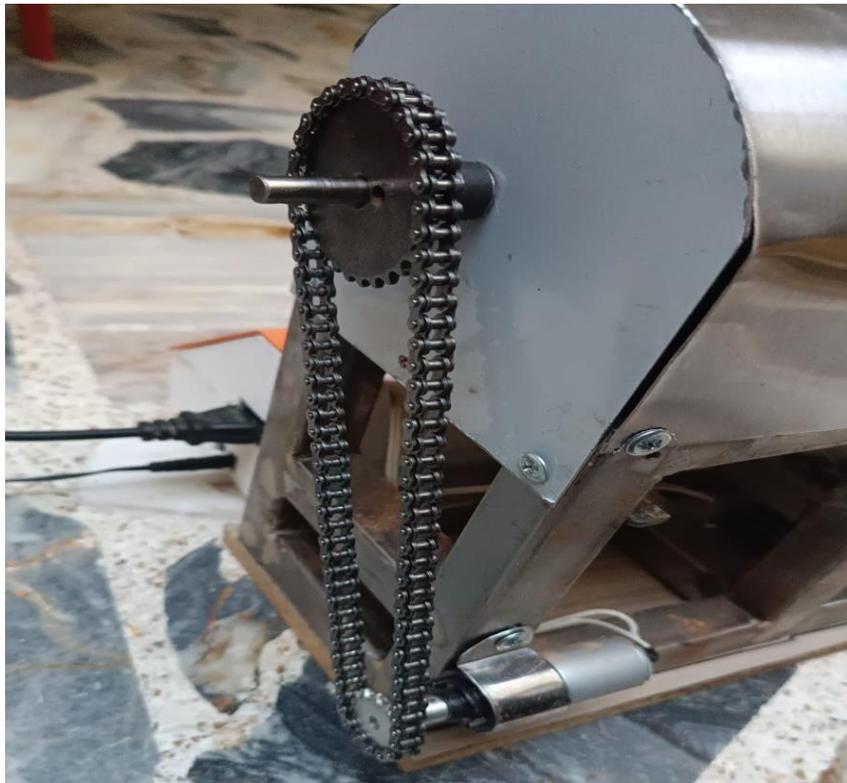
Montaje circuito



Posteriormente en la figura 59, mostramos el ensamble respectivo de los engranajes, cabe mencionar que estos son realizados de acuerdo a lo estipulado; el desarrollo se llevó a cabo en el torno del taller de la sede Alvernia con la ayuda del laboratorista Julián Reina.

Figura 59

Engranajes



Por último, se muestra el acabado final del prototipo, se resalta que la caja de los componentes y circuitos electrónicos fue diseñada en Pla.

Figura 60

Acabado del prototipo



2.3. Análisis del Tercer Objetivo

2.3.1 Pruebas de Tostión

El proceso de validación del objetivo de tostión se llevó a cabo mediante una serie de pruebas sistemáticas. Este análisis se detalla a continuación, incluyendo la creación de una placa de control y la construcción completa de la máquina de tostión, así como los ajustes y mejoras realizados durante las pruebas iniciales.

2.3.1.1 Primera prueba. Evaluación de la Capacidad de Carga

En la primera prueba, se introdujeron 400 gramos de grano de café en el tambor de tueste. Se observó que esta cantidad era excesiva para el prototipo, ya que los granos no se movieron uniformemente. Algunos granos quedaron atrapados en el interior del tambor, lo que causó que se quemaran. Este resultado subraya la importancia de ajustar la capacidad de carga del tambor para asegurar un movimiento homogéneo de los granos, lo cual es crítico para lograr un tueste uniforme.

2.3.1.1.1 Ajuste de la capacidad de carga. Para solucionar este problema, se redujo la cantidad de grano a 200 gramos. Este ajuste resultó en un tueste más satisfactorio. Sin embargo, se observó que los tiempos y temperaturas no estaban bien calibrados, resultando en un tueste alto, como se puede observar en la Figura 61. Estas pruebas se realizaron con un colorímetro en los laboratorios de la sede Alvernia, proporcionando datos cuantitativos precisos sobre el color del grano después del tueste.

Figura 61

Pruebas Colorimétricas 1



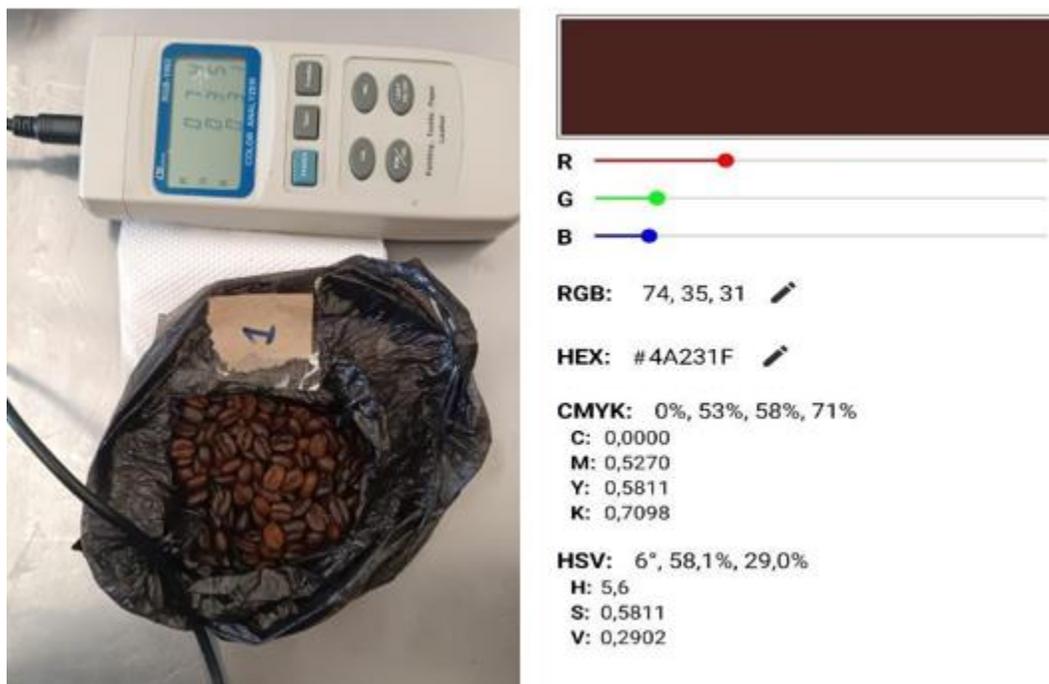
Se utilizó una aplicación que permite leer el código hexadecimal del código de colores RGB, lo cual arrojó un color marrón muy similar al obtenido en el proceso de tuestión. Este método permitió una evaluación más precisa del color del grano de café tras el tueste.

2.3.1.2 Segunda prueba. Calibración de Tiempos y Temperaturas

Continuando con el análisis, se realizó una segunda prueba en la cual se ajustaron los tiempos y temperaturas. En esta etapa, se utilizó una muestra de 200 gramos de grano de café, y se llevaron a cabo ajustes incrementales para identificar las condiciones óptimas de tuestión. En la Figura 62, se puede observar el resultado con un nivel de tueste medio.

Figura 62

Pruebas Colorimétricas 2



Como se observa en la imagen del código RGB, el color obtenido es el más acertado en cuanto a la medición hecha con el colorímetro. Esto indica que hay una variación del color del grano de café al realizar el proceso de tueste medio. Este tipo de tueste es particularmente apreciado por su

equilibrio entre acidez y cuerpo, siendo ideal para una amplia gama de métodos de preparación de café.

2.3.1.3 Tercera prueba. Evaluación del Tueste Claro

En la tercera prueba, se evaluó el nivel de tueste claro. Este tipo de tueste desarrolla propiedades como la acidez y la caramelización de los azúcares naturales del café. Es muy utilizado para la elaboración de cafés especiales y también en la producción de licores y bebidas. En la Figura 63 se muestra el resultado de esta prueba.

Figura 63

Pruebas Colorimétricas 3



La imagen donde aparece la muestra 3 evidencia el nivel de tueste claro. En la muestra 4 se observa el color del café en verde, que sirve como referencia inicial para hacer el análisis y la comparación de tonalidades de color al aplicar los distintos niveles de tueste. Estas imágenes demuestran que el color del café después de ser tostado varía en su intensidad de acuerdo a cada proceso, siempre dentro de la gama de marrón.

2.3.2 Comparación de métodos: Sensorial vs. Colorimétrico

Para alcanzar el objetivo de tostión y verificación, se realizaron pruebas tanto con el método sensorial tradicional como con un colorímetro. En la Tabla 8 se puede observar la comparación entre el método sensorial (visual) y los resultados del colorímetro en laboratorio. Esta comparación es crucial para demostrar que los procesos de tostión lograron los tres grados más relevantes en la industria del café.

Tabla 8

Comparación de métodos

Muestra de café	Método sensorial (visual)	Resultado del colorímetro (laboratorio)
Muestra 1	Marrón oscuro	R;74 G;35 B;31
Muestra 2	Negro	R;77 G;45 B;45
Muestra 3	Marrón medio	R;55 G;26 B;21
Muestra 4	Marrón claro	R;215 G;112 B;101

2.3.2.1 Análisis detallado del método sensorial visual Uno de los métodos más usados y comunes para la comprobación de sabores y características del grano es el de la cata, en el cual un experto certificado realiza este proceso. Este método se basa en la percepción humana y abarca seis pasos, descritos a continuación:

2.3.2.1.1. Selección y tostado. Se seleccionan muestras representativas de café y se tuestan de manera uniforme para garantizar consistencia.

2.3.2.1.2. Molienda. Las muestras tostadas se muelen de manera uniforme para que el tamaño de las partículas no influya en la extracción.

2.3.2.1.3. Olor seco. Se evalúa el aroma del café molido antes de la infusión.

2.3.2.1.4. Infusión. Se añade agua caliente a una proporción específica de café molido y se deja reposar.

2.3.2.1.5. Romper la costra y oler. Se rompe la costra que se forma en la superficie de la infusión para liberar los aromas, los cuales son evaluados nuevamente.

2.3.2.1.6. Cata. Una vez enfriada la infusión, se procede a sorber el café de manera ruidosa para evaluar su sabor, acidez, cuerpo, balance y cualquier defecto presente.

Este método puede identificar una amplia gama de atributos sensoriales del café, como aroma, sabor, cuerpo, acidez y balance. Sin embargo, es subjetivo y puede llevar a variaciones en los resultados debido a la diferente percepción individual de los catadores.

2.3.3 Uso del Colorímetro para Verificación

El uso de un colorímetro proporciona una medición objetiva del color del grano de café tostado. Este instrumento mide la luz reflejada por el grano y la convierte en datos numéricos que representan el color en el espacio RGB. Este método complementa el análisis sensorial, proporcionando datos cuantitativos que pueden ser utilizados para ajustar y calibrar el proceso de tostión de manera precisa.

3 Conclusiones

En el presente trabajo se construyó una máquina tostadora de café semiautomática a escala, con el fin de ser implementada en el departamento de Nariño, municipio de Mallama finca “El Rosal”. El proceso de desarrollo del diseño se hizo con base a la metodología de Dieter (Dieter and Schmidt, 2009), tostadora de tambor basados en la máquina JD 5000 el cual fue de gran utilidad para el reconocimiento de los componentes y funciones que debía cumplir el sistema, lo que conllevó a obtener resultados útiles para el proceso de tostado.

A partir de cálculos realizados, se hallaron las dimensiones del tambor, el torque y velocidad que debía tener el motor para generar el movimiento adecuado del sistema como también la potencia de la resistencia eléctrica que se necesitaba para alcanzar la temperatura dentro de la estructura.

En este proyecto se había planteado el uso de energías renovables para el funcionamiento del sistema como paneles solares, sin embargo, se encontró la limitación de su implementación debido a que el sistema del panel solar es un sistema de corriente directa y el sistema de la resistencia, donde se tenía planeado implementar dicho panel, es de corriente alterna, por lo tanto, se debía hacer la construcción de un sistema híbrido, el cual se salía de la experticia del trabajo

Durante el proceso de construcción se evidenció que es una máquina de fácil ensamble e implementación de componentes, fácil de transportar y usar. Además, con un precio de menor inversión a las que se encuentran de manera comercial.

Así como también se concluye que para maquinas en tamaños reales es ideal sensor la temperatura con el sensor “PT100” Debido a su alta precisión y estabilidad a lo largo del tiempo, esto se verificó en diferentes bases de datos; para la máquina a escala se usó el módulo MAX6675 con el fin de facilitar la conexión a una interfaz con cualquier microcontrolador simplificando componentes electrónicos.

Para concluir se determinó que el uso de microcontroladores de Arduino no es el más adecuado para realizar estas máquinas las cuales requieren un procesamiento de acciones mucho más avanzadas. Para mejorar esto se identificó que microcontroladores como PLC, PIC y ESP32 permiten realizar las acciones necesarias para llevar a cabo estos procesos de una mejor manera.

Por último, se espera que con el desarrollo de esta máquina se pueda brindar la oportunidad a fincas caficultoras y campesinos (pequeños productores), para que puedan tecnificar los procesos tradicionales, y puedan realizar un proceso completo de producción de su cultivo y así les permita generar un valor agregado al producto, generando un desarrollo integral.

4. Recomendaciones

Se recomienda hacer precalentamiento a la máquina antes de usarla para no variar las características del grano, ni efectuar un mal proceso, esto ayuda a garantizar la textura y la calidad, además es recomendable implementar un testeador en el cilindro de tostado para verificar el avance de la tostión y desarrollo del grano.

Para incrementar la eficiencia del sistema se recomienda realizar un trabajo de investigación que tenga como objetivo utilizar la energía térmica no aprovechada por el calefactor, que serviría para adaptarla a un proceso de secado del grano, utilizando métodos de control alternativos.

Referencias bibliográficas

Abarca Mora Royner, (2017). “*Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional*”. Universidad de Costa Rica facultad de ingeniería escuela de ingeniería de biosistemas.
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/75352/2017%20Estudio%20proceso%20torrefacci%c3%b3n%20cafe%20tostador%20convencional%20abarca%20teia%20ucr.pdf?sequence=1&isallowed=y>

Acuña, N., Retamoso, A., & Osorio, F. (2020). *Diseño y construcción de un prototipo automatizado para la torrefacción de café*. Fundación Universitaria de San Gil "UNISANGIL". <https://core.ac.uk/download/pdf/267846078.pdf>

Álvarez Restrepo, Carlos Andrés. (2014) *Propuesta de automatización del proceso de tostación de café en lecho fluidizado*. Universidad Tecnológica de Pereira.
<https://repositorio.utp.edu.co/items/5886bb5e-1c43-4663-98d8-6e8d28a7c5ef>

Arellano Rosero Carolina, Narváz de la Rosa Gustavo Adolfo (s, f). Innovación social a partir de la generación de valor en cafés de alta calidad en el departamento de Nariño

Azlee, Z. (2003). Learning to brew the perfect cup of coffee. *New straits times- management times*.

Banco Mundial LMC Internacional. (2002). *Estudio CFC/OIC sobre las políticas Comerciales y sistemas de Comercialización de nueve países productores de café*.

Barrantes Montoya, S. I. (2019). *Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (Coffea arabica)*. Universidad de Costa Rica. <http://ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2022/04/TFG-SergioBarrantes.pdf>

Bastidas Guevara, Cristhian Javier y Ibarra Rosero, Rubén Camilo (2012) *Estudio de factibilidad para el montaje de una planta productora de café (Coffea arabica) tostado y molido en el municipio de Samaniego -Nariño*. Informe final de Trabajo de Grado. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.

Campos, J., Orozco, J., & Zeledón, R. (2019). *Estudio de pre factibilidad de la línea de obtención de café con proceso melado en la central de cooperativa PRODECOOP R.L.* Universidad Nacional de Ingeniería. <https://core.ac.uk/download/pdf/336876745.pdf>

Carbone. (s.f.). *Ficha técnica del acero inoxidable*.

Carreño Cruz, E. A., & Gomez Pingo, H. O. (2020). *Análisis de los mecanismos de transferencia de calor y masa en el proceso de deshidratación mediante el método de Descompresión Instantánea Controlada (DIC)*. Universidad de Piura. <https://hdl.handle.net/11042/4841>

Chaves Ardila, L. G. (2004). *Diseño de un modelo organizacional orientado a la diversificación y competitividad del negocio del café tostado y molido*. Universidad de Los Andes.

Díaz, Félix O.; Ormaza, Angela M. Y Rojano, Benjamín A.. *Efecto de la Tostión del Café (Coffea arabica L. var. Castillo) sobre el Perfil de Taza, Contenido de Compuestos Antioxidantes y la Actividad Antioxidante*. *Inf. tecnol.* [online]. 2018, vol.29, n.4, pp.31-42. ISSN 0718-0764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400031>.

Duque Orrego, H. (2001). *Análisis económico de doce prácticas para mejorar el desempeño de las fincas cafetera*. FNC. Cenicafé.

F. O. Licht's International Coffee Yearbook. (1999). Ratzeburg, Germany.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2005). *Memorias del Curso Organice su propia tienda de café*. Federacafé. Departamento de Mercado Interno. División de Comercialización.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). *Capítulo 4: El café y su legislación*. <https://federaciondecafeteros.org/static/files/6Capitulo4.pdf>

Giner, J. (s. f.). *El tueste de café*.

Gonzales Fernández, J. A., Guerrero Bardales, J. E., Holguín Jiménez, A. I., & Machacuay Vera, F. J. (2020). *Análisis de la transferencia de calor y masa durante el secado de productos alimenticios utilizando microondas*. Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4866>

Gordón Casco, A. S. (2019). *Diseño y construcción de un prototipo de una máquina procesadora de café molido que dispensa bolsas para infusión directa en diferentes grados de concentración*. Universidad San Francisco de Quito. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8357>

Heredia Tarifeño, I. (2020). *Diseño de un modelo de producción y operaciones para el mejoramiento del área de operaciones industriales de cafés especiales en la empresa Revinsa S.A.C., Lima periodo 2020 – 2021*. Universidad Inca Garcilaso de la Vega. <http://repositorio.uigv.edu.pe/handle/20.500.11818/5890>

Hurtado Ramírez, Edison Bladimir, Ortiz Arcos, Angel Danilo, (2020), *Diseño e implementación de una tostadora automática para el mejoramiento de la producción de cereales tostados en la microempresa Molinos San Luis*. Universidad Técnica de Cotopaxi, <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6783>

Informe del Gerente General de la Federación Nacional de Cafeteros al LXI Congreso Cafetero. (2001, diciembre 3-5). Congreso Nacional de Cafeteros.

López Calvo, K. M., Valderrama Raigoza, A., & Triana Chau, M. C. (2020). *Plan de negocios para la fabricación y exportación de Harina de Café*. Universitaria Esumer. <http://repositorio.esumer.edu.co/jspui/handle/esumer/2575>

Madrid, L. A., Abarca Alpizar, Y., Porras Zúñiga, M. C., & Vargas, G. (2019). *Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café*. Tecnología en Marcha, 32(8), 20-27. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7446679>

Medina Torres Andrés Camilo, Arias Oscar Javier. (2020) *Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”*, en el municipio La Plata, Huila.

Montilla-Pérez, J., Arcila-Pulgarín, J., Aristizábal-Loaiza, M., Montoya-Restrepo, E. C., Puerta-Quintero, G. I., Oliveros-Tascón, C. E., & Gómez, G. C. (2008). *Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio*.

Mundial, M. (s.f.). *Acero inoxidable aisi 304 ficha técnica, propiedades, densidad, dureza*.

Ordoñez, M. M., Luzón, M. A. C., & Engler, F. (2016). *Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café*.

Pabón, M. A. (2020). *Planta transformación del café*. Universidad Católica de Pereira. <https://repositorio.ucp.edu.co/handle/10785/6115>

Posada, S. G. (2019). *La economía del café: ¿quién se está quedando el dinero?*

Puerta Quintero, G. I., & Echeverri Giraldo, L. F. (2019). *Relaciones entre las concentraciones de compuestos químicos del café y las temperaturas de torrefacción*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/4217>

Rincón Sotelo, Lina María, Cano Pineda, Liliana María, (2010). Desarrollo de un prototipo de laboratorio para el control de calidad de la variable grado de tuestión del café tostado molido, empleando visión artificial. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7366>

Quiroz, A. (2021). *Coeficientes de transferencia de calor y masa para un transformador térmico por absorción experimental*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1546>

Ramírez Durán, R. E. (2018). *Propuesta para implementar un sistema moderno y eficiente en los procesos de tostado, molido y empaçado de café como estrategia tecnológica integral en la empresa Buencafé, del municipio de Tame, Arauca*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57711>

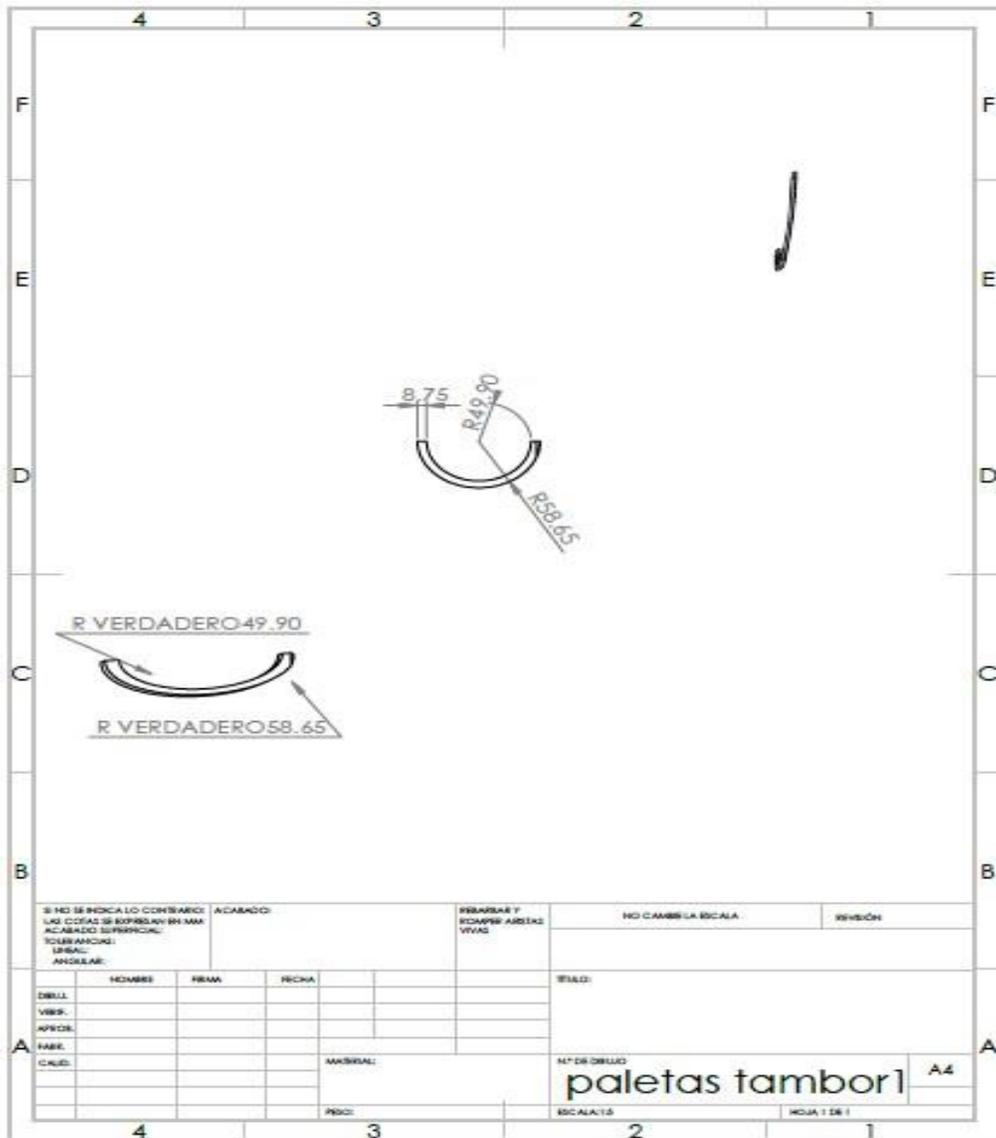
Rengifo, C. A. D., & Caicedo, D. A. M. (2020). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina tostadora de café portable con capacidad de 10 kg para los pequeños caficultores en el municipio de los Andes, Sotomayor*.

Reyes Mayen Rodolfo, (2003). *Diseño de Planta Tostadora de Café, Universidad de San Carlos de Guatemala*. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1156_IN.pdf

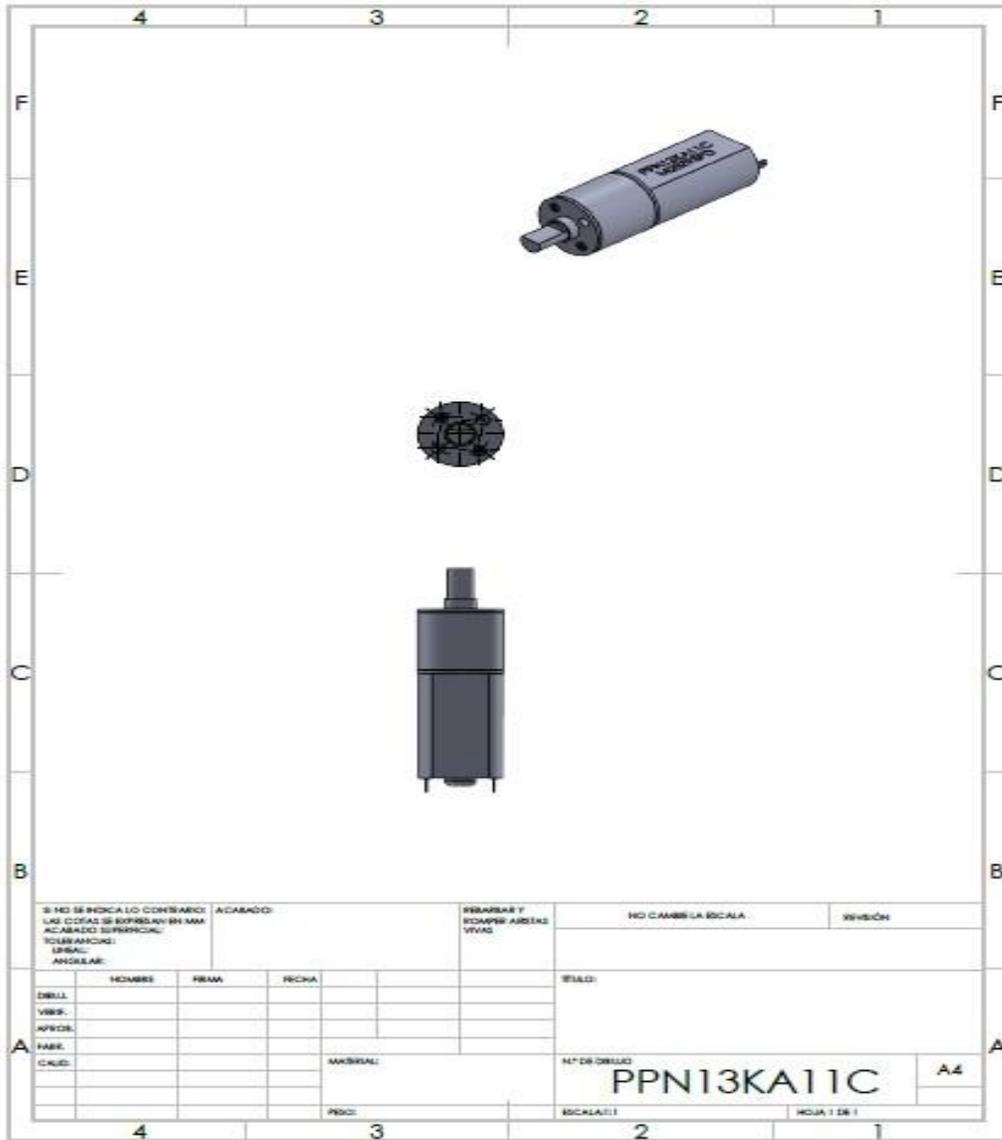
Rojas, D. (2021). *Diseño de un sistema automatizado basado en lógica difusa para el proceso de tueste de café en la empresa Momotus café SAS*. Uniautónoma del Cauca. <https://repositorio.uniautonomo.edu.co/bitstream/handle/123456789/629/T%20E-M%20081%202021.pdf?sequence=1>

Anexos

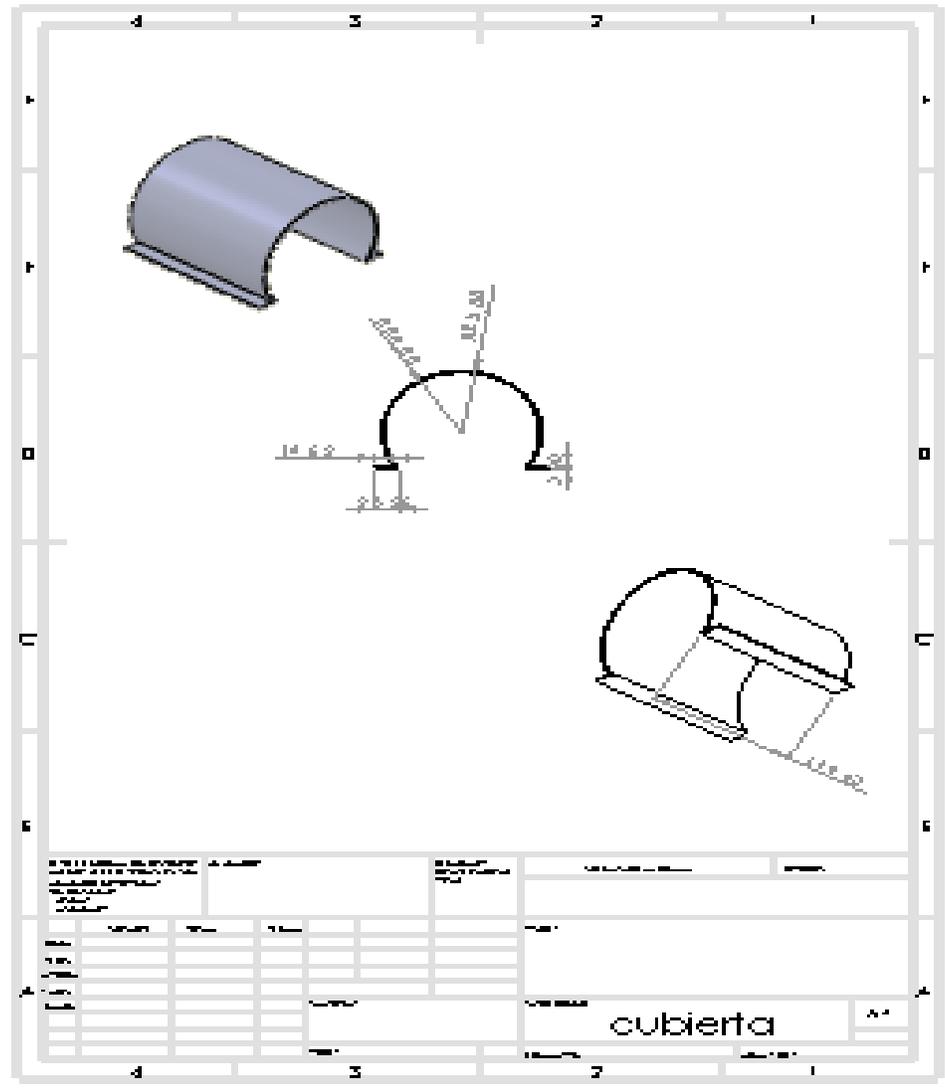
Anexo E Paletas tambor



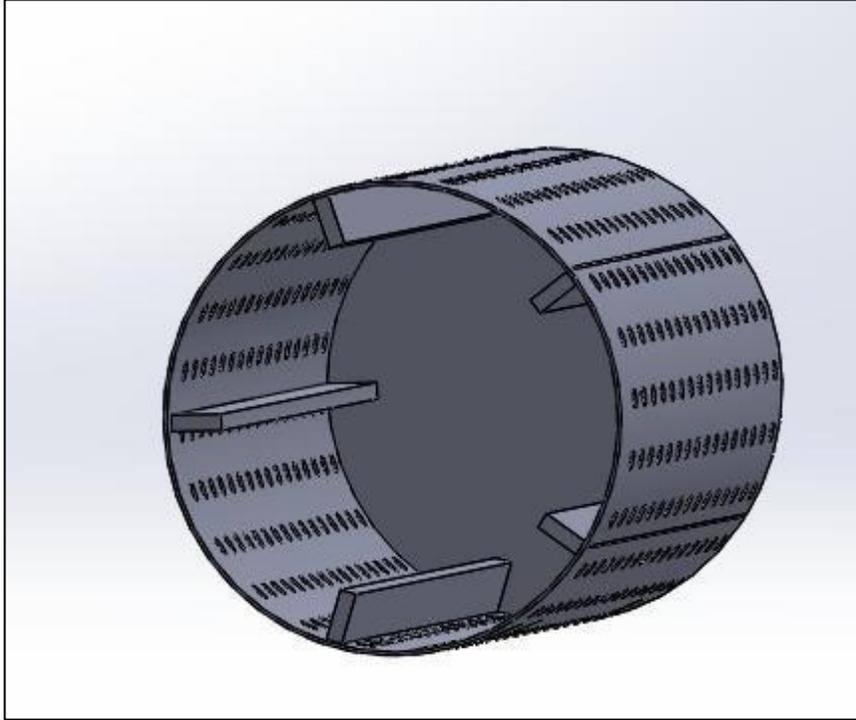
Anexo F Motorreductor 9v



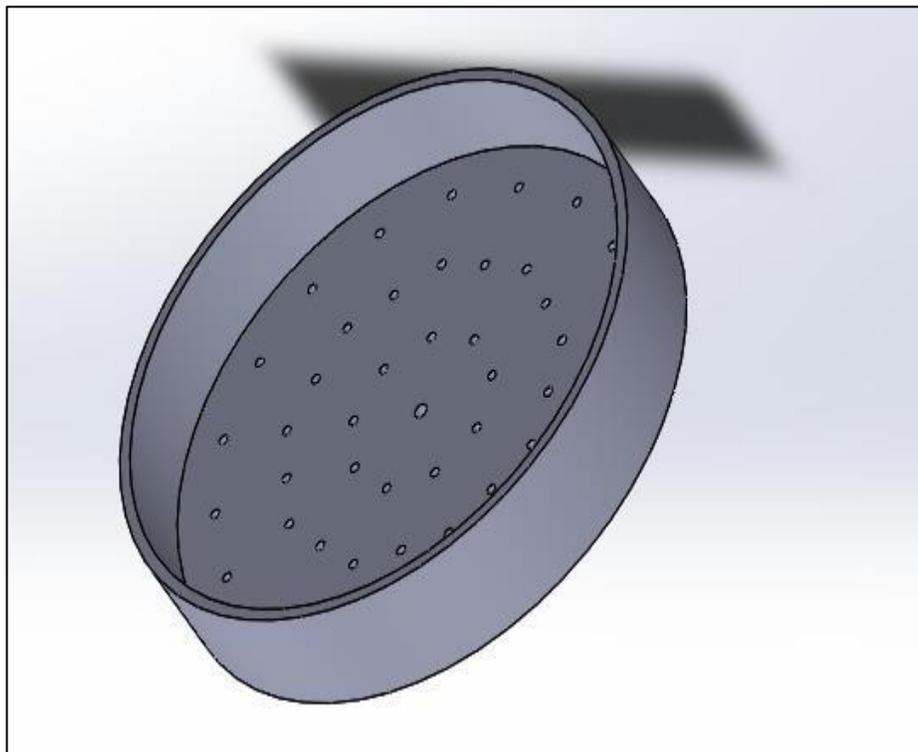
Anexo G Plano cubierta



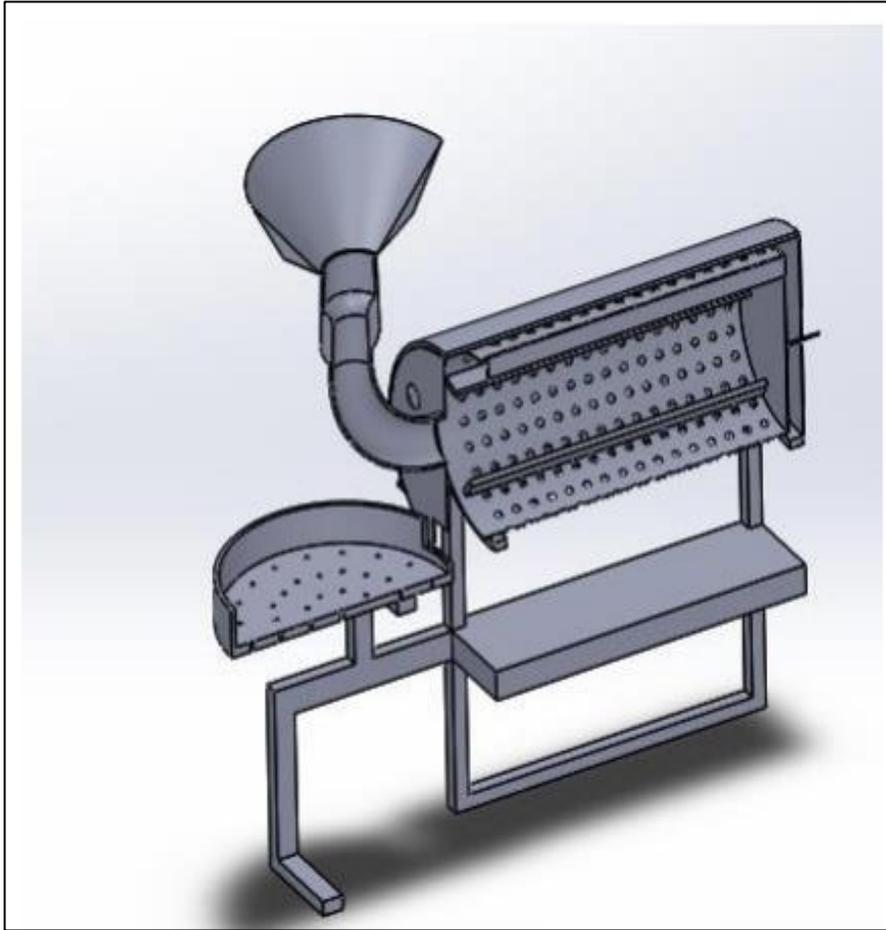
Anexo H *Modelado tambor rotatorio*



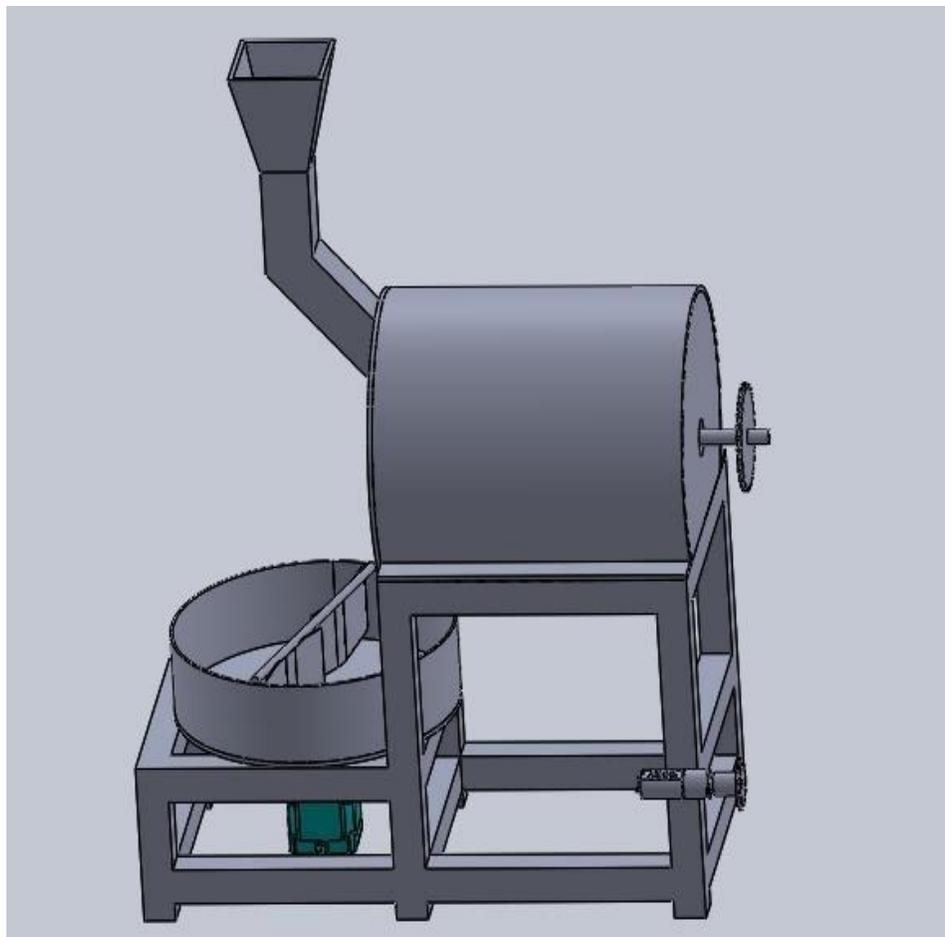
Anexo I Modelado bandeja



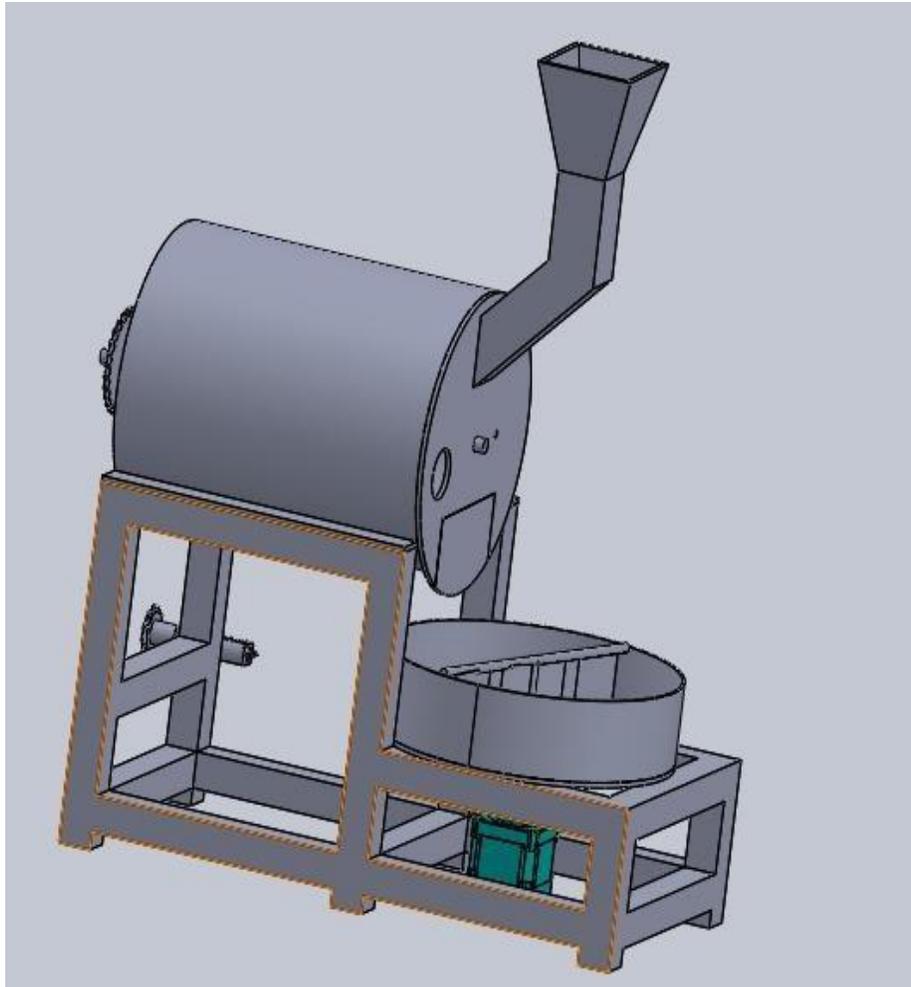
Anexo J Modelado interno



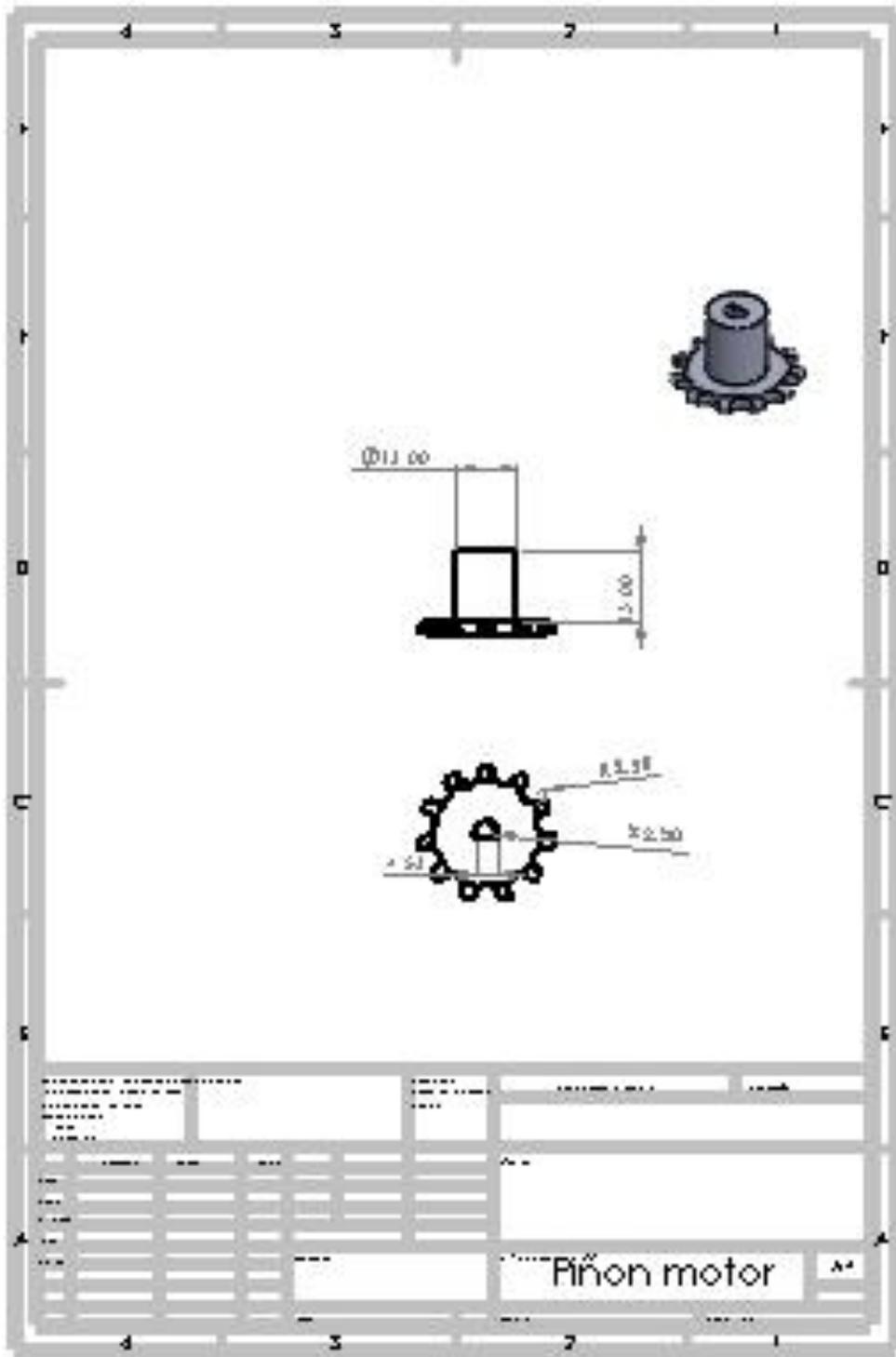
Anexo K *Modelado tostador*



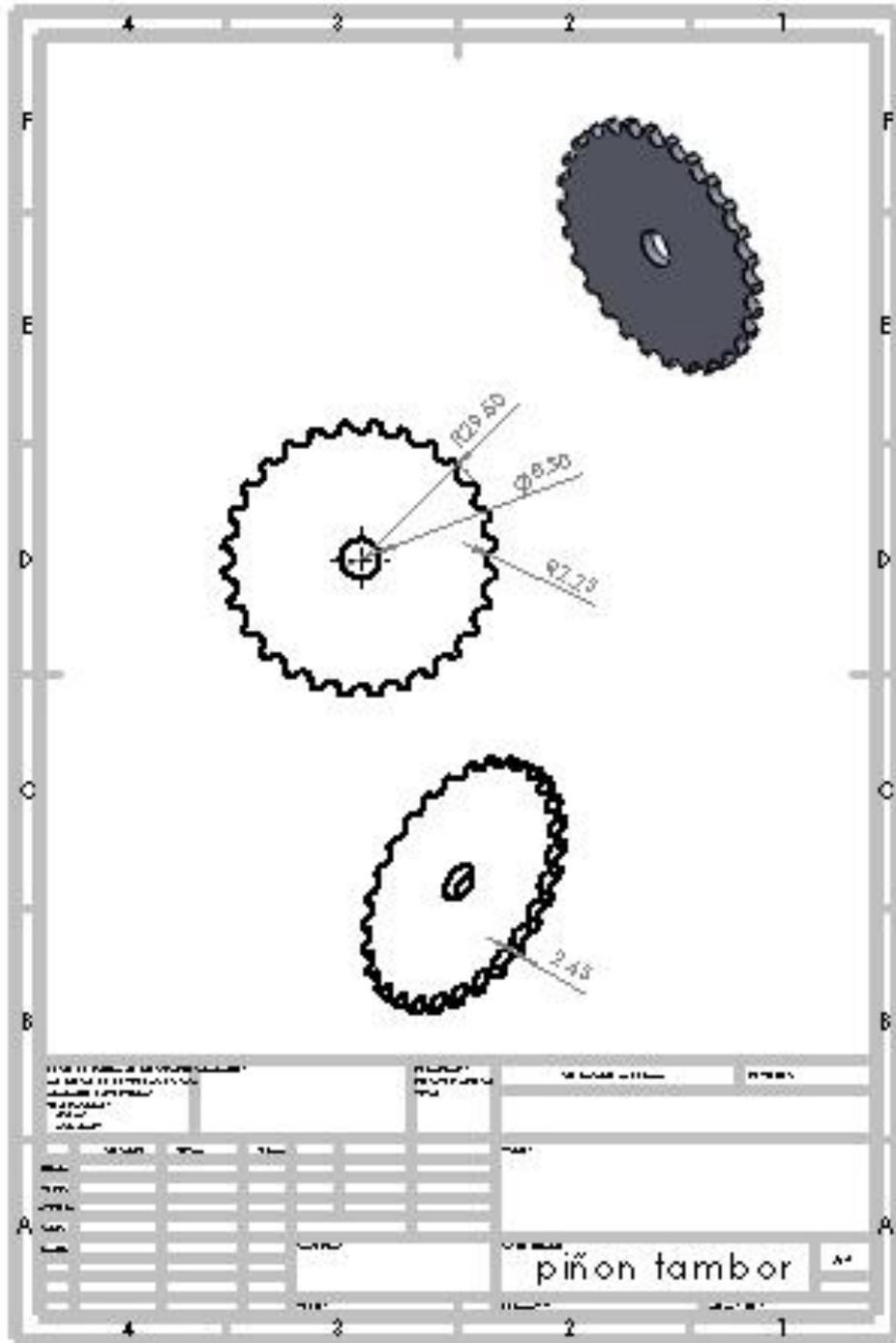
Anexo L *Vista lateral derecha*



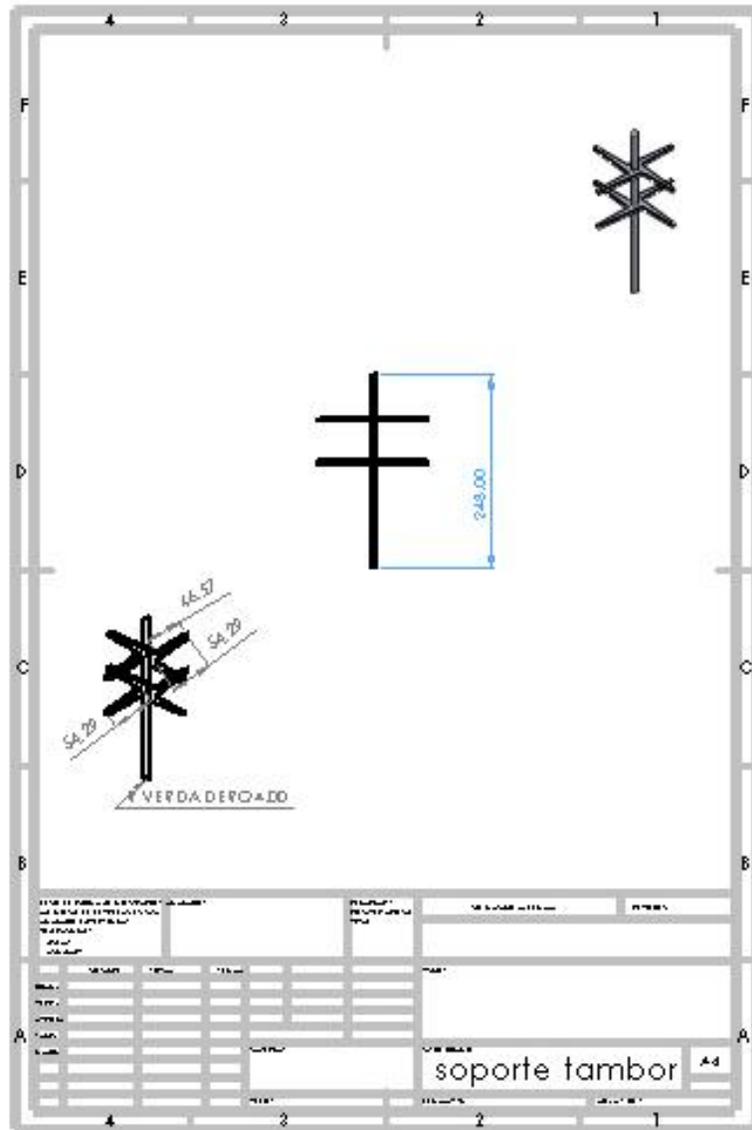
Anexo M Piñones de engranaje



Anexo N Piñón de tambor



Anexo O Soporte tambor



Anexo P *Cultivo de café*



Anexo Q *Proceso de secado artesanal tipo invernadero*



Anexo R Construcción



Anexo S Soldadura eléctrica de piezas



Anexo T Soldado de tambor



Anexo U Perforaciones cilindro y bandeja de secado



Anexo V Programación Arduino

```

if (mainscreen == 1) {
  if (main_btn.justPressed()) {
    main_btn.drawButton(true);
    mainscreen = 0;
    secondscreen = 1;
    tft.fillScreen(BLACK);
    btn_text_led1.initButton(&tft, 120, 30, 200, 30, WHITE, WHITE, BLACK, "ROAST COFFE", 2);
    on_btn_led1.initButton(&tft, 60, 70, 100, 40, WHITE, CYAN, BLACK, "ON", 2);

    btn_text_led1.drawButton(true);
    on_btn_led1.drawButton(false);
  }
}

void updateTemperature() {
  double Temp = thermocouple.readCelsius();

  // Define las coordenadas de la posición donde se imprimirá el texto
  int textX = 20;
  int textY = 250;
  // Borra el área donde se imprime el texto antes de escribir el nuevo valor
  tft.fillRect(textX, textY, 200, 30, BLACK);
  // Establece el color y el tamaño del texto
  tft.setTextColor(WHITE);
  tft.setTextSize(3);
  // Imprime el nuevo valor de temperatura
  tft.setCursor(textX, textY);
  tft.print("Temp:");
  tft.print(Temp);
  tft.print("  C");

  if (main_btn.justPressed()) {
    main_btn.drawButton(true);

    tft.fillScreen(BLACK);
    tft.setTextColor(WHITE);
    tft.setTextSize(4);
    tft.setCursor(20, 10);
    tft.print("PROCESO  ");
    tft.print("INICIADO ");
    updateTemperature();
  }
}

```

```
if (Temp < 100.0) {
    digitalWrite(relayPin, HIGH); // Enciende el relé si la temperatura es menor que 30°C
    digitalWrite(in1, LOW);
        digitalWrite(in2, HIGH);
        analogWrite(enA, 100);
} else if (Temp =100){

    digitalWrite(relayPin, HIGH); // Apaga el relé si la temperatura es mayor o igual a 30°C

    digitalWrite(in1, LOW);
        digitalWrite(in2, HIGH);
        analogWrite(enA, 200);

        delay(180000);
        digitalWrite(relayPin, LOW);
        digitalWrite(in1, HIGH);
        digitalWrite(in2, LOW);
        analogWrite(enA, 100);

        digitalWrite(in3, HIGH);
        digitalWrite(in4, LOW);
        analogWrite(enB, 100);

        delay(120000);
        // Apagar motores y mostrar botones en pantalla
        digitalWrite(in1, LOW);
        digitalWrite(in2, LOW);
        digitalWrite(in3, LOW);
        digitalWrite(in4, LOW);
```