



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y**  
**APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PARA  
CREAR FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE  
MATERIAL RECICLADO.”**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA.**

**AUTOR:**

Willian Fabian Laguatasig Toapanta

**TUTOR:**

Ing. Mg. Luis Miguel Navarrete Lopez

**LATACUNGA, AGOSTO 2024**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Laguatasig Toapanta Willian Fabian, con cédula de ciudadanía N° 1805007190 declaro ser autor de la presente PROPUESTA TECNOLÓGICA: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PARA CREAR FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO”**, siendo el Ing. M.Sc. Luis Miguel Navarrete López, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto del 2024



.....  
Laguatasig Toapanta Willian Fabian


C.C: 1805007190

## **AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA**

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PARA CREAR FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO”**, de: Laguatasig Toapanta Willian Fabian con número de cédula N.º 1805007190, de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, considero que dicha Propuesta Tecnológica es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, agosto del 2024



Ing. M. Sc Navarrete López Luis Miguel

C.C. 180374728-4

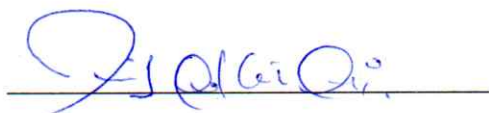
**TUTOR**

## AVAL DE MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Lagutasig Toapanta Willian Fabian con número de cédula, N.º 1805007190 con el título de Proyecto de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PARA CREAR FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO.”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

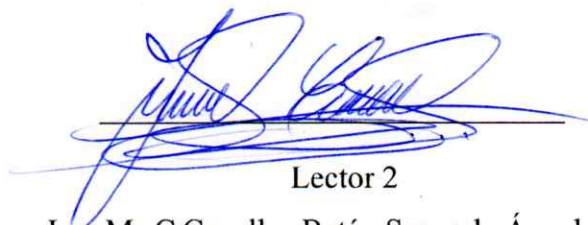
Latacunga, agosto del 2024



Lector 1 (Presidente)

Ing. Ms.C. Cruz Panchi Luis Rolando Ms.C

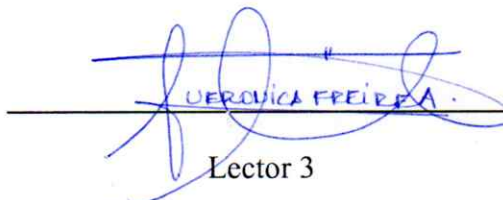
C.C: 0502595176



Lector 2

Ing. Ms.C Cevallos Betún Segundo Ángel

C.C: 0502607500



Lector 3

Ing. Ms.C Freire Andrade Verónica Paulina

C.C: 0502056229

## **AGRADECIMIENTO**

*Queridos padres, Cesar Laguatasig y Edelina Toapanta:*

*Quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, el cual ha sido fundamental para alcanzar mis objetivos personales y académicos.*

*A través de su cariño, me han impulsado a perseguir mis metas y a no rendirme frente a las adversidades. Su amor y constante apoyo son el pilar de mi existencia y mi inspiración diaria. A ustedes, mis queridos padres, les debo todo lo que soy y todo lo que llegare a ser.*

*Además, quiero extender mi gratitud hacia mi hermana, Mónica Laguatasig, por acompañarme en mi vida universitaria y por su incondicional apoyo durante mi tiempo como estudiante. Su ánimo y respaldo han sido fundamentales en los momentos de mayor exigencia académica.*

*Por último, agradezco sinceramente a todas las personas que colaboraron en esta investigación, brindando recursos y apoyo invaluable. Su contribución fue fundamental para el éxito de esta tesis. Sin su participación, este trabajo no habría sido posible. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.*

*Con amor y gratitud*

***Willian***

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, Cesar Laguatasig y Edelina Toapanta, les dedico esta tesis como un testimonio de gratitud por su constante apoyo moral y económico. Su respaldo incondicional ha sido fundamental en mi formación como profesional.*

*A mi hermana, Mónica Laguatasig, quien me brindo su apoyo inquebrantable durante mi trayecto como estudiante.*

*A mi amada familia, les entrego este gran logro como un símbolo de amor y gratitud eterna. Gracias por ser mi fuente de inspiración y el motor en cada uno de mis logros y metas alcanzadas.*

**Willian**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PARA CREAR FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO.”**

**Autor:** Laguatasig Toapanta Willian Fabian

### RESUMEN

La presente propuesta tecnológica aborda el diseño e implementación de un prototipo para crear filamento 3D. Como materia prima se utilizó PLA (Ácido Poliláctico) con una densidad  $1,24 \text{ g/cm}^3$ , que requiere una temperatura de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  para su fundición. El diseño de la máquina extrusora comenzó con la construcción de una tolva cuadrada de acero ASTM A36 con una capacidad de 8,27 kg. Para el tornillo sin fin se utilizó una broca de carburo de tungsteno de  $1 \frac{1}{4} \text{ in}$ , con un diámetro de 32 mm y una longitud de 400 mm. Para el cilindro extrusor también se utilizó acero AISI 1020, con un diámetro interior de 50 mm y una longitud de 675 mm. El sistema de enfriamiento se utilizó un ventilador DC. Finalmente, se construyó una estructura de soporte en acero ASTM A36 de 6 mm. Se implementó un tablero de control mediante la utilización del microcontrolador Arduino Mega 2560 mediante la comunicación serial a través de protocolo TX/RX(HMI) para arrancar el un motor con caja reductora de trabajo en DC, con controlador PWM se utilizó un Arduino mega para controlar las tres termocuplas y tres resistencias tipo abrazadera de 250 W, lo que permitió su encendido o apagado según un valor de referencia de  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento de la extrusora.

**Palabras claves:** Ácido Poliláctico, filamento, tolva, extrusora.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**

**TITLE: "DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MACHINE TO CREATE FILAMENT FOR 3D PRINTER FROM RECYCLED MATERIAL."**

**Author: Laguatasig Toapanta Willian Fabian**

**ABSTRACT**

This project focused on building a prototype to create 3D filament. PLA (Polylactic Acid) with a density of  $1.24 \text{ g/cm}^3$  was used as raw material, which requires a temperature of  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  for its melting. The design of the extruder machine began with the construction of a square hopper made of ASTM A36 steel with a capacity of 8.27 kg. For the auger, a  $1 \frac{1}{4}$  in tungsten carbide drill bit was used, with a diameter of 32 mm and a length of 400 mm. For the extruder cylinder, AISI 1020 steel was also used, with an inner diameter of 50 mm and a length of 675 mm. The cooling system used a DC fan. Finally, a support structure was built in 6 mm ASTM A36 steel. A control board was implemented using the Arduino Mega 2560 microcontroller using serial communication via TX/RX protocol (HMI) to start a DC geared motor, with a PWM controller an Arduino mega was used to control the three thermocouples and three 250 W clamp resistors, which allowed them to be turned on or off according to a reference value of  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Finally, the extruder was tested for operation.

**Keywords:** Polylactic Acid, filament, Hopper, extruder.

## ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. Situación problemática .....	3
2.2. Formulación del problema .....	3
2.3. BENEFICIARIOS .....	4
2.3.1. Directos.....	4
2.3.2. Indirectos .....	4
2.4. Justificación .....	4
2.5. OBJETIVOS .....	5
2.5.1. Objetivo general .....	5
2.5.2. Objetivos específicos.....	5
2.5.3. Sistema de tareas .....	5
3. Marco TEÓRICO .....	6
3.1. Antecedentes .....	6
3.2. ácido poliláctico .....	7
3.2.1. Definición y Evolución del ácido poliláctico .....	7
3.2.2. Origen y desarrollo histórico .....	7
3.2.3. Desarrollo Histórico .....	8
3.3. impresión 3d .....	8
3.4. MÁQUINAS trituradoras .....	10
3.4.1. Tipos de máquinas trituradoras.....	10
3.4.2. Trituradora de mandíbula .....	10
3.4.3. Trituradora de rodillos .....	10
3.4.4. Trituradora de cuchillas .....	11
3.5. EXTRUSIÓN.....	11
3.6. EXTRUSOR .....	11

3.6.1.	Componentes de un extrusor .....	13
3.6.2.	Husillo o tornillo.....	13
3.6.3.	Cilindro.....	14
3.6.4.	Tolva y apertura de alimentación.....	14
3.6.5.	Sistema de calentamiento y enfriamiento.....	16
3.6.6.	Cabezal .....	16
3.6.7.	Placa Rompedora y filtros [18].....	16
3.6.8.	Boquilla .....	17
3.7.	Sistema de instrumentacion y control para extrusion .....	17
3.7.1.	Sensores de temperatura .....	17
3.7.2.	Actuadores .....	17
3.7.3.	Sistema de control .....	17
3.8.	POLÍMEROS utilizados en impresión 3d .....	17
3.8.1.	ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) .....	18
3.8.2.	PLA (Ácido poliláctico ) .....	18
3.8.3.	Otros materiales utilizados .....	18
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	19
4.1.	DESCRIPCIÓN del proyecto .....	19
4.2.	VARIABLES DE LA INVESTIGACION .....	20
4.2.1.	VARIABLES INDEPENDIENTES .....	20
4.2.2.	VARIABLES DEPENDIENTE .....	20
4.3.	Diseño y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA.....	20
4.3.1.	Resistencia a la Cizalladura del Material .....	20
4.3.2.	Fuerza de Corte de Material PLA.....	20
4.3.3.	Factores de Concentración de Esfuerzos .....	21
4.3.4.	Selección de Motorreductor.....	21
4.3.5.	Diseño husillo o tornillo sin fin .....	22

4.3.6.	Selección de material.....	25
4.4.	Diseño del cilindro.....	25
4.4.1.	Dimensionamiento.....	25
4.4.2.	Selección del material.....	27
4.5.	Diseño tolva de alientacion.....	28
4.5.1.	Dimensionamiento.....	28
4.5.2.	Selección del material.....	30
4.6.	Diseño de la Boquilla.....	30
4.6.1.	Dimensionamiento.....	30
4.6.2.	Selección del material.....	31
4.6.3.	Selección de la boquilla.....	31
4.6.4.	Diseño del sistema de calefacción.....	32
4.6.5.	Dimensionamiento.....	32
4.6.6.	Diseño del sistema de refrigeración.....	34
4.6.7.	Dimensionamiento.....	34
4.6.8.	Selección del sistema de refrigeración.....	34
4.7.	Diseño del repartidor del filamento.....	38
4.7.1.	Dimensionamiento.....	38
4.8.	VALIDACIÓN DE COMPONENTES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	39
4.8.1.	Simulación del uso de Software Autodesk Fusion 360.....	40
4.9.	Diseño control electronico.....	43
4.10.	Implementación y Experimentación Pruebas Iniciales.....	48
4.10.1.	Optimización del Proceso.....	48
4.10.2.	Validación del Filamento.....	48
4.11.	implementacion del sistema de trituracion.....	49
4.12.	implementacion del sistema de estrusion.....	50

5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	53
5.1.	Descripción general de la metodología para el desarrollo del proyecto .....	53
5.1.1.	Promedio de Tiempo y Peso de Trituración para Material PLA .....	54
5.1.2.	Análisis de Resultados Técnicos .....	55
5.1.3.	Resultados de las Pruebas de Impresión.....	55
5.1.4.	Pruebas realizadas con desechos de filamento de impresión 3D.....	56
5.2.	ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEPENDIENDO EL VOLUMEN Y LAS HORAS DE TRABAJO.....	61
5.2.1.	Cálculo de consumo energético en 19,5 segundos .....	61
5.2.2.	Costo consumo energético en 19,5 segundos .....	62
5.2.3.	Consumo energético al procesar 45,6 kg de material triturado en una Hora.....	62
5.3.	Análisis de trituración del peso en kg por 20 días. ....	62
5.3.1.	Análisis Económico.....	63
5.3.2.	Costos de materiales .....	63
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
6.1.	CONCLUSIONES .....	66
6.2.	RECOMENDACIONES.....	66
7.	referencias.....	67

## ÍNDICE DE FIGURA:

Figura 3.1 Metodología básica para las técnicas actuales de prototipado rápido.....	8
Figura 3.3 Trituradora de mandíbula .....	10
Figura 3.4 Maquina trituradora de rodillo .....	11
Figura 3.5 Trituradora de cuchillas.....	11
Figura 3.6 Esquema extrusor de un solo tornillo [17].....	12
Figura 3.7 Tornillo de una extrusora [18].....	13
Figura 3.8 Diferentes tipos de tolva [17].....	15
Figura 3.9 Muestra de cómo ingresa el material al tornillo [18].....	15
Figura 3.10 Garganta de alimentación [18].....	16
Figura 3.11. Sistema de calefacción exterior de un cilindro [17].....	16
Figura 4.14. Paso filete .....	23
Figura 4.15. Diagrama de fuerzas de un husillo [22] .....	25
Figura 4.16. Cilindro acero AISI 316 .....	27
Figura 4.17. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 .....	30
Figura 4.17. Diagrama geométrico de la boquilla .....	31
Figura 4.18. Modelado Fusión 360 boquilla extrusora.....	32
Figura 4.19. Modelo Simplificado Del Cilindro y el sistema de calefacción.....	32
Figura 4.20. Esquema del sistema de calefacción [17].....	34
Figura 4. 21. Ventilador EverCool [24] .....	37
Figura 4.22. Tensión de Von Mises (MPa) en los 3 dientes de la cuchilla .....	40
Figura 4.23. Factor de Seguridad (FDS:2) .....	41
Figura 4.24. Esfuerzos de Von Mises (MPa) del eje de trituración .....	41
Figura 4.25. Tensión de Von Mises.....	42
4.9.1.5. Estructura base Acero ASTM A36 .....	42
Figura 4.27. DFD interfaz gráfica pantalla NEXTION.....	43
Figura 4.28. Cuadro de visualización del proceso de extrusión .....	44

Figura 4.29. DFD del funcionamiento de la pantalla en cada uno de los procesos.....	44
Figura 4.30. Diagrama de flujo del proceso de triturado y extruido .....	45
Figura 4.31. Diagrama de subproceso de extrusión.....	46
Figura 4.33. Visualización de las pistas de la placa que controlara la máquina.....	47
Figura 4.34. Suelda de los elementos en la placa creada.....	48
Figura 4.35. Elementos de la máquina cortados a través de CNC plasma .....	49
Figura 4.36. Colocación de las cuchillas y separadores .....	49
Figura 4.37. Ensamble del eje en la caja de trituración.....	50
Figura 4.38. Ensamblaje total con el motor a través de un matrimonio .....	50
Figura 4.39. Broca de carburo de tungsteno de 1 ¼ in.....	51
Figura 4.40. Construcción del Cilindro .....	51
Figura 4.41. Brida resistiva.....	51
Figura 4.42. Ensamblaje total de la extrusora .....	52
Figura 4.43. Instalación bridas resistivas en el cilindro de extrusión.....	52
Figura 4.44. Instalación de las termocuplas en el sistema de calefacción.....	53
Figura 4.45. Instalado sistema de control de la máquina.....	53
Figura 5.46. Volumen de la tolva.....	54
Figura 5.47. Desecho de impresora 3D, pesado .....	56
Figura 5.48. Desechos de impresión 3D trituradas y pesadas .....	57
Figura 5.49. Residuos de materia prima en la caja de trituración .....	57
Figura 5.50. Análisis de triturado con desechos de impresión 3D .....	58
Figura 5.51. Comprobación de cada valor a través de cada uno de los sensores .....	59
Figura 5.52. Material extruido con poca temperatura .....	60
Figura 5.53. Sobre fundición de materia prima .....	61
Figura 5.54. Verificación del diámetro de filamento del material extruido.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas.....	5
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del (FDM) .....	9
Tabla 4.9. Velocidad de flujo del cilindro para la boquilla.....	33
Tabla 4.10. Resultado del flujo masico en el cilindro con boquilla.....	33
Tabla 4.11. Resultado de Reynolds para el diámetro del filamento .....	35
Tabla 4.12. Propiedades del aire a $T = 100^{\circ}C$ .....	36
Tabla 4.13. Resultad obtenido mediante el diámetro del filamento .....	36
Tabla 4.14. Resultados del coeficiente de transferencia del aire para el filamento .....	36
Tabla 4.15. Temperatura del filamento al pasar por el ventilador .....	37
Tabla 4.16. parámetro de distribución del filamento .....	38
Tabla 4.17. Numero de vueltas necesarias para llenar el carrete.....	38
Tabla 4.18. longitud necesaria del material, acuerdo a la boquilla.....	39
Tabla 4.19. Tiempo promedio.....	39
Tabla 5.26. Eficiencia de la maquina.....	58
Tabla 5.27. Valores obtenidos de los sensores a comparación de la punta calibrada .....	59
Tabla 5.20. Costos de materiales .....	63
Tabla 5.21. Costos de diseño de ingeniería .....	64
Tabla 5.22. Costos directos.....	64
Tabla 5.24. Presupuesto .....	65
Tabla 5.25. análisis económico.....	65

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Título:**

“Diseño y construcción de una máquina para crear filamento para impresora 3D a partir de material reciclado.”

**Fecha de inicio:**

26 de octubre 2023

**Fecha de finalización:**

29 de agosto 2024

**Lugar de ejecución:**

**Región:** Sierra

**Provincia:** Tungurahua

**Cantón:** Píllaro

**Lugar:** El proyecto está ubicado en la provincia de Tungurahua, cantón Píllaro.

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

**Carrera que auspicia:** Ingeniería en Electromecánica|

**Proyecto de investigación vinculado:**

Uso eficiente de la energía en sistemas electromecánicos en el sector industrial y comunitario del país.

**Equipo de Trabajo:** Laguatasig Toapanta Willian Fabian

**Correo institucional:** willian.laguatasig719@utc.edu.ec

**Tutor de Titulación:** Ing. Ms.C. Navarrete López Luis Miguel

**Área de Conocimiento:** Ingeniería, Industria y construcción.

**Sub-Área:** Ingeniería y profesiones afines.

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Energía en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía.

## 2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la impresión 3D ha generado un aumento en la demanda de materiales utilizados para la fabricación de prototipos y productos finales. Este incremento ha llevado a un interés particular en la búsqueda de soluciones sostenibles para la producción de filamento, el material base esencial en los procesos de impresión 3D. En este contexto, el uso de materiales reciclados para la creación de filamentos no solo presenta una opción económicamente viable, sino también una estrategia ambientalmente responsable para reducir la cantidad de residuos plásticos generados por la industria de la impresión 3D. Este estudio se enfoca en el diseño y construcción de una máquina capaz de producir filamento para impresoras 3D a partir de desechos plásticos reciclados. El proyecto delimita su alcance a la utilización de plásticos comúnmente empleados en impresiones 3D, como el ácido poliláctico (PLA), debido a su popularidad y propiedades biodegradables. La investigación considera los desafíos técnicos asociados con la consistencia en el diámetro del filamento, un factor crucial para la calidad de impresión, así como la eficiencia energética del proceso de reciclaje y extrusión [1]

La relevancia de este estudio radica en su contribución potencial a la economía circular, promoviendo prácticas de reciclaje que minimicen el impacto ambiental y fomenten la reutilización de materiales plásticos. Además, la viabilidad económica de producir filamento reciclado puede ofrecer soluciones accesibles para pequeñas y medianas empresas, así como para usuarios individuales de impresoras 3D [2].

En términos de contexto específico, la investigación se sitúa en un escenario donde la industria de la impresión 3D busca alternativas sostenibles y económicamente viables. Con el apoyo de avances tecnológicos en sistemas de extrusión y reciclaje de plásticos, este proyecto no solo aborda un problema ambiental crítico, sino que también proporciona una solución innovadora y práctica para la producción de filamentos de calidad [2].

La importancia del tema es respaldada por diversas investigaciones y estudios que subrayan la necesidad de desarrollar tecnologías de reciclaje efectivas para la industria de la impresión 3D. Como se menciona en estudios recientes, la capacidad de reciclar y reutilizar desechos plásticos puede jugar un papel significativo en la reducción del desperdicio y la conservación de recursos naturales [1] [2].

## **2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

El incremento en la popularidad de la impresión 3D ha resultado en una demanda creciente de filamentos, aumentando también la cantidad de desechos plásticos generados. Estos residuos, a menudo derivados de plásticos como el ácido poliláctico (PLA), representan un desafío ambiental significativo debido a su acumulación y a la gestión ineficiente de los mismos. Según estudios recientes, aproximadamente el 10% de los plásticos producidos anualmente se recicla de manera efectiva, mientras que el resto termina en vertederos o en el medio ambiente, contribuyendo a la contaminación global [3]

En Ecuador, por ejemplo, se generan alrededor de 4.1 millones de toneladas de residuos plásticos anuales, de las cuales solo un pequeño porcentaje se recicla [4]. Esta situación subraya la necesidad de soluciones innovadoras para gestionar estos desechos de manera sostenible. Actualmente, las opciones para reciclar y reutilizar plásticos en filamentos para impresión 3D son limitadas, costosas o técnicamente ineficientes, lo que impide su adopción masiva.

Además, las pequeñas y medianas empresas, así como los usuarios domésticos de impresoras 3D, enfrentan barreras económicas para acceder a filamentos reciclados de alta calidad, lo que frena el potencial de una economía circular. Esta problemática resalta la importancia de desarrollar una máquina que pueda transformar materiales reciclados en filamento de 1.75 mm de diámetro, asegurando la viabilidad técnica y económica del proceso.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La gestión adecuada de los desechos de filamento PLA provenientes de la impresión 3D permite su reciclaje eficiente

### **2.2.1. Objeto de Investigación:**

Máquina para crear filamento PLA, mediante la trituración y extrusión del material reciclado.

### **2.2.2. Campo de Acción:**

330000 Ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05 Aplicaciones Eléctricas

## **2.3. BENEFICIARIOS**

### **2.3.1. Directos**

Usuarios de impresoras 3D. Tesista.

### **2.3.2. Indirectos**

Pequeñas y medianas industriales del reciclaje de la provincia de Cotopaxi.

## **2.4. JUSTIFICACIÓN**

Este proyecto se justifica por la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que reduzcan los desechos producidos por las impresoras 3D, la creciente adopción de la impresión 3D ha traído consigo un aumento en la generación de desechos plásticos, lo que plantea un desafío significativo en términos de sostenibilidad ambiental. Crear filamento a partir de desechos de impresoras 3D no solo aborda este problema, sino que también presenta múltiples beneficios en diferentes ámbitos. Desde un punto de vista personal, el desarrollo de esta solución representa un compromiso con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, valores fundamentales en la sociedad actual.

En el ámbito académico, este proyecto tiene un impacto teórico al contribuir al cuerpo de conocimiento sobre reciclaje de plásticos y economía circular. Metodológicamente, permitirá el desarrollo y la validación de técnicas de reciclaje específicas para plásticos de impresión 3D, lo que podría ser replicable y escalable en otras áreas de producción. Prácticamente, los resultados de este estudio pueden ser aplicados directamente en industrias que utilizan impresión 3D, optimizando sus procesos y reduciendo costos asociados a la adquisición de nuevos materiales.

Desde una perspectiva social y ambiental, la implementación de un proceso eficiente para reciclar desechos de impresoras 3D promueve la reducción de la huella ecológica de la manufactura aditiva. Al transformar desechos en recursos reutilizables, se contribuye a la reducción de residuos sólidos en vertederos y la contaminación ambiental, al mismo tiempo que se fomenta una economía más circular. Por lo tanto, esta iniciativa no solo responde a las necesidades actuales de sostenibilidad y eficiencia en la producción, sino que también posiciona a las empresas y usuarios de impresión 3D como actores responsables y comprometidos con el medio ambiente.

## 2.5. OBJETIVOS

### 2.5.1. Objetivo general

Desarrollar un proceso eficiente para reciclar desechos de impresoras 3D y convertirlos en filamento reutilizable, reduciendo así la cantidad de residuos plásticos y los costos de producción.

### 2.5.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación sobre procesos para el reciclaje del material.
- Diseñar una máquina que permita obtener filamento de diámetro 1.75mm a partir de desechos de impresora 3D.
- Realizar pruebas con la máquina para comprobar el diámetro de 1,75mm.

### 2.5.3. Sistema de tareas

Tabla 2.1. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar una investigación sobre procesos para el reciclaje del material.	Revisar la literatura científica sobre reciclaje de PLA y otros plásticos.	Identificación de los procesos más eficientes para el reciclaje de PLA.	bases de datos académicas, entrevistas con expertos. Matrices comparativas, informes técnicos.
	Analizar estudios de caso sobre reciclaje de materiales de impresión 3D.	Comprensión de las mejores prácticas en el reciclaje de plásticos de impresión 3D.	
Diseñar una máquina que permita obtener filamento de diámetro 1.75mm a partir de desechos de impresora 3D.	Crear un diseño preliminar basado en los procesos de reciclaje identificados.	Diseño de una máquina extrusora eficiente y funcional.	Software de CAD (AutoCAD, SolidWorks). - Herramientas de simulación (ANSYS, COMSOL). - Manuales de diseño de maquinaria.
	Simular el diseño en software de CAD y optimizar el diseño para lograr el diámetro requerido de 1.75mm	Modelo CAD del diseño final y especificaciones técnicas claras y detalladas.	

Realizar pruebas con la máquina para comprobar el diámetro de 1,75mm.	Fabricar un prototipo de la máquina diseñada.	Filamento de PLA reciclado con un diámetro constante de 1.75mm.	Equipos de medición de diámetro (calibradores, micrómetros). Instrumentos de control de temperatura y velocidad de extrusión. Registro de datos de prueba.
	Configurar la máquina y ajustar los parámetros de operación y realizar pruebas de extrusión con desechos de impresoras 3D	Documentación de los resultados de las pruebas e identificación de mejoras potenciales.	

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. ANTECEDENTES

De acuerdo a la tesis con el tema “Diseño Y Construcción De Una Máquina Extrusora De Filamentos A Partir De Los Residuos Plásticos De Impresiones 3d Para El Grupo De Investigación Gideter-Espoch” de la universidad Escuela Superior Politécnica De Chimborazo nos dice que, para una extrusora de plástico, el diseño horizontal resulta más idóneo debido a diversas ventajas sobre el diseño vertical. Entre estas ventajas se incluyen la eliminación del estiramiento causado por el peso del filamento y la gravedad, un aumento en la distancia hacia la zona de enfriamiento, la reubicación del motor fuera de la parte superior de la extrusora y una instalación de la tolva más sencilla. Un estudio de las máquinas existentes revela que la mayoría emplea un diseño horizontal, permitiendo la variación en los diámetros del filamento mediante el cambio de boquillas antes de la extrusión. Estas máquinas tienen diferentes capacidades de procesamiento. Nuestro diseño se centra en ser compacto, seguro y silencioso, con la capacidad de procesar los residuos generados por un grupo de investigación universitario, cumpliendo con los requisitos necesarios para la utilización de los filamentos en impresoras 3D mediante ensayos mecánicos [5].

La extrusión tiene sus primeros registros en 1797, cuando Joseph Bramah desarrolló el primer proceso para fabricar tubos de plomo, consistente en precalentar el metal y luego hacerlo pasar a través de un troquel utilizando un émbolo manualmente. Posteriormente, en 1894, Alexander Dick adaptó el proceso de extrusión para aleaciones de cobre y bronce. En 1935, Paul Troster construyó la primera extrusora de termoplástico en Alemania. Sin embargo, hasta el año 2010, la fabricación de filamentos de polímeros fundidos se utilizaba principalmente para obtener

sistemas de prototipos rápidos y de bajo costo. Por lo tanto, la extrusión se ha convertido en el proceso ideal para la fabricación de filamentos de impresión 3D [6].

De acuerdo con Laura Arteaga en su libro titulado "Haciendo y Caracterización de Filamentos de Impresoras 3D de Materiales Reciclados", menciona el potencial de diferentes materiales para crear hilos efectivos para impresión 3D, donde en el proceso de desarrollo del trabajo, las extrusoras realizan además el proceso de producción de filamentos. La impresora 3D RepRap crea piezas a partir de filamento fabricados y sometidos a pruebas mecánicas para caracterizar los hilos y sus características [7].

En los diferentes proyectos de titulaciones mencionados anteriormente se pueden decir que las máquinas extrusoras son de gran ayuda ya que de estas se obtiene nuevas las materias primas, las mismas que se logran a través del triturando, de tal manera que son de utilidad para la nueva impresión y creación de objetos tridimensionales, teniendo así cualquier tipo de objetos para el desarrollo de nuevas actividades.

## **3.2. ÁCIDO POLILÁCTICO**

### **3.2.1. Definición y Evolución del ácido poliláctico**

El ácido poliláctico (PLA) es un bioplástico derivado de recursos renovables como el maíz y la caña de azúcar. Debido a su origen biológico, el PLA es biodegradable bajo condiciones industriales específicas y ha ganado popularidad en diversas aplicaciones, especialmente en la impresión 3D, envases y productos desechables. Su capacidad de biodegradación y su derivación de recursos renovables lo hacen una alternativa sostenible a los plásticos derivados del petróleo [8].

### **3.2.2. Origen y desarrollo histórico**

. El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable derivado de recursos renovables como el maíz, la caña de azúcar y otros almidones vegetales. Desde su introducción, el PLA ha ganado popularidad debido a su sostenibilidad y a sus aplicaciones en diversas industrias, incluyendo embalaje, medicina, y manufactura aditiva (impresión 3D) [9].

El desarrollo del PLA comenzó en la década de 1930 cuando Wallace Carothers, un químico que trabajaba para DuPont, sintetizó por primera vez polímeros de lactida, el monómero precursor del PLA, utilizando lactato como material de partida. Sin embargo, en ese momento, los métodos de producción de PLA eran caros e ineficientes, limitando su uso comercial [10].

No fue hasta la década de 1990 que los avances en la fermentación de almidón vegetal para producir ácido láctico y mejoras en los procesos de polimerización llevaron a una producción más viable del PLA. Cargill, una empresa estadounidense, desempeñó un papel crucial en esta evolución, colaborando en la creación de NatureWorks LLC, la primera compañía en comercializar el PLA a gran escala bajo la marca "Ingeo" [11].

### 3.2.3. Desarrollo Histórico

En las décadas posteriores, la producción de PLA ha crecido significativamente. A principios del siglo XXI, la industria del embalaje comenzó a adoptar PLA debido a sus propiedades biodegradables y compostables, así como a su capacidad para reducir la dependencia de los plásticos derivados del petróleo. La investigación y el desarrollo continuos han permitido mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del PLA, expandiendo sus aplicaciones.

El PLA también ha encontrado un nicho importante en la industria de la impresión 3D. Su facilidad de uso, bajo punto de fusión, y la ausencia de emisiones tóxicas lo han convertido en uno de los materiales más utilizados para la impresión 3D a nivel doméstico y profesional [12].

### 3.3. IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D mediante FDM (Fused Deposition Modeling o modelado por deposición fundida) es una tecnología de fabricación aditiva que permite crear objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de material fundido, utilizando un proceso basado en la extrusión.

El proceso de impresión se inicia cargando el diseño deseado en un software especializado, que ha sido previamente creado en un programa de modelado 3D (archivos CAD), como SolidEdge, Autodesk Inventor, SolidWorks, Catia, entre otros. Posteriormente, el modelo CAD se convierte a un formato STL (Standard Tessellation Language), que es el lenguaje que la impresora 3D puede interpretar. La máquina procesa el archivo STL y genera un modelo en capas, las cuales se van sumando progresivamente hasta formar el objeto físico o sólido en tres dimensiones [13].

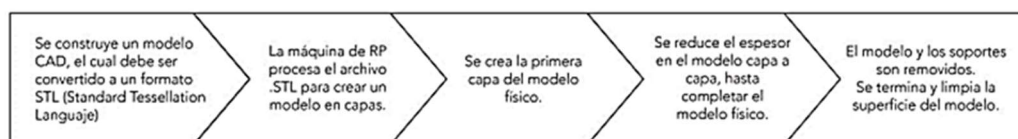


Figura 3.1 Metodología básica para las técnicas actuales de prototipado rápido

En la primera fase del proceso, el material se funde y es extruido a través de una boquilla caliente, lo que genera un delgado filamento de plástico que se deposita sobre la base de la máquina. El perfil del objeto se forma mediante la superposición de capas de material, depositadas una sobre otra (las capas se colocan de abajo hacia arriba), hasta que el producto final se completa según el diseño especificado. Los termoplásticos más comúnmente utilizados en este proceso son el ABS y el PLA, que generalmente se suministran en carretes de 1 kg, con diámetros de 1,75 mm y 3 mm .

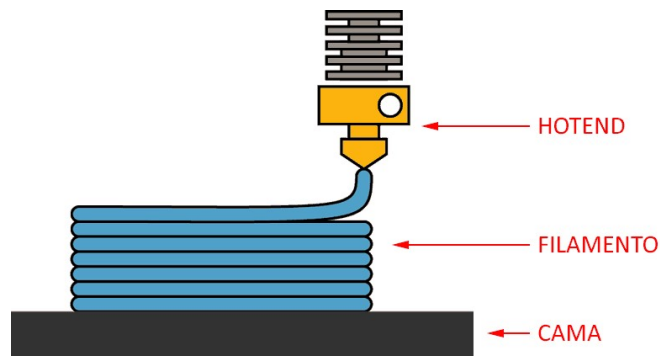


Figura 3.2 Funcionamiento de una impresora 3D FFF

La impresora 3D está equipada con un extrusor y un sistema de movimientos cartesiano que permite la creación de moldes. Para formar la primera capa, la máquina ejecuta movimientos en dos ejes cartesianos a través de sus mecanismos para cada coordenada, depositando el material en la disposición deseada. Luego, este proceso se repite, permitiendo que el extrusor coloque la segunda capa sobre la primera, y así sucesivamente. En la Tabla 1, se detallan las ventajas y desventajas de la tecnología FDM.

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas del (FDM)

Ventajas de la Tecnología FDM	Desventajas de la Tecnología FDM
Bajo costo de adquisición y operación	Acabado superficial limitado
Amplia disponibilidad de materiales	Velocidad de impresión lenta
Facilidad de uso	Limitaciones geométricas
Flexibilidad de diseño	Precisión limitada
Reciclabilidad de materiales	Propiedades mecánicas anisotrópicas

### **3.4. MÁQUINAS TRITURADORAS**

Las máquinas trituradoras son equipos diseñados para reducir el tamaño de diversos materiales, como plásticos, metales, residuos orgánicos, y otros tipos de desechos, transformándolos en piezas más pequeñas y uniformes. Estas máquinas son fundamentales en procesos de reciclaje y en industrias donde se requiere la trituración de materiales para su posterior procesamiento.

#### **3.4.1. Tipos de máquinas trituradoras**

Existen varios tipos de máquinas trituradoras diseñadas para procesar materiales como el PLA (ácido poliláctico), un plástico biodegradable comúnmente utilizado en impresión 3D. Cada tipo de trituradora tiene características específicas que la hacen más adecuada para ciertas aplicaciones o tipos de procesamiento. A continuación, se describen los tipos más comunes de máquinas trituradoras utilizadas para el PLA [14].

#### **3.4.2. Trituradora de mandíbula**

Estas trituradoras utilizan dos placas (mandíbulas) para aplastar el material. Una mandíbula es fija, mientras que la otra se mueve para ejercer presión sobre el material, triturándolo en pedazos más pequeños. Utilizadas para trituración primaria. Son adecuadas para materiales duros y quebradizos [15].



Figura 3.3 Trituradora de mandíbula

#### **3.4.3. Trituradora de rodillos**

Utilizan dos rodillos que giran en direcciones opuestas. El material se tritura entre los rodillos a medida que pasa por el espacio entre ellos. Adecuadas para trituración secundaria, particularmente útiles para materiales de dureza baja a media, como el PLA [15].

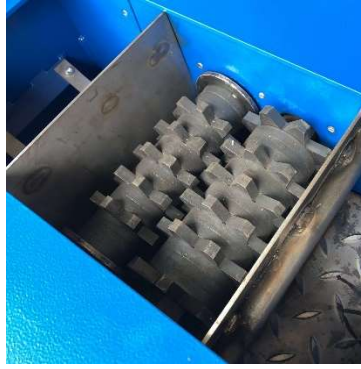


Figura 3.4 Maquina trituradora de rodillo

#### **3.4.4. Trituradora de cuchillas**

Equipadas con múltiples cuchillas que cortan el material en pequeñas partículas a medida que pasa a través de la cámara de trituración. Comúnmente utilizadas para plásticos, incluyendo PLA, debido a su capacidad de cortar materiales en pequeñas piezas uniformes [15].



Figura 3.5 Trituradora de cuchillas

### **3.5. EXTRUSIÓN**

La extrusión es un proceso de fabricación en el que un material, generalmente en forma de pellets o granulado, se funde y se fuerza a través de una boquilla o matriz para formar un producto continuo con una sección transversal específica. Este proceso es ampliamente utilizado en la industria para la producción de diversos productos como tubos, perfiles, películas, y filamentos, especialmente en la fabricación de plásticos, pero también es aplicable a otros materiales como metales, cerámicas, y alimentos [16].

### **3.6. EXTRUSOR**

Un extrusor es un dispositivo diseñado para empujar un material a través de una boquilla o dado. En el contexto de la extrusión de polímeros, se refiere a un equipo que funde y transporta un material plástico, forzándolo a pasar a través de una boquilla para producir un producto con una

sección transversal constante. Existen diversos mecanismos en las extrusoras capaces de realizar este proceso, como las extrusoras de pistón y las de uno o varios husillos, cada una con sus propias ventajas y desventajas. En este trabajo, se utilizará una extrusora de un solo husillo, la cual es continua y directa.

Es importante señalar que la asignación de funciones a las diferentes secciones del husillo no es estricta, ya que el transporte, la presurización y la homogenización del material extruido ocurren a lo largo de toda la unidad extrusora. Las extrusoras de un solo husillo pueden realizar seis funciones principales:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Transporte y presurización del material fundido
- Mezclado
- Desgasificación
- Conformado

Es crucial destacar que estas funciones no se realizan en todas las extrusoras durante su operación. Por ejemplo, la desgasificación solo ocurre en máquinas específicamente diseñadas para ello, debido a la presencia de componentes volátiles en los productos a procesar.

La Figura se muestra un diagrama de una unidad extrusora de un solo husillo, donde se identifican los distintos componentes que constituyen la máquina y el proceso de extrusión. En términos generales, un sistema extrusor debe integrar un sistema de alimentación del material, un sistema de fusión y plastificación, un sistema de bombeo y presurización, y un dispositivo (boquilla) que da forma al material extruido [17].

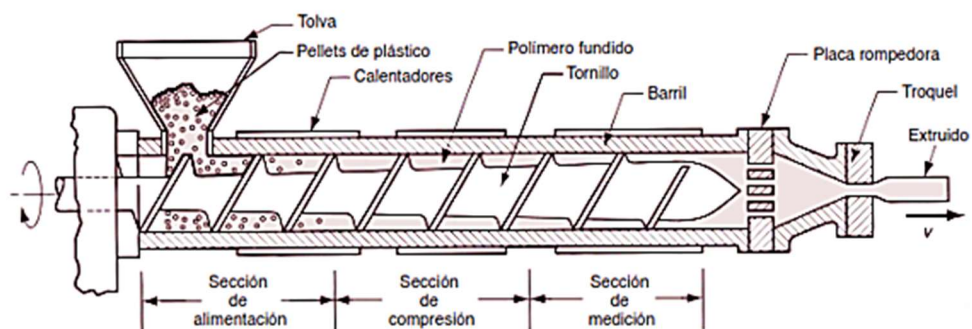


Figura 3.6 Esquema extrusor de un solo tornillo [17]

### 3.6.1. Componentes de un extrusor

Los componentes principales de un extrusor de un solo husillo se pueden identificar de la siguiente manera:

- Husillo o tornillo
- Cilindro
- Tolva y abertura de alimentación (Hopper, Feed throat)
- Sistema de calefacción y enfriamiento (Heaters, Coolers)
- Cabezal
- Placa rompedora y filtros
- Boquilla (Die)
- Motor (Drive)

### 3.6.2. Husillo o tornillo

El husillo de una extrusora se considera el componente más importante de la máquina, ya que es responsable de las funciones de transporte, calentamiento, fusión y mezcla de la materia prima a una temperatura adecuada, logrando una homogeneidad total. El movimiento del material se genera por el desplazamiento relativo del husillo en relación con el barril (el cilindro que contiene al husillo). La estabilidad y la calidad tanto del proceso como del producto dependen en gran medida del diseño del husillo. Los parámetros clave para obtener un buen producto incluyen la longitud ( $L$ ), el diámetro ( $D$ ), el ángulo del filete ( $\phi$ ) y el paso de la rosca ( $w$ ). La Figura 3.8 se ilustra el husillo de una extrusora y sus principales características [14].

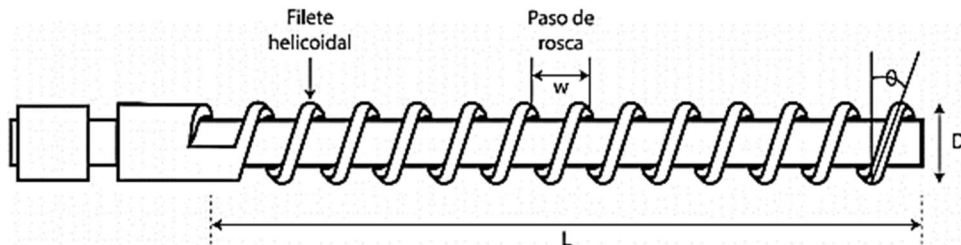


Figura 3.7 Tornillo de una extrusora [18]

A medida que la materia prima avanza a través del husillo, se va presurizando progresivamente, comenzando con la presión atmosférica en la entrada de la tolva y aumentando hasta alcanzar la salida por la boquilla. La profundidad del canal en el tornillo no es constante y varía a lo largo de las diferentes secciones, dependiendo del material a procesar. En la sección de

alimentación, el canal es relativamente profundo para permitir la entrada de grandes cantidades de polímero. En la sección de compresión, el canal se va reduciendo gradualmente para aplicar mayor presión al polímero a medida que se funde, lo que permite que el aire atrapado entre las partículas escape a través de la tolva de alimentación. En la sección de medición, el canal continúa reduciéndose, alcanzando la presión máxima justo antes de llegar a la boquilla. Aunque este diseño es adecuado para ciertos polímeros, el largo y la presión de cada sección deben ajustarse en función del material específico.

Los diferentes materiales termoplásticos utilizados en la extrusión varían significativamente entre sí. Propiedades como la elasticidad, el coeficiente de fricción, la temperatura de fusión, el calor específico y la viscosidad, entre otras, varían entre las diferentes materias primas y deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño del husillo [18].

### **3.6.3. Cilindro**

El barril es un cilindro metálico que alberga el husillo en su interior, y juntos forman el mecanismo de transporte del material mediante arrastre, constituyendo la cámara de fusión y bombeo del material. La superficie interna del barril debe ser rugosa para aumentar la tensión de cizalla que soportará el material, lo que facilita su flujo a lo largo de la extrusora [19].

El barril debe tener una resistencia adecuada al material que se va a procesar, lo que significa que debe ser lo suficientemente duro para minimizar el desgaste interno. Para prevenir la corrosión y el desgaste mecánico, se pueden emplear diferentes tipos de acero, y si es necesario, realizar un endurecimiento superficial de las paredes internas para reducir los efectos de abrasión y corrosión durante la operación. En el diseño de los cilindros, los objetivos principales son maximizar la durabilidad, minimizar el cambio dimensional debido a las temperaturas de trabajo y asegurar que el barril tenga una alta capacidad de transferencia de calor [20].

### **3.6.4. Tolva y apertura de alimentación**

La tolva de alimentación es el recipiente que se utiliza para introducir el material, generalmente en forma de pellets, en la máquina. Su función principal es asegurar un flujo constante de material sin obstrucciones, aplicando una compresión gradual sobre el mismo. Para mantener este flujo constante, es esencial que la tolva, la garganta de alimentación y la boquilla estén diseñadas y ensambladas con precisión, y que tengan un volumen suficiente para contener la materia prima necesaria para dos horas de operación. En la Figura se pueden ver dos tipos diferentes de tolvas de alimentación [21].

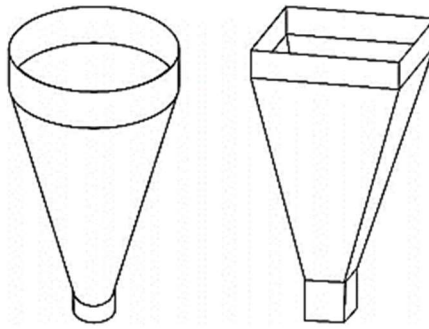


Figura 3.8 Diferentes tipos de tolva [17]

El transporte del material en la tolva se realiza generalmente por el flujo gravitacional de las partículas, es decir, el material se desplaza debido a su propio peso. Para que la tolva sea funcional, debe tener dimensiones adecuadas; un diseño incorrecto, especialmente en el ángulo de caída del material, puede causar atascos y detener la producción.

Cuando la materia prima tiende a compactarse fácilmente, es recomendable utilizar una tolva con un sistema vibratorio, ya que el movimiento ayuda a romper los enlaces formados en el material, permitiendo su descenso. Si persisten los problemas, es necesario implementar un sistema adicional para facilitar el movimiento de la materia prima, generalmente utilizando un tornillo para asegurar una alimentación continua, como se muestra en la Figura [18].

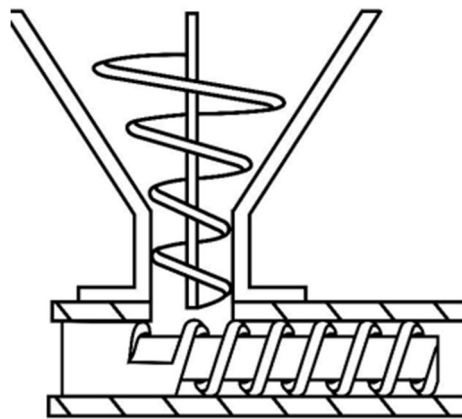


Figura 3.9 Muestra de cómo ingresa el material al tornillo [18]

La garganta de alimentación generalmente está aislada térmicamente del extrusor o equipada con un sistema de refrigeración para mantener la temperatura en esa área lo más baja posible. Esto ayuda a mantener el material en estado sólido y evita que se adhiera a las paredes internas del barril. La boquilla de alimentación suele tener una longitud equivalente a 1.5 veces el diámetro del cilindro y un ancho de 0.7 veces dicho diámetro. Además, la boquilla a menudo está desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material hacia la máquina.

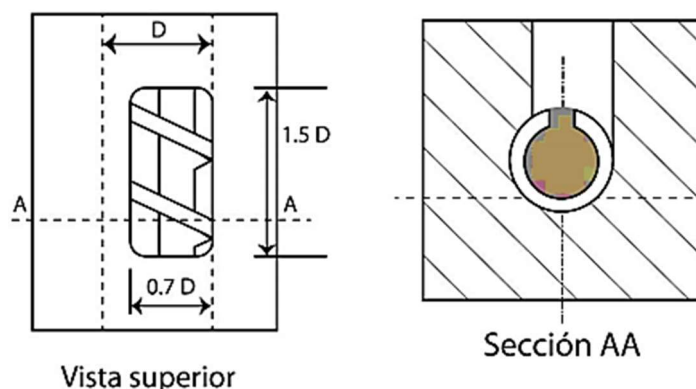


Figura 3.10 Garganta de alimentación [18]

### 3.6.5. Sistema de calentamiento y enfriamiento

La temperatura de trabajo en el extrusor es crucial para producir un buen producto, desde la fusión del material hasta su enfriamiento y solidificación. Por lo tanto, es esencial contar con un sistema de control de temperaturas para lograr resultados óptimos. Los extrusores comerciales suelen estar equipados con dos sistemas de temperatura: calefacción y enfriamiento.

El barril a menudo se divide en al menos tres zonas de calefacción, cada una con control independiente, para asegurar gradientes de temperatura adecuados en todas las secciones del husillo durante el proceso de extrusión. El sistema de refrigeración se emplea para manejar el calor generado internamente por la cizalla, que puede elevar la temperatura del plástico más allá de los niveles óptimos y afectar negativamente el proceso [17].

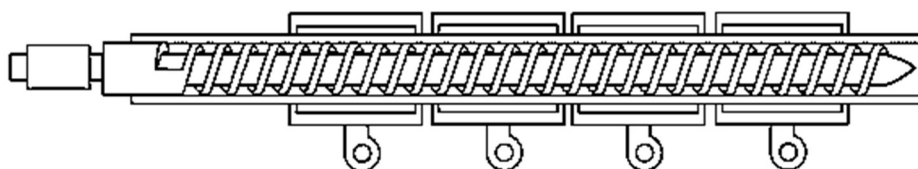


Figura 3.11. Sistema de calefacción exterior de un cilindro [17]

### 3.6.6. Cabezal

El cabezal es el componente final del cilindro, encargado de sujetar la boquilla y mantener la placa rompedora. Generalmente, está atornillado al cilindro. Su función principal es dirigir el flujo del material hacia la boquilla mediante un torpedo integrado en el cabezal. La sección transversal del torpedo está diseñada para permitir un flujo uniforme del material a una velocidad constante.

### 3.6.7. Placa Rompedora y filtros

La placa rompedora se ubica al final del husillo, justo antes de la boquilla, y actúa como un

punto de transición entre la extrusora y el cabezal. Este componente es fundamental para la calidad del material extruido. La placa rompedora es la primera parte del cabezal que interrumpe el flujo en espiral impartido por el tornillo al material [18].

### **3.6.8. Boquilla**

La boquilla es el componente ubicado en el extremo final del extrusor, y su función es dar la forma final al plástico durante el proceso de extrusión. Generalmente, se considera un elemento separado del extrusor, ya que debe ser fabricada específicamente para el perfil que se desea producir. Durante la extrusión, el polímero fundido pasa a través del conducto de la boquilla, impulsado por la presión generada justo antes del cabezal.

## **3.7. SISTEMA DE INSTRUMENTACION Y CONTROL PARA EXTRUSION**

El sistema de instrumentación y control es esencial para garantizar que el proceso de extrusión de PLA (ácido poliláctico) se realice de manera precisa, eficiente y segura. Este sistema monitorea y regula diversos parámetros del proceso, asegurando la producción de filamento con las propiedades deseadas.

### **3.7.1. Sensores de temperatura**

Monitorean la temperatura en las zonas críticas del proceso de extrusión, como el barril de extrusión, la zona de alimentación y la boquilla. La temperatura debe ser controlada con precisión para asegurar la correcta fusión y fluidez del PLA

### **3.7.2. Actuadores**

Ajustan los calentadores eléctricos en el barril de extrusión y la boquilla para mantener la temperatura deseada.

### **3.7.3. Sistema de control**

Los servidores OPC ofrecen numerosas ventajas, tales como la reducción de la complejidad en la integración de sistemas al proporcionar datos consistentes. Además, mejoran la escalabilidad en la automatización permitiendo futuras expansiones con menor esfuerzo y costo [14].

## **3.8. POLÍMEROS UTILIZADOS EN IMPRESIÓN 3D**

Actualmente, los polímeros siguen siendo fundamentales en la industria debido a sus variadas propiedades y aplicaciones. Entre los plásticos más utilizados en impresión 3D se encuentran

el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poliláctico). Ambos son ampliamente compatibles con la mayoría de las impresoras 3D disponibles en el mercado debido a sus características y beneficios.[15].

### **3.8.1. ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno)**

Es un polímero termoplástico ampliamente empleado en la industria plástica. Se obtiene a partir de la combinación de tres monómeros que le confieren sus propiedades distintivas:

- Acrilonitrilo: Proporciona resistencia química, dureza y rigidez.
- Butadieno: Aporta elasticidad y resistencia al impacto.
- Estireno: Contribuye a la resistencia al calor, mejora la procesabilidad y permite la incorporación de color.

Generalmente, la resina de ABS está compuesta por un 21-27% de acrilonitrilo, 12-25% de butadieno y 54-63% de estireno. El ABS es conocido por su dureza y alta resistencia al impacto, haciéndolo ideal para aplicaciones mecánicas. Durante la impresión, el ABS se funde a temperaturas que oscilan entre 215 y 250 °C, y puede liberar vapores tóxicos, por lo que es crucial utilizar un sistema de ventilación adecuado.

### **3.8.2. PLA (Ácido poliláctico )**

Es otro material popular en la impresión 3D, especialmente en impresoras FDM (Modelado por Deposición Fundida). Este termoplástico rígido es un poliéster alifático derivado de recursos renovables, como maíz, tapioca, madera o caña de azúcar. Gracias a su origen biológico, el PLA es biodegradable y se descompone fácilmente en agua y dióxido de carbono.

El PLA tiene la ventaja de no emitir gases nocivos durante la impresión y no requiere una cama de impresión calentada como el ABS. Su rango de fusión es relativamente bajo, entre 160 y 230 °C. Sin embargo, las piezas impresas con PLA tienden a ser más frágiles en comparación con las fabricadas en ABS.

### **3.8.3. Otros materiales utilizados**

Aunque ABS y PLA dominan el mercado de impresión 3D, también existen otros materiales con propiedades destacadas:

- Nylon: Aunque puede ser complejo de usar debido a problemas de adhesión, el nylon es flexible, ligero y resistente a altas temperaturas.

- PVA (Alcohol Polivinílico): Ideal para impresiones con cabezales múltiples y modelos de formas complejas, el PVA es soluble en agua, aunque su absorción de humedad puede ser un inconveniente.
- PC (Policarbonato): Este material no biodegradable tiene una alta temperatura de fusión (entre 280 y 305 °C), lo que limita su uso en procesos convencionales. Es muy resistente y duradero.
- HDPE (Polietileno de Alta Densidad): Resistente a muchos disolventes, el HDPE no es ideal para impresión 3D debido a su tendencia a encogerse durante el enfriamiento, afectando la precisión.

Dado que muchos de los materiales utilizados en impresión 3D son reciclables, existen dispositivos diseñados para convertir el material de desecho en filamento de impresión. A continuación, se examinarán algunas tecnologías que podrían facilitar este proceso.

## **4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS**

### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

La presente investigación aborda el problema de la falta de un sistema para crear filamento a partir de los desechos de impresoras 3D, la creciente popularidad de la impresión 3D ha llevado a un aumento significativo en el uso de materiales plásticos, especialmente en la fabricación de prototipos y productos personalizados. Sin embargo, este crecimiento también ha generado una preocupación ambiental debido a la acumulación de desechos plásticos, ya que una parte considerable del material utilizado termina como residuo debido a errores de impresión, soportes y piezas desechadas. En este contexto, la creación de filamento a partir de desechos de impresoras 3D surge como una solución innovadora para abordar el problema de los residuos plásticos generados por la impresión 3D.

El presente estudio se centra en explorar las posibilidades de reutilización de los desechos plásticos generados en el proceso de impresión 3D, transformándolos en nuevo filamento utilizable para futuras impresiones. Este enfoque no solo tiene el potencial de reducir la cantidad de residuos plásticos, sino que también promueve una economía circular en la fabricación aditiva, donde los materiales pueden ser reutilizados de manera continua, minimizando el impacto ambiental y los costos de producción.

El alcance de este estudio incluye la identificación y análisis de los métodos actuales para recolectar, procesar y reprocesar los desechos plásticos de las impresoras 3D, así como la

evaluación de la calidad y viabilidad del filamento reciclado en comparación con el filamento virgen. Se abordarán tanto los aspectos técnicos, como la viabilidad económica y los beneficios ambientales, proporcionando una visión integral de cómo los desechos plásticos de las impresoras 3D pueden ser transformados en un recurso valioso.

## **4.2. VARIABLES DE LA INVESTIGACION**

### **4.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES**

Filamento PLA para impresión 3D.

### **4.2.2. VARIABLES DEPENDIENTE**

Desperdicios de material.

## **4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA**

### **4.3.1. Resistencia a la Cizalladura del Material**

Generalmente, la resistencia a la cizalladura para el acero ASTM A36 es aproximadamente el 75% de su resistencia a la tracción. Dado que la resistencia a la tracción del acero A36 es alrededor de 400 MPa, la resistencia a la cizalladura sería aproximadamente 300 MPa.

### **4.3.2. Fuerza de Corte de Material PLA**

La fuerza de corte del PLA depende de sus propiedades específicas, pero generalmente está en el rango de 50-70 MPa.

Límite de Resistencia a la Fatiga del Material

Mediante la selección del material, lo cual es ASTM A36 Aproximadamente 160 MPa para un número infinito de ciclos.

VARIABLES que Modifican la Resistencia a la Fatiga

Factores que Afectan la Fatiga:

- Acabado superficial
- Tamaño del componente
- Tipo de carga (cíclica, constante)
- Temperatura de operación

- Ambiente (presencia de corrosión)

### 4.3.3. Factores de Concentración de Esfuerzos

Dependen de la geometría y pueden ser obtenidos de manuales de diseño mecánico.

Cálculo del Diámetro en la Sección Más Cargada

Formula básica

$$\tau = \frac{T*c}{J} \quad (1)$$

Donde:

$\tau$  = *esfuerzo cortante*

$T$  = *torque aplicado*

$c$  = *radio del eje*

$J$  = *momento polar de inercia*

Cálculo del diámetro

$$\sqrt[3]{\frac{16*T}{\pi*\tau}} \quad (2)$$

El factor de seguridad (FS)

EL (FS) recomendado para las aplicaciones dinámicas: entre 2 y 3 mediante la siguiente formula:

$$FS = \frac{\tau_{perm}}{\tau_{aplicado}} \quad (3)$$

### 4.3.4. Selección de Motorreductor

La selección de un motorreductor adecuado para una máquina trituradora de material reciclado PLA es crucial para asegurar un rendimiento óptimo y una larga vida útil del equipo. A continuación, se presentan los pasos y consideraciones necesarias para la selección del motorreductor.

- Determinar los Requerimientos del Motorreductor

Torque Necesario (T)

Para determinar el torque necesario para operar la trituradora, considerando la fuerza de corte del PLA y el radio del eje se lo realiza mediante la siguiente formula:

$$T = \frac{F*r}{n} \quad (4)$$

Donde:

F = fuerza de corte

r = radio del eje

$\eta$  = eficiencia del sistema

- Potencia del Motor (P)

Para calcular la potencia del motor requerida se lo realiza de la formula siguiente:

$$P = \frac{T*\omega}{n} \quad (5)$$

Donde:

$\omega$  = velocidad angular (en radianes por segundo)

$\eta$  = eficiencia del sistema

- Relación de Transmisión (i)

Para determinar la relación de transmisión necesaria para adecuar la velocidad del motor a la velocidad requerida por la trituradora, se lo realiza mediante la formula:

$$i = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}}$$

La selección de un motorreductor para una máquina trituradora de material reciclado PLA implica calcular el torque y la potencia necesarios, determinar la relación de transmisión adecuada y elegir un motorreductor que cumpla con estas especificaciones. Al considerar también la eficiencia y durabilidad, se garantiza un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada del equipo.

#### **4.3.5. Diseño husillo o tornillo sin fin**

El husillo es un componente fundamental en el funcionamiento de una máquina extrusora. Como se ilustra en la Figura, la eficiencia en la producción y la aplicación de la extrusora dependen de varios factores, tales como el diámetro del husillo, su longitud, la velocidad de rotación, el diseño del canal helicoidal, el perfil de los filetes, el cabezal, la cantidad de zonas, y la cabeza perfiladora, entre otros aspectos clave.

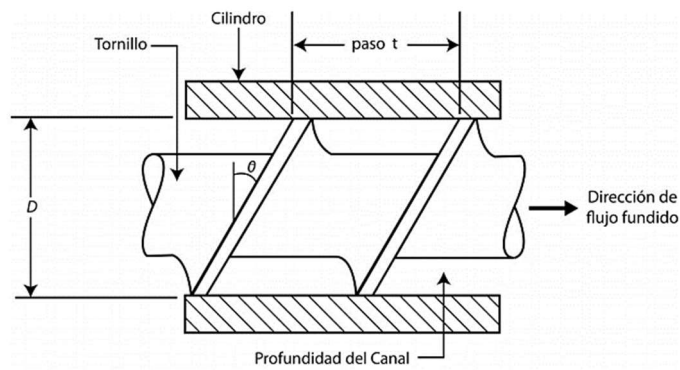


Figura 4.14. Paso filete

#### 4.3.5.1. Holgura del husillo

La holgura entre la cresta del filete del husillo y la superficie interior del cilindro en una extrusora tienen una gran importancia, cuando la holgura es grande, el material se mezcla con mayor efectividad, pero disminuye el avance del mismo al aumentar el flujo inverso (de presión) del material.

$$\delta = 0,005 * D \quad (6)$$

$$\delta = 0,005 * 27 = 0,14 \text{ [mm]}$$

#### 4.3.5.2. Producción del husillo

La producción, medida como flujo volumétrico, se obtiene a partir de tres flujos distintos dentro del canal. El primero es el flujo de arrastre ( $\alpha$ ), generado por la rotación del tornillo. El segundo es el flujo de presión ( $\beta$ ), que actúa como una fuerza opuesta al flujo en el sistema. Finalmente, está el flujo de filtración ( $\gamma$ ), que disminuye la producción debido a las pérdidas de material a través de la holgura entre el husillo y el cilindro.

$$Q = \left( \frac{\alpha * k}{k * \beta + \gamma} \right) n \quad (7)$$

Donde

$\alpha$ : Volumen unitario del Flujo de arrastre [ $\text{mm}^3$ ]

$\beta$ : Volumen unitario del Flujo de presión [ $\text{mm}^3$ ]

$\gamma$ : Volumen unitario del Flujo de filtración [ $\text{mm}^3$ ]

K: Constante total de la forma geométrica del cabezal [ $\text{mm}^3$ ]

$n$ : RPM del husillo [rev/min]

Cada uno de estos parámetros están definidos por su propia ecuación, que relaciona las dimensiones del husillo con las variables de la máquina. A continuación, se calcula cada una de estas variables.

- Volumen unitario flujo de arrastre ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h_1 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \varphi}{2} [mm^3] \quad (8)$$

Donde:

$m$ : Número de canales del husillo [-]

$D$ : Diámetro del husillo [mm]

$h_1$ : Profundidad del canal en la zona de alimentación [mm]

$t$ : Paso del husillo [mm]

$e$ : Ancho del filete [mm]

$\varphi$ : Ángulo de la Hélice [°]

Reemplazando, se obtiene:

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 16 * 3,2 * \left(\frac{16}{1} - e\right) * \cos^2(17,6)}{2} [mm^3]$$

$$\alpha = 1051.5 [mm^3]$$

- Volumen unitario flujo de presión ( $\beta$ )

*Potencia requerida*

*Presiones en la máquina extrusora*

- Presión máxima en el husillo
- Presión de operación en la boquilla

#### 4.3.5.3. Fuerzas en el husillo

Según las dimensiones previamente establecidas para el husillo, es fundamental verificar y determinar la flecha máxima permisible. En la Figura siguiente, se muestra un diagrama que

ilustra las tensiones que se generan en el husillo. Este está sujeto a una fuerza axial, un momento de giro y una carga uniformemente distribuida debido al peso del propio husillo.

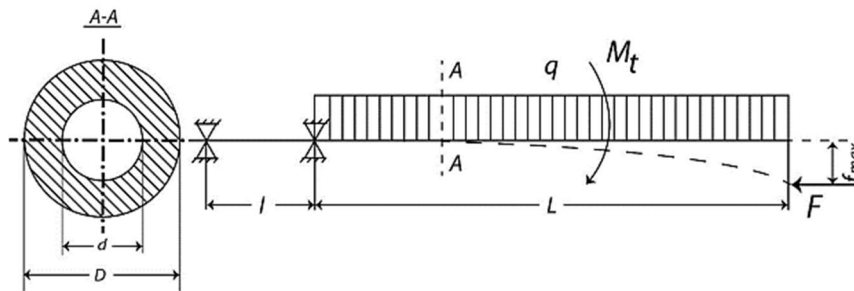


Figura 4.15. Diagrama de fuerzas de un husillo [22]

Primero, se calcula el momento torsor originado por el motor sobre el husillo, mediante la siguiente fórmula

#### 4.3.6. Selección de material

El husillo es el componente central de la máquina, sobre el cual gira todo el proceso. Su rotación no solo transporta el material, sino que también contribuye al calentamiento del polímero y facilita su homogenización. Los desgastes más comunes que afectan a los husillos son de tipo abrasivo y corrosivo. Por esta razón, es crucial que los husillos posean una alta dureza para minimizar el desgaste causado por partículas abrasivas, así como una elevada resistencia a la corrosión para prevenir su deterioro debido a la degradación del polímero.

La selección del material para el husillo se basó en varios parámetros clave:

- Temperaturas de trabajo
- Disponibilidad y maquinabilidad
- Condiciones de operación
- Resistencia a la torsión

### 4.4. DISEÑO DEL CILINDRO

#### 4.4.1. Dimensionamiento

Se deben considerar varios factores al diseñar un cilindro, entre ellos: la holgura entre la rosca helicoidal y el cilindro y el diámetro del tornillo. Primero, se calcula el diámetro interior del cilindro:

- Diámetro interior del cilindro

$$D_i = D + 2 * \delta \quad (9)$$

Donde:

$D$ : Diámetro del husillo [mm]

$\delta$ : Holgura [mm]

Calculamos y obtenemos los siguientes datos:

$$D_i = 16,16 + 2 * 0,08$$

$$D_i = 16,16 \text{ [mm]}$$

La longitud del cilindro debe cubrir la zona útil del husillo, por lo que tendrá un largo de 330 [mm] mínimo. Para el espesor mínimo que debe tener el cilindro que soporta las presiones, se debe conocer el material del cilindro. Para ello, se seleccionó un acero AISI 316, con un esfuerzo admisible del material de 205 [MPa]. Por lo tanto, el espesor mínimo debe ser:

$$e_{min} = \frac{P * r}{\sigma_{adm}} \quad (10)$$

Donde:

$P$ : Presión máxima de trabajo [MPa]

$r$ : Radio interior cilindro [mm]

$\sigma_{adm}$ : Esfuerzo admisible del material [mm]

$$e_{min} = \frac{31,58 * 8,08}{205}$$

$$e_{min} = 1,24 \text{ [mm]}$$

La geometría del cilindro tiene 2 espesores y el espesor de la pieza del cilindro es de 6,92 [mm] El espesor de pared de la pieza roscada depende del paso de rosca. Serían tonos demasiado sutiles. 5,5 [mm] para paso grueso, de ahí el factor de seguridad será:

$$FS_{clin} = 5,5 \text{ [-]}$$

$$FS_{pf} = 4,4 \text{ [-]} \quad (11)$$

$$FS_{pg} = 3,5 \text{ [-]}$$

#### 4.4.2. Selección del material

El cilindro es el componente que transfiere calor al material del interior y se encarga de mantener la presión generada en el interior del eje. El cilindro debe ser lo suficientemente fuerte para soportar alta presión, soportar efectos térmicos, soportar temperaturas de hasta 400 [°C] y ser suficientemente resistente al desgaste y la corrosión [23].

Parámetros para la selección del material:

- Disponibilidad y fabricación.
- Resistencia al desgaste y corrosión.
- Temperaturas de trabajo.
- Precio.

Debido a ello, se eligió un acero AISI 316, el cual ofrece las consideraciones anteriores. El acero seleccionado posee una excelente resistencia a la corrosión, con una buena resistencia a oxidación. Por sus características, responde a las temperaturas de trabajo presentes en la extrusora, sin perder sus propiedades. Es un acero de fácil adquisición y con una buena maquinabilidad.

##### 4.4.2.1. Selección del cilindro

Con base en la geometría descrita se seleccionó un acero AISI/SAE 316 comercial. Es una barra de 50 [mm] de diámetro, con una longitud de 500 [mm]. La Figura 3.2 muestra un modelo de cilindro.



Figura 4.16. Cilindro acero AISI 316

## 4.5. DISEÑO TOLVA DE ALIENTACION

### 4.5.1. Dimensionamiento

Para el diseño de la tolva con forma de un prisma rectangular, que se adapta a la base de la extrusora para poder ser retirada fácilmente y a su vez, extensible. Su base será de 7,2 x 9,4 [cm] y una altura de 10 [cm]. Con ello, se procese a calcular el volumen total de la tolva y los gramos capaces de contener.

Fórmula para el volumen rectangular:

$$V_{tolva} = a * b * h \quad (12)$$

Donde:

*a*: Cateto "a" [mm]

*b*: Cateto "b" [mm]

*h*: Altura del prisma [mm]

calculando tenemos:

$$V_{tolva} = 64 * 90 * 100$$

$$V_{tolva} = 576000 [mm^3]$$

Para el volumen de un pallet será la misma de un volumen de prisma rectangular mediante la siguiente formula:

$$V_{pellets} = a * b * h \quad (13)$$

Donde:

*a*: Cateto "a" [mm]

*b*: Cateto "b" [mm]

*h*: Altura del prisma [mm]

Si asumimos las dimensiones máximas de cada pallet, el cateto a es de 3 [mm], el cateto b es de 3 [mm] y la altura es de 16 [mm], entonces el volumen es:

$$V_{pellets} = 3 * 3 * 10 \quad (14)$$

$$V_{pelle} = 144 [mm^3]$$

Capacidad de la tolva a contener será:

$$Pellets \text{ en tolva} = \frac{V_{tolva}}{V_{pellets}} \quad (15)$$

$$Pellets = 4000 \text{ [unidades]}$$

El peso por unidad de un pellet de PLA será:

$$Peso_{PLA} = \rho * V_{pellets} \quad (16)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del PLA [ $kg/mm^3$ ]

$V_{pellets}$ : Volumen de un pellet de PLA [ $mm^3/kg$ ]

Por lo tanto:

$$Peso_{PLA} = 1,25 * 10^{-6} * 144 \quad (17)$$

$$Peso_{PLA} = 0,0001512 \frac{kg}{u}$$

Calculo para gramos de pellets de PLA para llenar la tolva mediante la ecuación:

$$Gramos_{PLA} = Peso_{PLA} * Pellets \text{ en tolva} \quad (18)$$

$$Gramos_{PLA} = 0,00018 * 4000$$

$$Gramos_{PLA} = 0,72 \text{ [kg]}$$

La autonomía de operación dependerá de la tolva llena mediante el flujo másico a procesar, por lo tanto, será para una boquilla de 1,75 [mm] y otra para 3 [mm].

$$Autonomía_{Dímetro \text{ Boquilla}} = \frac{V_{tolva}}{Q_{másico-Dímetro \text{ Boquilla}}}$$

Donde:

$Q_{másico-Dímetro \text{ Boquilla}}$ : Flujo volumétrico de acuerdo a la boquilla [ $mm^3/min$ ]

Por lo tanto, es:

$$Autonomía_{1,75} = \frac{576000}{6044,5}$$

$$Autonomía_{1,75} = 95 \text{ [minutos]}$$

$$Autonomía_3 = \frac{576000}{13224,7}$$

$$Autonomía_3 = 44 \text{ [minutos]}$$

#### 4.5.2. Selección del material

La tolva es la que alimenta de pellets el husillo. Es necesario introducir la materia prima a una velocidad constante libre obstrucciones y que sea fácil de removerla. Para el diseño de dicha tolva, se toman las siguientes características:

- Peso
- Tamaño de apertura
- Forma
- Conexión

Para su fabricación se eligió una plancha de 1220x500mm en 5mm de espesor en acero al carbón de serie ASTM A36 del catálogo de DIPAC, por sus buenas propiedades mecánicas, este acero es utilizado en aplicaciones estructurales.

Tipo de material	Resistencia a la tensión			Espesor (mm)
	ksi	Fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	
ASTM A36	36	250	400	2 a 12

Figura 4.17. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

## 4.6. DISEÑO DE LA BOQUILLA

### 4.6.1. Dimensionamiento

Para el espesor mínimo que deben tener las boquillas para soportar la presión de trabajo, se debe conocer el material de este. Para ello, de acuerdo a la selección de material, se utiliza Latón 360, con un esfuerzo admisible del material de 310 [Mpa]. El caso crítico, es cuando hay un menor espesor de pared en la boquilla, esto se dará en la entrada de la boquilla, con 16,16 [mm] de diámetro interior. Por lo tanto, el espesor mínimo que se debe considerar será:

$$e_{min} = \frac{P*r}{\sigma_{adm}} \quad (19)$$

Donde:

$P$ : Presión de operación [MPa]

$r$ : Radio interior mayor de la boquilla [mm]

$$e_{min-1,75} = \frac{6,72 * 8,08}{310}$$

$$e_{min-1,75} = 0,17 [mm]$$

#### 4.6.2. Selección del material

La función de la boquilla es llevar PLA a través de la cámara, para dar forma al material a la salida. Al seleccionar el material de la boquilla, dos parámetros son importantes:

- Simplicidad en el mecanizado
- Conductividad térmica

Para ello, se eligió utilizar una boquilla de Latón por su simplicidad en el mecanizado y conductividad térmica elevada (en comparación a un acero). El latón es un muy buen conductor térmico, presenta resistencia a la corrosión y una excelente maquinabilidad. La temperatura en la boquilla debe ser controlada de tal manera que el material no se solidifique en su interior, pero tampoco permita que la mezcla tarde mucho tiempo en enfriarse a su salida. En la Figura 55 se puede ver una representación de la boquilla y su forma.

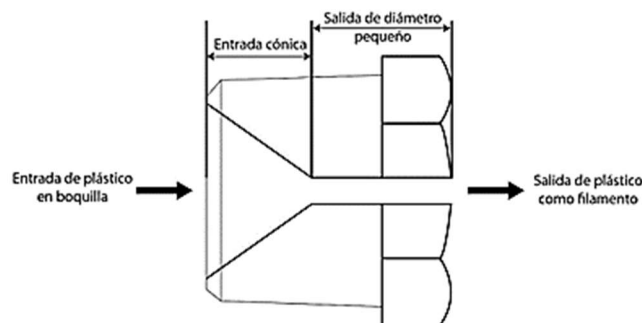


Figura 4.17. Diagrama geométrico de la boquilla

La conexión de la boquilla al cilindro es a través de roscas externas para facilitar la conexión a la cámara roscada del cilindro a través de una junta para que la boquilla se pueda desmontar fácilmente para su limpieza y reemplazo.

#### 4.6.3. Selección de la boquilla

Mediante la geometría descrita, se elige una barra de Latón 360 del distribuidor Acemet. Se trata de una barra de 30 [mm] con un largo de 100 [mm].

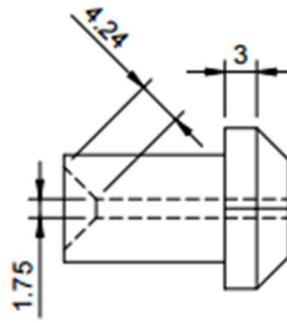


Figura 4.18. Modelado Fusión 360 boquilla extrusora

#### 4.6.4. Diseño del sistema de calefacción

#### 4.6.5. Dimensionamiento

El sistema de calentamiento del extrusor será proporcionado por un calentador de tipo banda. Esta banda deberá un diámetro interior al tamaño del cilindro (30 [mm]) para poder calentar el material. De acuerdo a los requerimientos para seleccionar la banda adecuada, es necesario realizar cálculos de transferencia de calor para simular el problema. En la Figura 57 se muestra un modelo simplificado del elemento calefactor. Para el diseño, se hizo un supuesto que el flujo de calor es un flujo unidimensional, con un régimen estacionario y sin aislamiento.

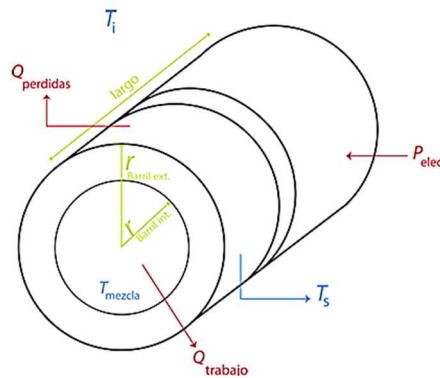


Figura 4.19. Modelo Simplificado Del Cilindro y el sistema de calefacción

Para calcular la potencia necesaria de la banda, se debe tener en cuenta la velocidad de extrusión, la cual cambiará de acuerdo al tipo de material a trabajar, en este caso será el PLA y la boquilla a utilizar. Utilizando las velocidades de extrusión de la boquilla y la sección transversal de ella y el cilindro, se calculó la velocidad al interior del cilindro. Para ello se utilizó:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (20)$$

Donde:

$A_1$ : Área de la sección transversal de la boquilla [ $mm^2$ ]

$V_1$ : Velocidad del flujo en la boquilla [ $m/s$ ]

$A_2$ : Área de la sección transversal del cilindro [ $mm^2$ ]

$V_2$ : Velocidad del flujo en el cilindro [ $m/s$ ]

Por lo tanto:

Tabla 4.9. Velocidad de flujo del cilindro para la boquilla

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D-1,75}$	Velocidad en cilindro con boquilla de 1,75 [mm]	$3,27 * 10^{-10}$	m/s

Mediante la velocidad dentro del cilindro, se calculó el flujo masico del material dentro del cilindro, utilizado 17.

$$\dot{m} = \rho * A_{cilindro} * V_{cilindro} \quad (21)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del material a trabajar [ $kg/m^3$ ]

$A_{cilindro}$ : Área de la sección transversal del cilindro [ $mm^2$ ]

$V_{cilindro}$ : Velocidad del flujo en el cilindro [ $m/s$ ]

Por lo tanto, será:

Tabla 4.10. Resultado del flujo masico en el cilindro con boquilla

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$\dot{m}_{PLA-1,75}$	Flujo masico de PLA en cilindro con boquilla de 1,75 [mm]	$8,395 * 10^{-5}$	kg/s

En la Figura 4.7 representa esquemáticamente el modelo a desarrollar. Como se puede ver, la potencia eléctrica que debe entregar el calentador debe ser igual a la potencia requerida para fundir la mezcla (de trabajo) más las pérdidas que existen en el ambiente (de convección y radiación).

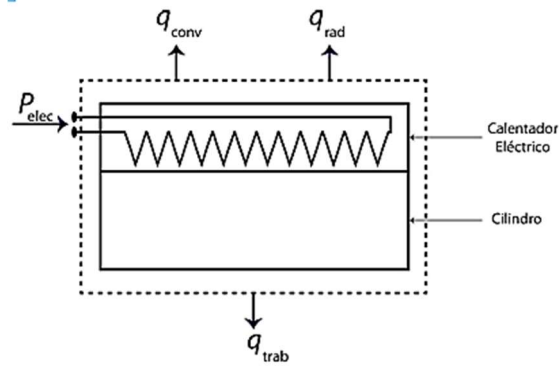


Figura 4.20. Esquema del sistema de calefacción [17]

Para encontrar la potencia necesaria que debe entregar la banda, se utiliza:

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perdidas} \quad (22)$$

Donde:

$q_{elec}$ : Potencia que entrega el calentador eléctrico [W]

$q_{conv}$ : Potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W]

$q_{rad}$ : Potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W]

$q_{trabajo}$ : Potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W]

$q_{perdidas}$ : Potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W]

#### 4.6.6. Diseño del sistema de refrigeración

#### 4.6.7. Dimensionamiento

En el sistema de refrigeración del extruido se empleará un ventilador para enfriar mediante convección forzada. Este proceso busca reducir la temperatura al salir de la boquilla para evitar la dilatación adicional del filamento, minimizar las variaciones en el diámetro final y mejorar la calidad del producto. La temperatura objetivo debe estar por encima de la temperatura de transición vítrea del material; por debajo de esta, el polímero se volvería rígido y frágil, mientras que por encima es más blando y flexible, una propiedad crucial para el correcto funcionamiento del sistema Puller de la extrusora.

#### 4.6.8. Selección del sistema de refrigeración

Para determinar la temperatura de salida del filamento después de pasar por un ventilador, se selecciona un ventilador de 60x60x10 mm, cuyas características se detallan en el anexo 10.12.

Dado que la extrusora cuenta con dos boquillas y se trabaja con dos materiales diferentes, la temperatura final variará en cada caso.

Primero, es necesario calcular el coeficiente de transferencia de calor en convección forzada del aire que actúa sobre el filamento. Para ello, se deben conocer el número de Prandtl (que relaciona la convección forzada y natural), el número de Reynolds (que caracteriza el movimiento de un fluido) y el número de Nusselt (que representa la transferencia de calor por convección forzada).

El número de Prandtl se obtiene en función de las características del aire a una temperatura de 100 °C y a presión atmosférica. El número de Reynolds se calcula utilizando la fórmula proporcionada en la referencia [17].

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (23)$$

Donde;

$V$ : Flujo de aire del ventilador [m/s]

$D$ : Diámetro del filamento [m]

$\nu$ : Viscosidad cinemática del aire [m<sup>2</sup>/s]

Tabla 4.11. Resultado de Reynolds para el diámetro del filamento

Variable	Descripción	valor
$Re_{D-1,75}$	Reynolds en boquilla de 1,75 [mm]	366,5

Utilizando los números de Reynolds y Prandtl, así como las características del aire presentadas en la Tabla 4.8, se procede a calcular el número de Nusselt para los distintos diámetros mediante la fórmula [18]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{4/5} \quad (24)$$

Donde:

$Re$ : Número de Reynolds [-]

$Pr$ : Número de Prandtl [-]

Cada resultado obtenido se puede visualizar en la tabla 31

Tabla 4.12. Propiedades del aire a  $T = 100[^\circ\text{C}]$

Variable	Descripción	Valor	Unidad
K	Conductividad térmica del aire	0,03162	$W/mK$
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire	$2,32 * 10^{-5}$	$m^2/s$
Pr	Número de Prandtl	0,7003	-

Tabla 4.13. Resultado obtenido mediante el diámetro del filamento

Variable	Descripción	Valor
$Nu_{D-1,75}$	Nussels con Boquilla de 1,75 [mm]	9,66

Mediante los cálculos obtenidos procedemos a calcular el coeficiente de convección:

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (25)$$

donde:

$Nu$ : Número de Nusselt [-]

$k$ : Conductividad térmica del aire [ $W/mK$ ]

$D$ : Diámetro filamento [ $m$ ]

Tabla 4.14. Resultados del coeficiente de transferencia del aire para el filamento

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$h_{D-1,75}$	Coficiente de convección con Boquilla de 1,75 [mm]	174,6	$W/m^2K$

Mediante la conservación de la energía de un volumen estacionario, se puede calcular la temperatura de acuerdo a su posición:

$$pV_e A_c c_p T - pV_e A_c c_p (T + dT) - dq_{conv} = 0 \quad (26)$$

$$-pV_e \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) c_p T - \pi D dx [h(T - T_\infty)] = 0$$

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{4}{pV_e D c_p} [h(T - T_\infty)]$$

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{(T - T_\infty)} = - \frac{4h}{pV_e D c_p} \int_0^x dx$$

$$T = T_{\infty} + (T_0 + T_{\infty})e^{-\frac{4h}{\rho V_e D c_p}}$$

Donde:

$T_{\infty}$ : Temperatura ambiente [–]

$T_0$ : Temperatura de salida del filamento [W/mK]

$h$ : Coeficiente de convección [W/m<sup>2</sup>K]

$\rho$ : Densidad del material [Kg/m<sup>3</sup>]

$V_e$ : Velocidad de salida del filamento de la boquilla [m/s]

$D$ : Diámetro filamento [m]

$C_p$ : Calor específico material [J/Kg°C]

Tabla 4.15. Temperatura del filamento al pasar por el ventilador

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$T_{D-1,75}$	Temperatura a los 12 [cm] desde la salida de la boquilla de 1,75 [mm] para el PLA	115	°C

Con base en el dimensionamiento del sistema de refrigeración, se seleccionó el ventilador modelo 6010HH12C EC del distribuidor EverCool, este ventilador de alto rendimiento tiene unas dimensiones de 60x60x10 mm, opera a 4800 RPM y funciona con corriente continua de 12 V.



Figura 4. 21. Ventilador EverCool [24]

Los detalles del ventilador seleccionado, que forma parte del sistema de refrigeración, están disponibles en el anexo. El modelo representativo y el ensamblaje del elemento pueden consultarse en el montaje de las piezas.

#### 4.7. DISEÑO DEL REPARTIDOR DEL FILAMENTO

##### 4.7.1. Dimensionamiento

El sistema de distribución del filamento se encarga de enrollar el filamento en carretes. Para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, es necesario considerar varios parámetros. A continuación, en la tabla 4.16, se presentan los parámetros relevantes del sistema:

Tabla 4.16. parámetro de distribución del filamento

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$V_{D-1,75}$	Velocidad de Salida con Boquilla de 1,75 [mm]	0,0418	m/s
$D_{int-carrete}$	Diámetro Interior del carrete	65	mm
$D_{ext-carrete}$	Diámetro exterior del carrete	200	mm
$Rho_{PLA}$	Densidad PLA	1250	$Kg/m^3$

Según las características del carrete, el largo interior disponible para enrollar el filamento es de aproximadamente 54 mm. Por lo tanto, el número de vueltas necesarias para llenar longitudinalmente el carrete dependerá de la boquilla utilizada. La fórmula aplicada para este cálculo es:

$$Vueltas_{necesarios} = \frac{L_{i-carrete}}{D_{boquilla}}$$

Donde:

$L_{i-carrete}$ : Largo interior del carrete [mm]

$D_{boquilla}$ : Diámetro de la boquilla [mm]

Tabla 4.17. Numero de vueltas necesarias para llenar el carrete

Variable	Descripción	Valor
$Vueltas_{D-1,75}$	Vueltas necesarias con Boquilla de 1,75 [mm]	31

La longitud requerida de cada material para producir un kilogramo de plástico variará en función de la boquilla y el tipo de material utilizado. Para este cálculo, se empleó la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow L = \frac{4m}{\pi D^2 \rho} \quad (27)$$

Donde:

*m*: Masa de filamento necesario (1) [Kg]

*D*: Diámetro del filamento [m]

*ρ*: Densidad del material [Kg/m<sup>3</sup>]

Tabla 4.18. longitud necesaria del material, acuerdo a la boquilla

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$longt_{D-1,75}$	Longitud necesaria para un Kilogramo de PLA con una Boquilla de 1,75 [mm]	333	m

Para determinar la velocidad a la que debe moverse el repartidor, es necesario conocer el tiempo que se tarda en completar cada pasada, según la longitud total requerida. Esto dependerá del número de vueltas necesarias para llenar el carrete y el perímetro de cada pasada. Se calculó el perímetro interior del carrete y, a partir de esto, los milímetros de filamento necesarios para cada vuelta, que se muestran en las Tablas 4.17 y 4.19 Con los tiempos obtenidos, se calcula un promedio para cada boquilla y tipo de plástico. Los resultados se presentan en la Tabla 4.16.

Tabla 4.19. Tiempo promedio

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$Tiempo_{D-1,75}$	Tiempo promedio del PLA con una boquilla de 1,75 [mm]	329	s

#### 4.8. VALIDACIÓN DE COMPONENTES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Se considera los elementos más importantes de la máquina trituradora de plásticos PET, de modo que con el apoyo del Softwares CAD - CAE como Autodesk Fusion 360 y ANSYS que permitan analizar cada pieza diseñada en 3D.

## 4.8.1. Simulación del uso de Software Autodesk Fusion 360

### 4.8.1.1. Cuchilla en Acero ASTM A36

Para cualquier proceso de diseño y construcción, es esencial emplear un simulador de análisis de materiales. En este caso, se utilizó el software Autodesk Fusion 360 para evaluar la cuchilla, aplicando una fuerza de corte en los filos del componente. En la figura siguiente, se detalla la Tensión de Von Mises que soportará el filo de las cuchillas. La tensión máxima alcanzada es de 122,15 MPa, lo que excede significativamente la resistencia a la tracción de la botella, que es de 70 MPa. En este contexto, se considera el límite de fluencia del material utilizado (ASTM A36) para la fabricación de las cuchillas.

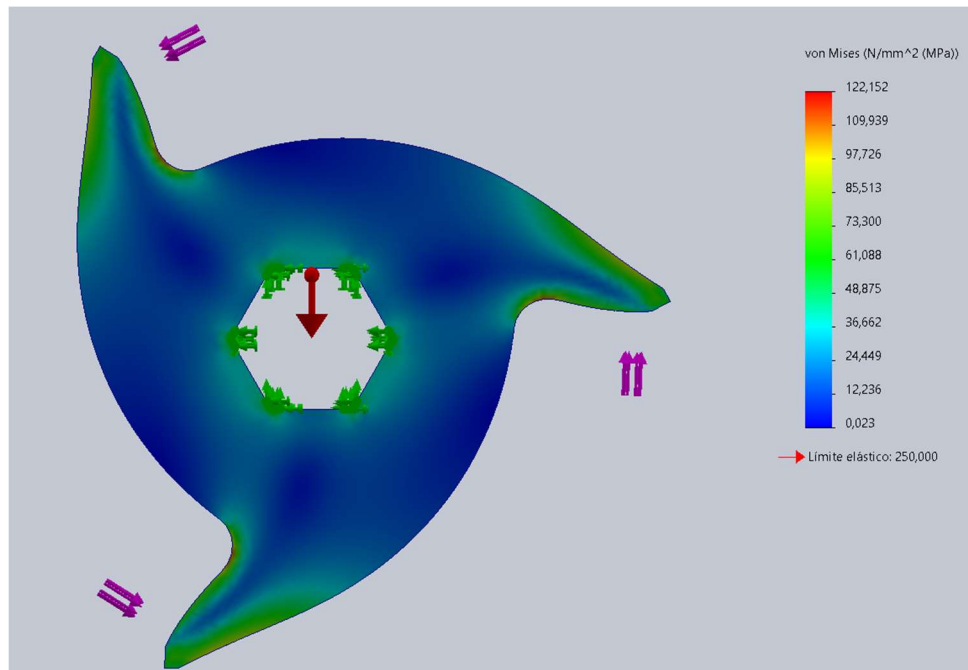


Figura 4.22. Tensión de Von Mises (MPa) en los 3 dientes de la cuchilla

### 4.8.1.2. Factor de Seguridad

Como se puede observar en la figura 5.35, la cuchilla prácticamente soporta la fuerza ingresada después del cálculo realizado, también se puede verificar que el material elegido es el adecuado y que cumple con los parámetros de diseño. Por otra parte, dentro del software se puede visualizar el factor de seguridad de la cuchilla a fin de demostrar que esta cumpla con el factor mínimo de seguridad de una máquina o una herramienta.

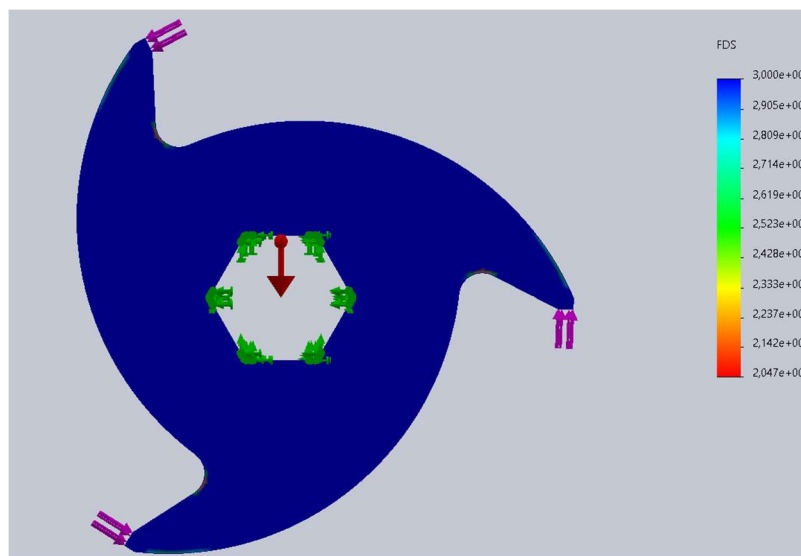


Figura 4.23. Factor de Seguridad (FDS:2)

#### 4.8.1.3. Eje de Trituración Acero AISI 1018

Otro elemento que está en análisis será las paredes de impacto donde la fuerza y torque que ejerce el motor ante las piezas chocaran en las paredes de modo que esta soportase la misma carga que los dientes de las cuchillas con la misma fuerza que se calculó antes. En los ejes de trituración se aplicará una carga puntual, de modo que cada eje está distribuido por 12 cuchillas. al analizar el material (AISI 1018) el eje no tendrá deformaciones.

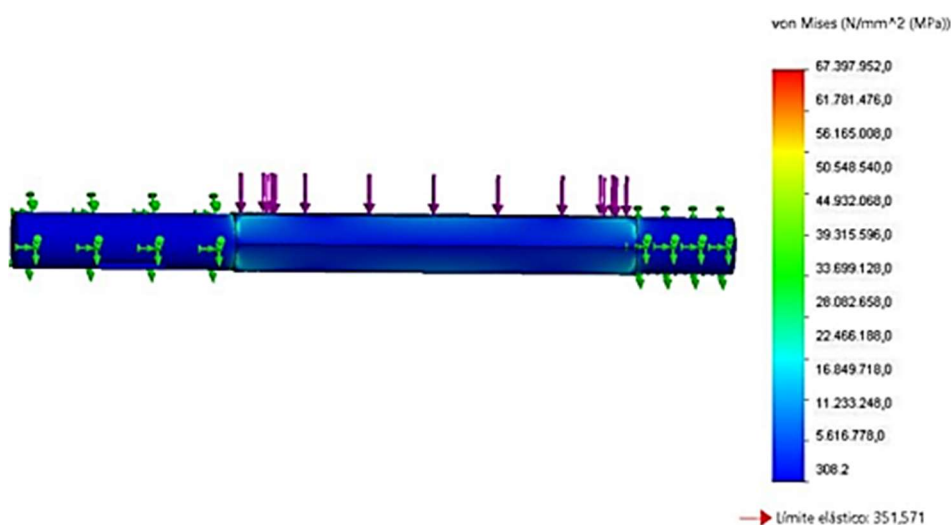


Figura 4.24. Esfuerzos de Von Mises (MPa) del eje de trituración

#### 4.8.1.4. Tensión del tornillo

Considerando la carga que se genera en el husillo de 80 N. se realizó el análisis de elementos finitos obteniendo la tensión de Von Mises como se observa en la figura.

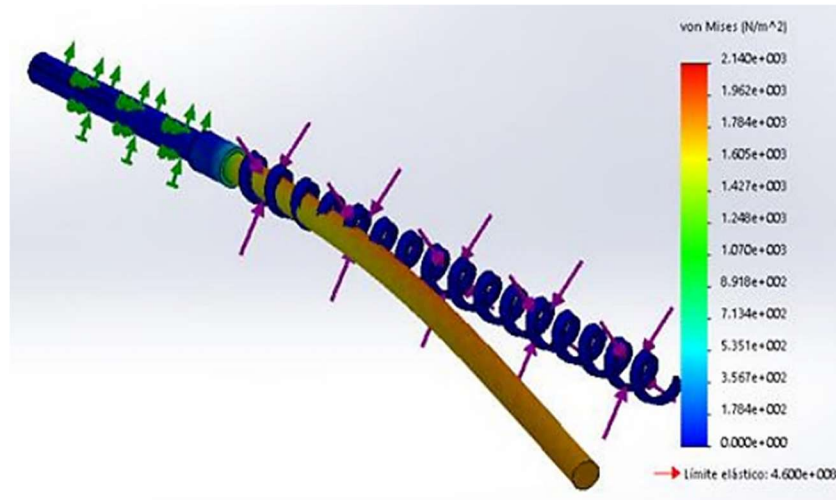


Figura 4.25. Tensión de Von Mises

#### 4.8.1.5. Estructura base Acero ASTM A36

##### Tensión de Von Mises

La estructura estará sometida a una carga puntual de 477.26 N que estará distribuida por toda la estructura y por una gravedad de 9,81m/s<sup>2</sup>. Esta estructura se fabricó en un tubo cuadrado de acero estructural ASTM A36. En la siguiente figura se evidencia que la estructura que será imperceptible a las vibraciones y esfuerzos.

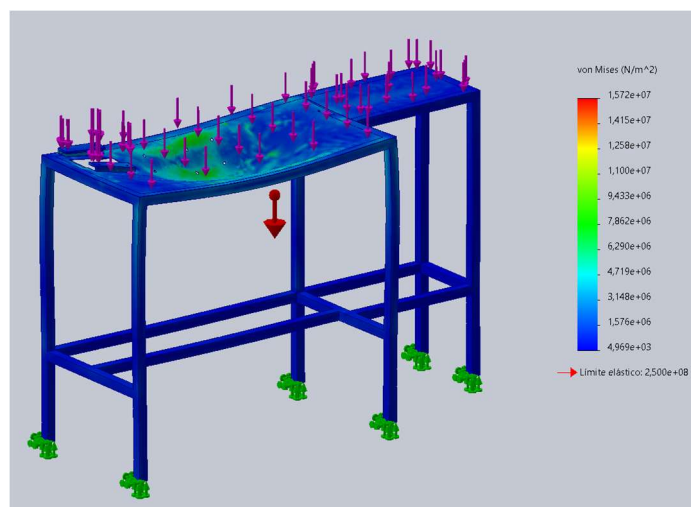


Figura 4.26. Tensión resultante del análisis de la mesa

Como se puede observar en la simulación por elementos finitos el diseño de la mesa cumple con los parámetros de diseño por lo que se procede a la construcción de la mesa para acoplar toda la maquinaria, y poder empezar con las pruebas de funcionamiento y con la colocación del sistema de control.

#### 4.9. DISEÑO CONTROL ELECTRONICO

Para el diseño de control electrónico se tiene como parámetros de entrada la manipulación del motor así las variables de temperatura, dimerización de las resistencias eléctricas, recolección de la materia prima creada, dando como resultado un filamento de reciclaje 3D. el conjunto de materiales seleccionados para este proceso se lo representa en un diagrama donde se visualizará la forma de trabajar del conjunto de materiales.

Este proceso se lo controlara a través de una pantalla Nextion junto con elementos externos tales como potenciómetros, paros de emergencia, botones de encendió general, etc. Como se menciona en capítulos anteriores el control se lo realizara a través de Arduino mega el mismo que ayudara a conectar todos los sensores y actuadores que forman parte del control de temperatura del extrusor.

Cuando se habla de la pantalla Nextion se tiene una interfaz gráfica en donde se visualizará los procesos de calentamiento de cada una de las resistencias, así como un proceso general del sistema.

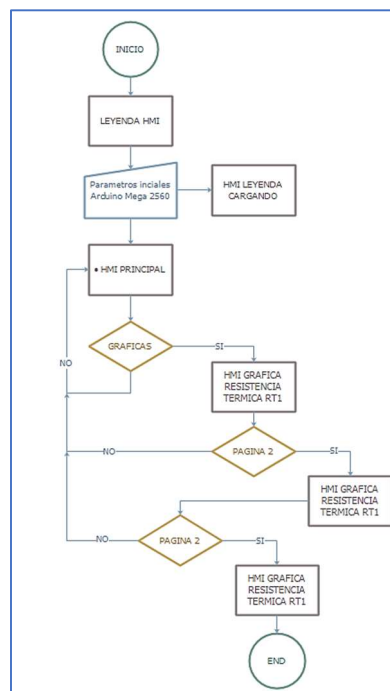


Figura 4.27. DFD interfaz gráfica pantalla NEXTION

Se detalla los pasos que realiza la pantalla Nextion antes de ingresar a la pantalla principal o de control, adicionalmente se tiene de tres pantallas auxiliares en donde se puede visualizar las gráficas de temperatura a la que tiene que llegar los sensores de temperatura después de que se ajuste la temperatura necesaria que deben brindar las resistencias eléctricas para que el nivel trabaje de forma adecuada.

También se dispone cuadros informativos dentro de la pantalla Nextion en la parte superior los denominados con los nombres T1, T2, T3, serán las lecturas adquiridas de las termocuplas o sensores de temperatura. Los nombres RT1, RT2, RT3, serán los valores de temperatura que deben alcanzar las bridas térmicas o denominados SetPoint.

Adicionalmente dentro de la pantalla Nextion se dispondrá de un cuadro de texto donde se visualice en que proceso se encuentra trabajando la máquina de modo que nos indicará si la misma se encuentra en la parte de triturado, extruido o detenido el proceso a través de un mensaje de stop.

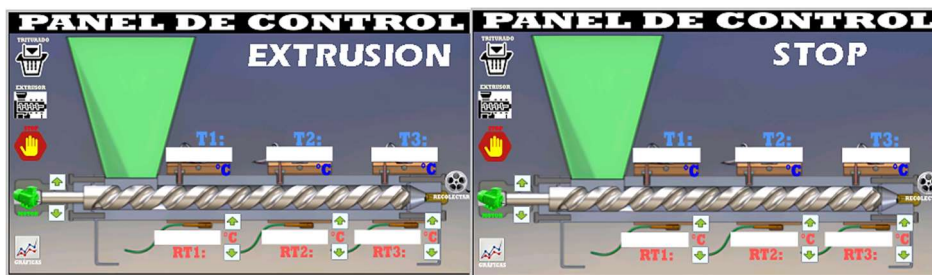


Figura 4.28. Cuadro de visualización del proceso de extrusión

El funcionamiento de la pantalla también se lo puede traducir como un diagrama de flujo en donde se puede visualizar cómo funciona la pantalla cuando ingresa a trabajar cada una de las opciones que forman parte de la pantalla.

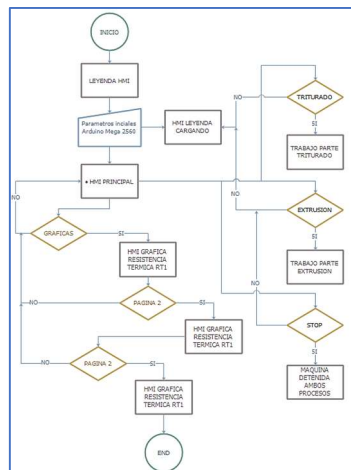


Figura 4.29. DFD del funcionamiento de la pantalla en cada uno de los procesos

Para la parte de programación se usó como base al microcontrolador Arduino Mega 2560, puesto que este por sus números de pines, así como por los protocolos de comunicación que maneja ayudan al trabajo de las variables de forma óptima. Como se trabaja con termocuplas y estas deben comunicarse a través de protocolo SPI, es necesario el uso de tres pines en cada una de estas variables, también para la dimerización de la resistencias térmicas se usara pines de salida PWM, de modo que se pueda realizar el disparo de forma adecuada esto con el fin de controlar la onda alterna que saldrá de cada uno de los dimmer, también se necesitara un pin de control pwm, para el control del motor a través del microcontrolador, de modo que la velocidad del motor llegara al 100% cuando la salida del PWM de un valor de 255 bits, por contrario se apagara totalmente el motor o llegue 0% cuando la salida de PWM nos arroje un valor de 0 bits. Para el trabajo del motor nema 17 el encargado de realizar la recolección del filamento conforme vaya saliendo se usará pines digitales de modo que mediante una configuración entre las señales de salida de como resultado la manipulación de la velocidad a la que necesite la recolección. Al igual que con la pantalla Nextion se puede traducir la programación y el funcionamiento del microcontrolador a través de un diagrama de flujo.

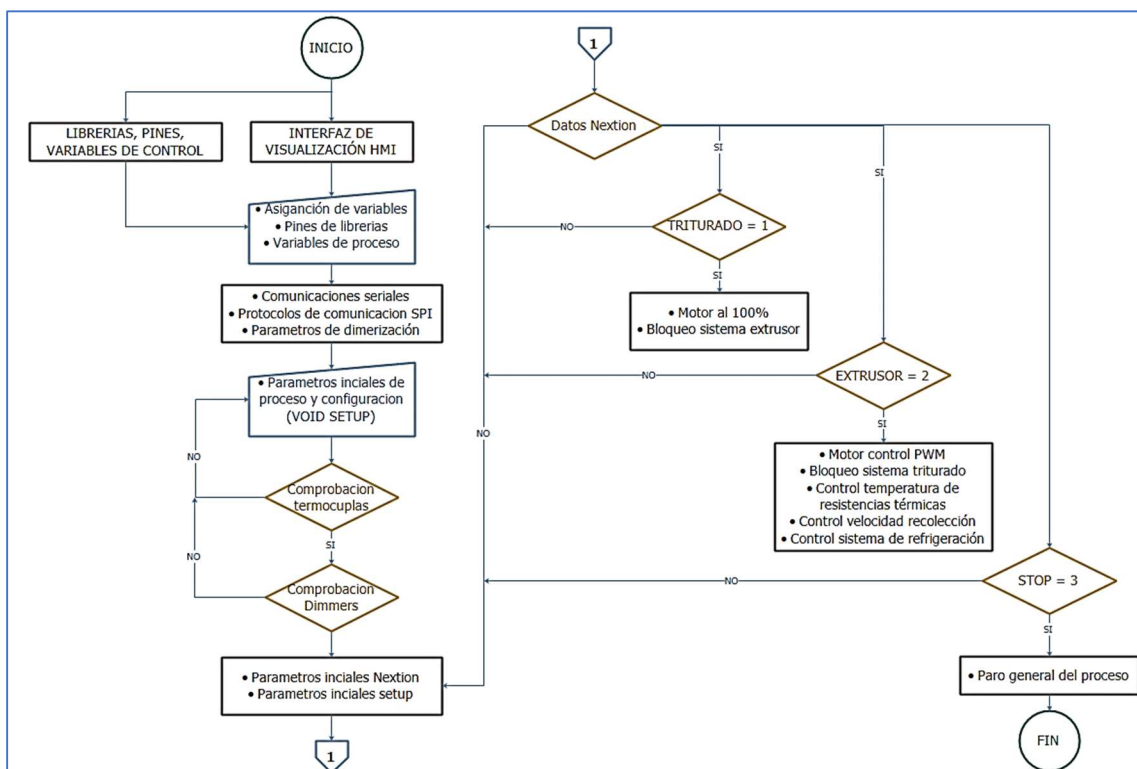


Figura 4.30. Diagrama de flujo del proceso de triturado y extruido

Puesto que el proceso de triturado lo único que se necesita es la velocidad del motor al 100%, al momento de dar marcha a esta opción se lograra que las demás funciones queden bloqueadas

a excepción de la función de paro general, esto con el fin de suscitarse algún desperfecto se pueda bloquear el funcionamiento de la máquina.

Para el proceso de extrusión se debe tener en cuenta varios aspectos, puesto que en este proceso se controla todas las variables que conforman el sistema de control por lo que el funcionamiento de este ciclo se lo realizara a través de un diagrama de flujo.

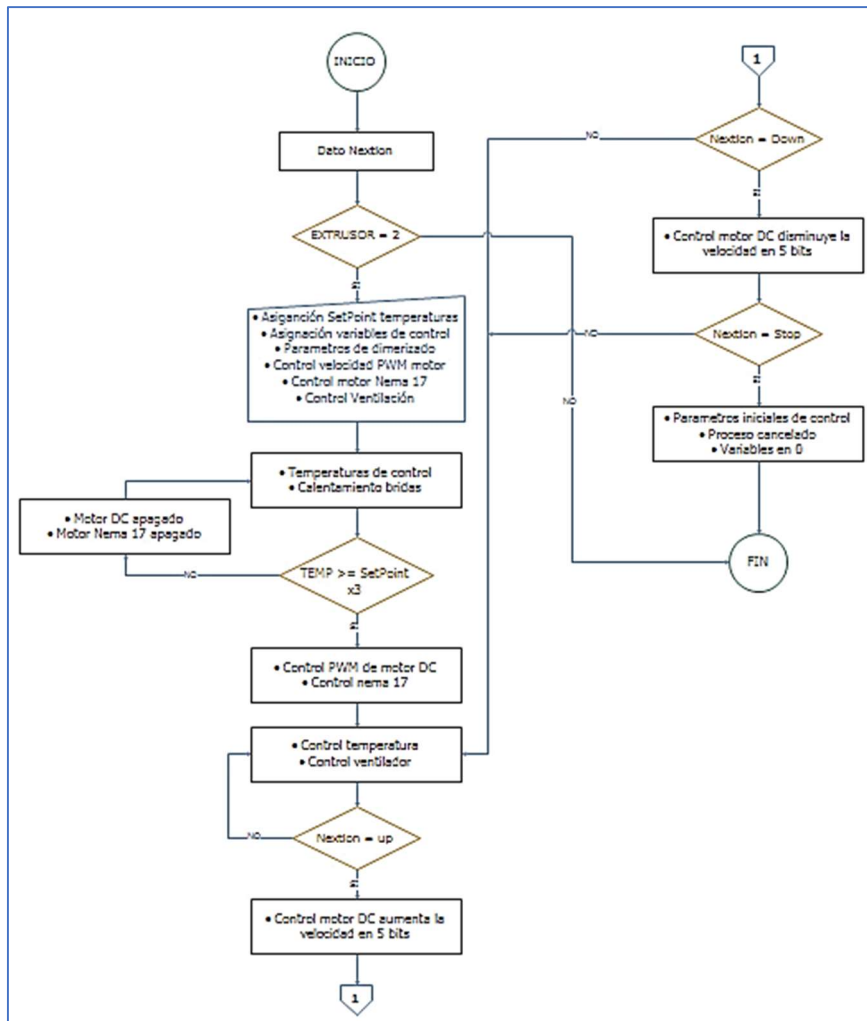


Figura 4.31. Diagrama de subproceso de extrusión

El subproceso de extrusión es el más complejo puesto que aquí se controlan todas las variables de resistencia eléctrica la adquisición de temperatura, el control de la velocidad de arrastre del motor nema 17, el flujo de ventilación, también un parámetro a tomar en cuenta es el control de la temperatura a través de control PID, de modo que el sobre impulso de calentamiento hace que la temperatura llegue más rápido al punto de control y se mantenga estable durante todo el proceso de extrusión.

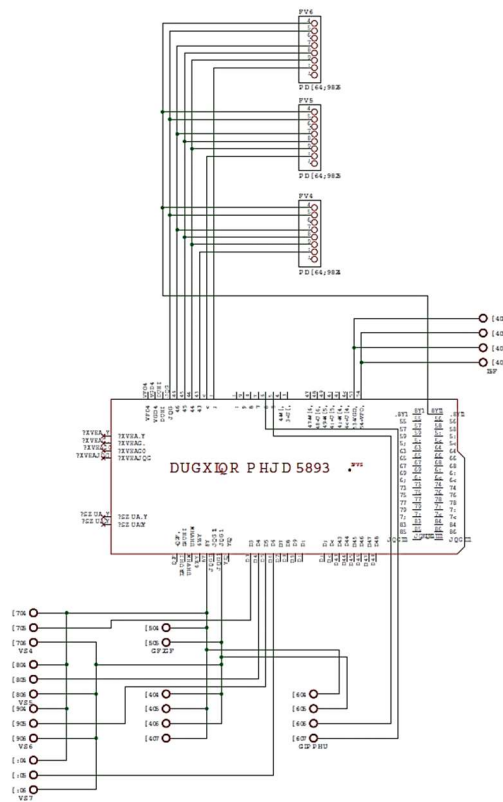


Figura 4.32. Grafica de la distribución de pines de control de maquina

se puede apreciar el diagrama unifilar de conexiones que tendrá el Arduino mega, así como también los elementos que se conectarán a través de conectores o borneras, también se tiene como módulos de instalación a los max6675 que formaran parte del proceso. Dentro del software también se puede observar el diseño de la placa en la construcción de los elementos, así como también la serigrafía que tendrá la placa al momento de la instalación de los elementos esto con el fin de ubicarlos de manera correcta dentro de la placa.

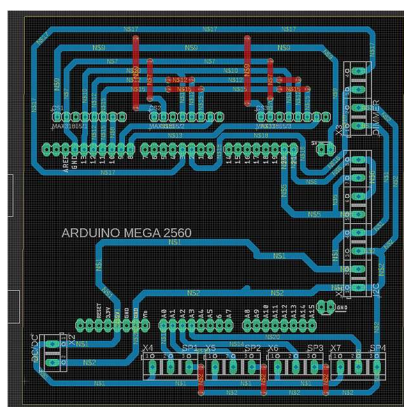


Figura 4.33. Visualización de las pistas de la placa que controlara la máquina

Una vez se tiene el diseño de la placa se procede con la construcción, para esto se usó construcción de PCB a través de procesos de mecanizado CNC. De modo que después se procede a soldar los elementos de control y se procede a probar el sistema creado.

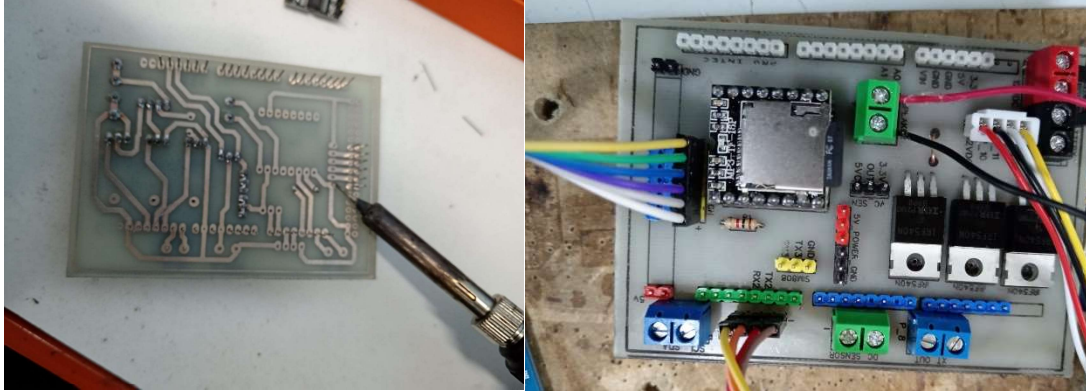


Figura 4.34. Suelda de los elementos en la placa creada

Para la instalación del sistema eléctrico primero procedemos a la instalación de las bridas resistivas esto basándonos en la simulación de temperatura que se aplicó a través de elementos finitos, de modo que se pueda aprovechar bien la temperatura de todo el extrusor para que el filamento sea uniforme.

#### **4.10. IMPLEMENTACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE PRUEBAS INICIALES**

Se realizarán pruebas piloto para determinar la viabilidad del proceso y ajustar los parámetros iniciales. Se medirán la calidad del filamento producido y se ajustarán las temperaturas y velocidades de extrusión en función de los resultados.

##### **4.10.1. Optimización del Proceso**

Basado en los resultados iniciales, se implementarán ajustes para optimizar la calidad y consistencia del filamento. Esto incluirá la modificación de las temperaturas de extrusión, la velocidad de avance del filamento, y la capacidad de enfriamiento.

##### **4.10.2. Validación del Filamento**

El filamento reciclado se evaluará mediante pruebas mecánicas (resistencia a la tracción) y pruebas de calidad de impresión para asegurar que cumple con los estándares requeridos para aplicaciones de impresión 3D.

También se probó la extrusora con valores de temperatura muy altos a fin de comprobar cuál es el resultado con respecto a los valores nominales de temperatura para un plástico PLA, esto

ocasiono una sobre fundición de la materia a punto de quemarse y salir de forma líquida de la extrusora.

#### 4.11. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE TRITURACION

Los diseños aplicados dan como resultado una máquina trituradora de piezas obsoletas y soportes de impresión 3D, una vez verificado que los materiales y las dimensiones aplicadas cumplen con todos los parámetros del diseño se procede a la construcción del trituradora, para esto se usa la manufactura de los elementos a través de cortes por plasma.

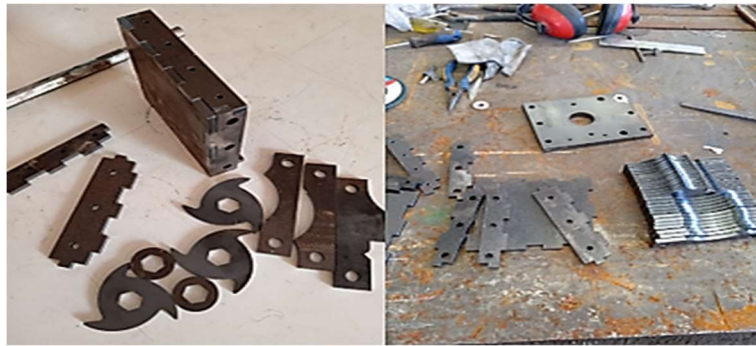


Figura 4.35. Elementos de la máquina cortados a través de CNC plasma

Después de realizado los cortes se procede al ensamble de las piezas y proceder a aplicar soldadura a las piezas que lo ameriten y a las demás el ajuste necesario para que la misma trabaje. En el eje se montarán las cuchillas y los separadores a fin de comprobar que el eje si cumple y que trabaja de manera adecuada.



Figura 4.36. Colocación de las cuchillas y separadores

Después de esta comprobación por último se procede al ensamble total de la máquina de triturado y comprobar que los elementos no choquen entre sí y que los mismos cumplan con los parámetros establecidos dentro del diseño creado.

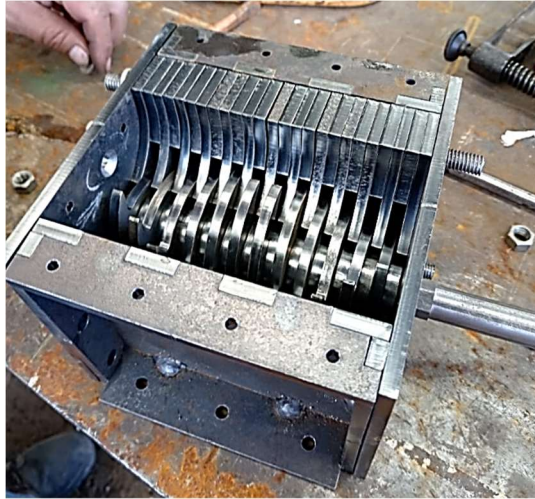


Figura 4.37. Ensamble del eje en la caja de trituración

Para adaptar al motor DC con la máquina se empleará un matrimonio (elemento mecánico que consta de un cuerpo macho y un cuerpo hembra que se adaptan), de modo que en la parte posterior ya se encuentre la máquina y en la parte delantera la máquina extrusora, de esa forma se aprovecha al 100% el motor

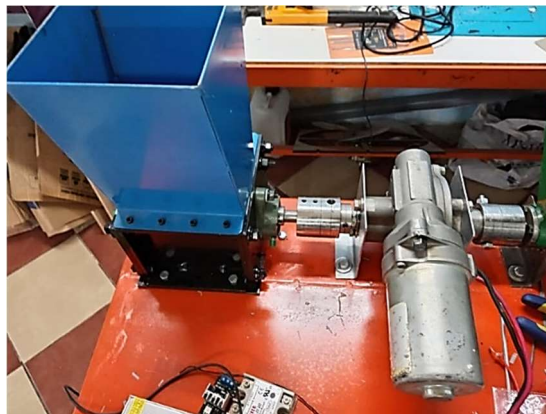


Figura 4.38. Ensamblaje total con el motor a través de un matrimonio

#### 4.12. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ESTRUSION

Para la construcción del eje se debe considerar las dimensiones de la broca a usar, así como el diámetro de esta. Para esto se empieza por adquirir el husillo y de ahí comenzar con el diseño del eje hueco. la broca tiene una longitud de 400 mm de largo de lo cual aprovecharemos una longitud total de 300 mm por efectos de diseño, basándonos de igual forma en el prontuario de máquinas herramientas donde se aconseja dejar un espesor de pared entre 10 a 30 mm de los cual se escogerá un eje de diámetro de 50 mm, debido a que el mismo en algunos materiales es comercial.



Figura 4.39. Broca de carburo de tungsteno de 1 ¼ in

Para la fabricación del eje hueco se considera un material AISI1020 laminado en frío esto debido a que el mismo presenta buenas características para las temperaturas requeridas, así también como la fuerzas y momentos que puede soportar. Para esto se puede realizar un estudio térmico para ver si efectivamente el material elegido está dentro de los parámetros establecidos. Adicionalmente se colocará una carga del peso de la broca dentro del eje puesto que es la única carga que soporta.



Figura 4.40. Construcción del Cilindro

Para implementar el sistema de calefacción se fabrica bridas resistivas de 110v a 250w que según el fabricante estas pueden alcanzar una temperatura máxima de 300 grados centígrados, como se dispone de un eje de diámetro de 50 mm se las fabrica con este diámetro.



Figura 4.41. Brida resistiva

Por último, se colocan las termocuplas y las bridas resistivas en el eje para de esta forma aplicar el diseño realizado a través de software. Y cumplir con el objetivo de calentar las partículas plásticas a fin de lograr crear filamento. Para la unión del motor con el extrusor también se aplicará un matrimonio mecánico de la misma forma que se aplicó con la máquina anteriormente creada.

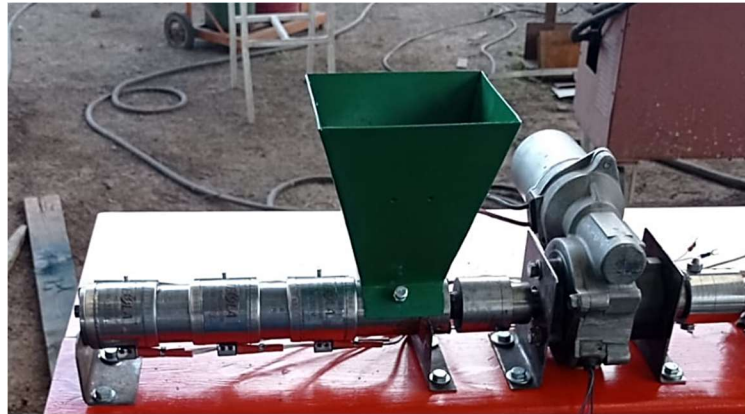


Figura 4.42. Ensamblaje total de la extrusora

#### Sistema electrónico

Para la implementación del sistema eléctrico primero procedemos a la instalación de las bridas resistivas esto basándonos en la simulación de temperatura que se aplicó a través de elementos finitos, de modo que se pueda aprovechar bien la temperatura de todo el extrusor para que el filamento sea uniforme.



Figura 4.43. Instalación bridas resistivas en el cilindro de extrusión

Después de la instalación del sistema de calefacción se procede con la instalación de las termocuplas, estas se colocarán en cada una de las bridas resistivas, de modo que se pueda censar la temperatura en los tres sitios ubicados.



Figura 4.44. Instalación de las termocuplas en el sistema de calefacción

Después de agregar el sistema de calefacción se instala todo en una caja de control en donde se controlará todo lo que pasa en la placa, también en esta caja se tendrá el sistema tanto de potencia como de control. Y adicionalmente se colocará canaleta para el cableado de modo que estos no estorben en el proceso de triturado y extruido del filamento PLA.



Figura 4.45. Instalado sistema de control de la máquina

## **5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

### **5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO**

#### **5.1.1. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

A continuación, se presenta una tabla que muestra el tiempo promedio de corte en función del peso del material PLA triturado. Estos datos son esenciales para evaluar la eficiencia de la máquina en el proceso de trituración del desecho de impresora 3D:

Tabla 5.19. Pruebas de trituración del desecho de impresión 3D

Peso de Material PLA Triturado (g)	Tiempo de Corte (segundos)
50	4.5
100	7.8
150	10.5
200	19.5
250	18.3
300	21.7
350	25.1
400	28.9
450	32
500	35.5

### 5.1.2. Promedio de Tiempo y Peso de Trituración para Material PLA

- Peso promedio de material triturado: 200 g
- Tiempo promedio de corte: 19.5 segundos

Estos datos indican una relación directa entre el aumento del peso del material PLA a triturar y el tiempo necesario para completar el proceso de corte. La tabla y los promedios son útiles para optimizar el proceso de trituración y para determinar la capacidad operativa de la máquina en diferentes escenarios de carga.

#### Dimensionamiento de la Tolva Superior

Los resultados mostrados a continuación, se relacionan en base al volumen de la tolva, este valor se obtuvo mediante propiedades físicas del diseño CAD – CAE del software Fusion 360.

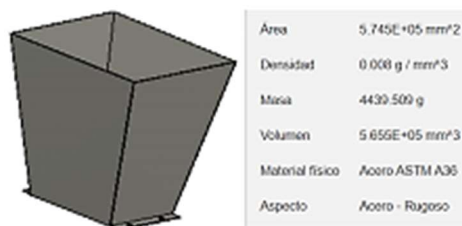


Figura 5.46. Volumen de la tolva

Resultados obtenidos:

El volumen de desechos de impresora 3D en la tolva ( $565,5 \text{ cm}^3$ ) y el peso del desecho de impresión 3D, después de ser trituradas (200 g) es igual a la relación  $2827,5 \text{ cm}^3/\text{kg}$

### 5.1.3. Análisis de Resultados Técnicos

**Pruebas de Calidad del Filamento Reciclado:** Tras implementar el proceso de reciclaje y producción de filamento, se realizaron una serie de pruebas para evaluar la calidad del filamento obtenido. Estas pruebas incluyeron:

- **Resistencia a la Tracción:** Se evaluó la resistencia mecánica del filamento utilizando una máquina de pruebas de tracción. Los resultados mostraron que el filamento reciclado de PLA tenía una resistencia media de 50 MPa, comparado con 60 MPa del filamento nuevo. Esta diferencia del 16.7% sugiere que, aunque el filamento reciclado es ligeramente menos resistente, aún se encuentra dentro de los límites aceptables para aplicaciones no estructurales de impresión 3D.
- **Consistencia del Diámetro:** Utilizando un micrómetro digital, se midió el diámetro del filamento reciclado a intervalos regulares a lo largo de una bobina completa. Se encontró una variación del diámetro de  $\pm 0.05 \text{ mm}$  en el filamento reciclado, lo cual está dentro de las tolerancias estándar de  $\pm 0.1 \text{ mm}$  para impresión 3D. Esto indica que el proceso de extrusión es capaz de producir un filamento de calidad adecuada.
- **Uniformidad de Color y Textura:** Se inspeccionó visualmente el filamento reciclado para evaluar la uniformidad del color y la textura. Se observaron ligeras variaciones en el color, que pueden atribuirse a diferencias en los desechos originales. Sin embargo, la textura del filamento fue lisa y consistente, similar al filamento nuevo.

### 5.1.4. Resultados de las Pruebas de Impresión

- **Pruebas de Calidad de Impresión:** Se utilizó el filamento reciclado en una impresora 3D para producir modelos de prueba. Se evaluaron la adhesión de la capa, la resolución de detalles y la presencia de defectos como burbujas o grietas. Los modelos impresos con filamento reciclado mostraron una adhesión de capa comparable a la del filamento nuevo, y los detalles finos se reprodujeron con una precisión similar. No se detectaron defectos significativos, lo que sugiere que el filamento reciclado es adecuado para aplicaciones de prototipado y piezas funcionales.

- **Discusión de los Resultados de Impresión:** La calidad de los modelos impresos confirma que el filamento reciclado es una alternativa viable al filamento nuevo. La capacidad de mantener una adhesión de capa adecuada y la resolución de detalles son indicadores de que las propiedades del filamento reciclado son consistentes con las necesidades de la impresión 3D. Estos resultados refuerzan la viabilidad de usar desechos plásticos como fuente para la producción de filamento reciclado, lo que podría reducir significativamente los costos de material y el impacto ambiental.

### 5.1.5. Pruebas realizadas con desechos de filamento de impresión 3D

Para el análisis de la extrusora se usará el valor del 100% de la velocidad del motor, también se usará piezas de soporte 3D, así como piezas mal diseñadas de modo que se pueda visualizar si la extrusión cumple con las partículas necesarias para la extrusión de filamento. Otro parámetro para tomar en cuenta será el peso de las piezas a triturar en la de modo que se pesará cuando ingrese el material y lo mismo a la salida de modo que se pueda verificar si existe pérdida al momento del triturado.

Se tiene el peso de piezas de impresión 3D que por causas de fallos en una impresión quedaron a media construcción, esta imagen muestra un peso de 160 gramos que son los que se trituraran para posteriormente ser pesados nuevamente.



Figura 5.47. Desecho de impresora 3D, pesado

El inicio del proceso de triturado de modo se triturará hasta que la maquina deje de arrojar material al recipiente, de esta forma se asumirá que la maquina ya no tiene material que triturar

además que las piezas se transformaron en picadillo de tal forma que estarían listas para el proceso de extrusión. Una vez terminado este proceso se recolecta la materia prima obtenida tratando de no desperdiciar nada para que el peso resultante no se afecte por causas externas.



Figura 5.48. Desechos de impresión 3D trituradas y pesadas

Como se puede visualizar en la figura anterior, se tiene un peso neto de 151 gramos esto quiere decir que en la maquina existe perdida de material, no obstante, se revisa la criba en la que se asienta la materia prima después de la trituración y se observa que aún hay material dentro de la misma, lo que quiere decir que habrá depósito de materia prima y esta deberá ser extraída una vez se termine el proceso de triturado.

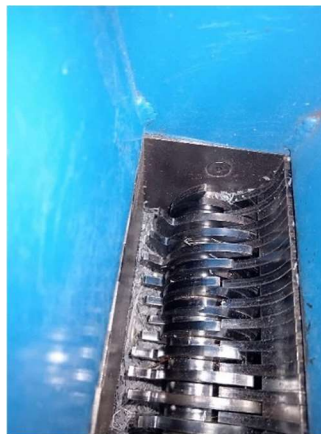


Figura 5.49. Residuos de materia prima en la caja de trituración

Como se observa en la figura anterior, se tiene los residuos que se depositaron en la criba y que no salieron al momento de terminar con el triturado de plásticos 3D. También se hizo la prueba con soportes de impresión 3D, los mismos que en ocasiones representan más del 50% de

consumo total de la pieza a imprimir. A continuación, se presentará el análisis de la trituradora con soportes de impresión 3D.

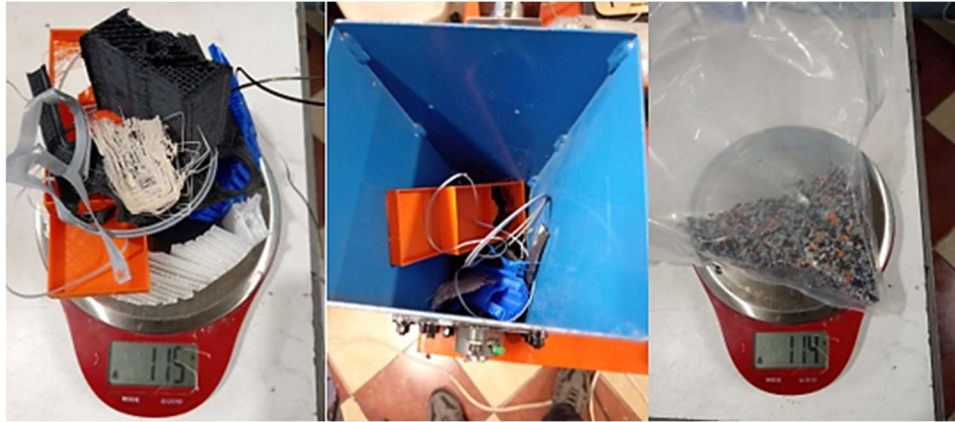


Figura 5.50. Análisis de triturado con desechos de impresión 3D

Es así que se muestra que cuando se tritura soportes de impresión 3D el desperdicio o residuos del proceso no es muy alto como con las piezas de impresión, estos datos se tabularan con más pruebas en diferentes pesos y con diferentes composiciones para obtener datos relevantes del trabajo de la trituradora 3D.

Tabla 5.26. Eficiencia de la máquina

<b>PESO IMPRESIONES 3D</b>	<b>PESO RECOLECTADO</b>
40	37
68	66
97	93
105	107
150	146
183	180
201	197
235	238
257	251
289	280

De la tabla obtenida se puede sacar la eficiencia de la maquina en porcentaje para verificar que tan eficiente es al momento de triturar las piezas de impresión 3D que se colocaron para la obtención de datos.

$$Ef = \frac{\text{promedio peso recolectado}}{\text{promedio peso impresiones}} * 100\%$$

$$Ef = \frac{159.5}{162.5} * 100\% = 98.15 \%$$

Verificación de las temperaturas de fundición del material a triturar

Se analiza también la velocidad de respuesta del sensor de temperatura de cada una de las termocuplas junto con un multímetro de temperatura para corroborar que la temperatura se asemeje con lo que marca la sonda de temperatura del multímetro. Esto con el fin de comprobar la velocidad de respuesta de las termocuplas hacia el calentamiento de las bridas resistivas.



Figura 5.51. Comprobación de cada valor a través de cada uno de los sensores

De estos valores obtenidos se puede obtener una tabla de valores al azar de modo que se compruebe si los valores de las termocuplas son iguales a los valores obtenidos por los sensores, adicionalmente se establecerá un listado de 10 valores en los cuales se usó los mismos valores para las tres termocuplas y en la última una comparación aparte para visualizar si la temperatura que debe alcanzar la salida para fundir la materia prima es la correcta.

Tabla 5.27. Valores obtenidos de los sensores a comparación de la punta calibrada

ítem	Sensor Calibrado	termocupla 1	termocupla 2	termocupla 3
1	35	33,45	34,18	37,5
2	46	45,78	45,98	46,12
3	55	54,67	55,18	56,98
4	63	63,11	61,79	64,01
5	79	78,53	79,05	79,95
6	85	84,1	84,96	86,15
7	94	95,15	94,89	96,81

<b>8</b>	108	109,51	108,97	113,48
<b>9</b>	115	116,1	116,81	117,41
<b>10</b>	126	125,89	126,15	126,99
<b>11</b>	138	137,95	139,41	139,14
<b>12</b>	144	143,78	145,8	147,5
<b>13</b>	150	152,51	152,48	153,33
<b>14</b>	168	-	-	168,1
<b>15</b>	177	-	-	177,84
<b>16</b>	183	-	-	185,51
<b>17</b>	194	-	-	195,87
<b>18</b>	210	-	-	211,48

También se aplicó el análisis de resultados a las temperaturas de la extrusión, en primera instancia se probó la extrusora con valores de temperatura muy bajas. Lo que ocasiono que el filamento se atasque o salga un filamento sin fundirse completamente por lo que el valor de temperatura no es el adecuado.



Figura 5.52. Material extruido con poca temperatura

También se probó la extrusora con valores de temperatura muy altos a fin de comprobar cuál es el resultado con respecto a los valores nominales de temperatura para un plástico PLA, esto ocasiono una sobre fundición de la materia a punto de quemarse y salir de forma líquida de la extrusora.



Figura 5.53. Sobre fundición de materia prima

Por último, a la extrusora se colocó valores nominales de temperatura para comprobar si el filamento obtenido cumple con los requerimientos para impresiones 3d.



Figura 5.54. Verificación del diámetro de filamento del material extruido

## 5.2. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEPENDIENDO EL VOLUMEN Y LAS HORAS DE TRABAJO

Para analizar el consumo energético de la máquina, la tarifa promedio de electricidad para el sector residencial se mantiene en 10,4 centavos de dólar por cada kilovatio/hora (kWh), según el Ministerio de Energía y Minas, en octubre de 2023.

La ecuación que permite calcular el consumo energético es la siguiente:

$$\text{Consumo Energético} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Horas al dia} \times \text{Dias de uso al mes}$$

- Potencia de la máquina: se mide en kilovatios (kW) y representa la cantidad de energía que la máquina consume. Tiempo de funcionamiento: se mide en horas y representa la duración durante la cual la máquina está en funcionamiento

### 5.2.1. Cálculo de consumo energético en 19,5 segundos

$$\text{Consumo Energético} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Horas al dia} \times \text{Dias de uso al mes}$$

$$\text{Consumo Energético} = 2,2 \text{ kW} \times 0.005416667 \text{ h} \times 1$$

$$\text{Consumo Energético} = 0,0118823 \text{ kWh}$$

### 5.2.2. Costo consumo energético en 19,5 segundos

$$\text{consumo mensual} \times \text{precio} = \text{consumo energético}$$

A procesar 200 gramos en un tiempo de 19,5 segundos se estimó un consumo de \$ 0,12

### 5.2.3. Consumo energético al procesar 45,6 kg de material triturado en una Hora

Datos de análisis:

Potencia de la máquina: 2,2kw

Horas de uso: 1

Días de uso al mes: 1

Cálculo de consumo energético en una hora

$$\text{Consumo Energético} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Horas al dia} \times \text{Dias de uso al mes}$$

$$\text{Consumo Energético} = 2,2 \text{ kW} \times 1\text{h} \times 1$$

$$\text{Consumo Energético} = 2,2 \text{ kWh}$$

### 5.3. ANÁLISIS DE TRITURACIÓN DEL PESO EN KG POR 20 DÍAS.

Si en una hora se trituró 45,6 kg, en 6 horas se triturarán 273,6 kg, entonces, en los 20 días que trabaja la máquina donde la triturará aproximadamente 5472 kg de material desecho de impresora 3D triturado. A procesar 45,6 kg en una hora se estimó un consumo energético de \$ 0,12, ahora, si la máquina trabaja 6 horas en un día su consumo será de \$ 0,72, entonces, si la máquina trabajará 6 horas al día por 20 días su consumo energético será de \$ 14,4.

### 5.3.1. Análisis Económico

Mediante este proceso, se analizan los recursos y las cantidades necesarias para el desarrollo del proyecto de tesis, asegurando así una adecuada selección de materiales cuando se adapte el sistema de inyección a la máquina de extrusión de plásticos. A continuación, se detallan los costos de materiales, así como los costos directos e indirectos del proyecto.

### 5.3.2. Costos de materiales

El costo del proyecto de tesis estipuló que los materiales seleccionados para actualizar el sistema de trituración y extrusión se calcularían en los valores del mercado a partir de las cifras de catálogos suministrados por distintos fabricantes. Estos catálogos de precios ponen al día el mercado, permitiendo una valorización acertada de lo que se gasta en la actualidad. Así, se logra que el presupuesto refleje las condiciones reales y actuales de zonas monetarias, lo cual facilita certezas financieras para llevar adelante el plan de trabajo.

Tabla 5.20. Costos de materiales

Cantidad	Elementos	Precio Unitario	Costo
<b>Sistema de Control</b>			
1	Arduino Mega	\$25,00	\$25,00
1	PCB controlador	\$53,00	\$53,00
3	Termocuplas con Max 31855	\$28,00	\$84,00
1	Convertor PWM analógico	\$7,50	\$7,50
1	Adaptador de Voltaje CT13	\$2,50	\$2,50
1	Motor nema 17	\$25,00	\$25,00
1	Placa driver A4988	\$4,50	\$4,50
1	Driver A4988	\$4,00	\$4,00
<b>Protecciones Eléctricas</b>			
1	Paro de emergencia	\$3,00	\$3,00
1	Selector	\$4,50	\$4,50
<b>Materiales</b>			
1	60 cm de eje AISI 1020	\$78,00	\$78,00
1	Broca de concreto de 1 ¼ in	\$165,00	\$165,00
1	Media plancha de acero A36 de 5mm	\$23,00	\$23,00

1	Media plancha de acero A36 de 6mm	\$27,00	\$27,00
1	Tubo cuadrado 1in	\$8,00	\$8,00
3	Bridas resistivas térmicas 110v 250w	\$55,00	\$165,00
3	Dimmer un canal	\$30,00	\$90,00
1	Fuente 12v 60A	\$65,00	\$65,00
1	Fuente PWM 100A	\$75,00	\$75,00
1	Canaleta	\$3,00	\$3,00
1	Ventilador 12v	\$11,50	\$11,50
1	Caja plástica	\$21,92	\$21,92
<b>TOTAL</b>			<b>\$945,42</b>

Tabla 5.21. Costos de diseño de ingeniería

<b>Descripción</b>	<b># de horas</b>	<b>Valor Unitario (\$)</b>	<b>Valor Total (\$)</b>
Diseño	100	\$ 2,88	\$ 287,50
Simulación	35	\$ 2,88	\$ 100,63
Programación	50	\$ 2,88	\$ 143,75
Ensamblaje	20	\$ 2,88	\$ 57,50
Corrección	20	\$ 2,88	\$ 57,50
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 646,88</b>

- **Costos directos**

Tabla 5.22. Costos directos

<b>Descripción</b>	<b>valor</b>
costos de materiales	\$ 945,92
costo por hora de ingeniería	\$ 646,88
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.592,80</b>

- **Costos indirectos**

Los valores que intervienen en la fabricación del producto juegan un papel crucial en completar indirectamente la terminación del mismo. Además, se deben considerar los costos administrativos y de gestión, así como los gastos relacionados con la investigación y desarrollo. La calidad de los materiales y la eficiencia del proceso de fabricación también son factores importantes que contribuyen a la finalización del producto de manera efectiva y eficiente.

Tabla 5.23. Costos indirectos

<b>Descripción</b>	<b>valor</b>
Gastos operativos	90
Ingeniería e investigación	30
Otros	30
<b>TOTAL</b>	<b>150</b>

- **Costo total**

Tabla 5.24. Presupuesto

<b>RUBRO</b>	<b>VALOR</b>
Costos Directos	\$ 1.592,80
Costos Indirectos	\$ 150,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.742,80</b>

El impacto económico del proyecto de diseño y construcción de una trituradora y extrusora de PLA reciclado es significativo y multifacético. Se centra en la evaluación y optimización de los costos de producción asociados con la creación de esta máquina, el mismo que se determina la utilidad neta, a través del VAN, la TIR y el periodo de recuperación de la inversión inicial de la maquinaria.

Tabla 5.25. análisis económico

<b>FLUJO DE CAJA ANUAL</b>					
<b>PERIODOS</b>	0	1	2	3	4
<b>N-VENTA</b>	0	1	3	6	8
<b>AUMENTO DE PRECIO</b>		2%	2%	2%	2%
<b>PRECIO</b>		\$ 1.800,00	\$ 1.836,00	\$ 1.872,72	\$ 1.910,17
<b>INGRESO</b>		\$ 1.800,00	\$ 5.508,00	\$ 11.236,32	\$ 15.281,40
<b>EGRESO</b>		\$ 1.592,80	\$ 4.778,40	\$ 9.556,80	\$ 12.742,40
<b>FLUJO NETO</b>		\$ 207,20	\$ 729,60	\$ 1.679,52	\$ 2.539,00

De acuerdo a los valores de ingreso y egreso realizado mediante el flujo de efectivo anual del presente proyecto, el cual hay una inversión inicial de 1,800.00 dólares, lo que permite evaluar la viabilidad, con una tasa de interés proyectada del 10%, dando como resultado un VAN de 1,887.35 dólares y TIR del 102%, por lo que este proyecto es factible, debido a que existe una rentabilidad con la proyección a 4 años.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

- A través de un análisis CAD - CAE, se determinó que la fabricación de este tipo de cuchilla en acero ASTM A36 asegurará un factor de seguridad de 2, garantizando su funcionamiento eficiente y que la trituración se mantenga dentro de los parámetros esperados.
- Antes de triturar desechos de impresión 3D, tendrá un peso de 0,16 kg, mientras que, después de la trituración tendrá un peso de 0,151 kg. Esto concluye que el peso de trituración puede variar, siendo mayor o menor, dependiendo del volumen de material que ingrese por la tolva superior.
- Una vez finalizada la máquina, se llevaron a cabo varias pruebas de funcionamiento. Como resultado, se obtuvieron las siguientes variables de salida: un tiempo de trituración de 19,5 segundos para procesar 200 gramos de material, lo cual se ajusta al tamaño máximo de la tolva superior.
- Si en una hora se trituran 45,6 kg, en un periodo de 6 horas se alcanzarán 273,6 kg. Por lo tanto, en un plazo de 20 días de operación, la máquina logrará triturar aproximadamente 5472 kg de material plástico.
- El análisis económico mostró que el uso de filamento reciclado puede reducir los costos de material hasta en un 30% en comparación con el filamento nuevo. La inversión en equipos de reciclaje puede recuperarse en aproximadamente 2 años, lo que demuestra que la implementación de un sistema de reciclaje de filamento es económicamente viable y ofrece ahorros a largo plazo.

### **6.2. RECOMENDACIONES**

- Es crucial evaluar el tipo de material que se desea triturar y asegurarse de que la máquina cuente con la potencia y el torque adecuados para procesar los desechos de impresora 3D.
- Se aconseja no superar la capacidad de carga de la tolva superior con residuos de impresoras 3D.
- El mantenimiento debe ser accesible para el operador, incluyendo la revisión de cuchillas, limpieza de residuos plásticos en los rodamientos para evitar obstrucciones en el mecanismo de transmisión, y el mantenimiento del sistema eléctrico.

- Se recomienda trabajar solamente con el material especificado (PLA y ABS) aunque la maquina puede
- funcionar con otros tipos de plásticos, esto puede afectar la durabilidad de las cuchillas, por esta razón no se recomienda utilizarla con otros materiales ya que no han sido probados en este trabajo.
- Además del PLA, sería beneficioso explorar la posibilidad de reciclar otros tipos de material comúnmente utilizados en la impresión 3D, como ABS y PETG. La expansión del proceso de reciclaje a estos materiales podría aumentar aún más el impacto positivo en la reducción de desechos de impresora 3D.

## 7. REFERENCIAS

- [1] A. L. Andrady, «Microplastics in the marine environment,» vol. 62, Marine Pollution Bulletin, 2011, pp. 1596-1605.
- [2] R. D. y. E. K. J. Hopewell, «Plastics recycling: challenges and opportunities,» de Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 364, Biological Sciences, 2009, pp. 2115-2126.
- [3] Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean, 2015.
- [4] M. d. A. d. Ecuador, «Informe de Residuos Sólidos,» 2020.
- [5] W. A. & B. V. J. M. Cruz Rosero, «Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos a partir de los residuos plásticos de impresiones 3D para el Grupo de Investigación GIDETER-ESPOCH,» Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 28 Enero 2022. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16149>. [Último acceso: 30 Enero 2024].
- [6] J. D. & T. P. Y. A. Navarro Nájera, «Desarrollo de un prototipo de máquina recicladora de polímeros para la elaboración de filamento para impresión 3D,» Repositorio Institucional | Universidad Autónoma de Bucaramanga - UNAB. , 2022. [En línea]. Available: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/17645>. [Último acceso: 30 01 2024].
- [7] Navarro J.; Torres Andrés, «Universidad Autónoma de Bucaramanga,» 2022. [En línea]. Available: [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/17645/2022\\_Tesis\\_Juan\\_David\\_Navarro%20\(1\).pdf?sequence=1](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/17645/2022_Tesis_Juan_David_Navarro%20(1).pdf?sequence=1). [Último acceso: 30 Enero 2024].
- [8] B. H. a. S. S. R. Auras, «An Overview of Polylactides as Packaging Materials,» de Macromolecular Bioscience, vol. 4, 2004., pp. 835-864.
- [9] J. Lunt, «"Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers",» J. Lunt, "Large-scale production, properties and commercial applic Polym. Degrad. Stab ed., vol. 59, 1998, pp. 145-152.

- [10] K. R. R. D. A. G. y. P. R. G. H. Vink, «Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production,» vol. 80, Polym. Degrad. Stab, 2003, pp. 403-419.
- [11] W. Z. C. y. M. N. M. A. Lim, «Poly(Lactic Acid) – Future Material for Food Packaging,» vol. 1, J. Food Sci. Eng., 2011, pp. 301-305.
- [12] D. Garlotta, «"A Literature Review of Poly(Lactic Acid),» vol. 9, 2001, pp. 63-84.
- [13] Villegas E., «Universidad Técnica de Ambato,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33187>. [Último acceso: 14 Febrero 2024].
- [14] C. E. Carraher, Introduction to Polymer Chemistry, 4th ed., CRC Press, 2017.
- [15] A. Ortiz, Diseño y simulacion de una maquina trituradora de plasticos, Escuela Politecnica Nacional, 2013, pp. 10-15.
- [16] C. E. Carraher, Polymer Chemistry: An Introduction, 8th ed., CRC Press, 2013.
- [17] M. & M. A. Beltrán, «Tecnología de polímeros,» Universidad de Alicante, 2012.
- [18] D. V. R. A. V. & D. M. Rosato, Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation, Hanser Verlag, 2004.
- [19] R. MOTT, «Diseño de elementos de máquinas,» México, Pearson Educación S.A., 2006, pp. 267, 268, 604.
- [20] K. OGATA, «Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson Educación S.A.,» Madrid, Pearson Educación S.A., 2003, p. 4.
- [21] MARIANO, «Diseño de la tolva,» 9 Mayo 2016. [En línea]. Available: [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8287/1/tema5\\_extrusi%C3%B3n.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8287/1/tema5_extrusi%C3%B3n.pdf). [Último acceso: 12 Agosto 2024].
- [22] V. K. & U. L. Savgorodny, Transformación de plásticos, Gustavo Gili, 1978.
- [23] V. K. & U. L. Savgorodny, Transformación de plásticos, Editorial Gustavo Gili., 1978.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**ANEXO I**

**FICHA TÉCNICA ACERO ASTM A36**

**Planchas de Acero  
ASTM A36**



**PLANCHAS DE ACERO A36**

Planchas de acero, también conocido como laminado en caliente (LAC) de acero en calidad A36. La plancha es una placa de acero estructural utilizado para la construcción en general y aplicaciones industriales.

Especificaciones: ASTM A36, AISI A36

Fácil de soldar, cortar, dar forma y maquinar.

Se mide en espesor x ancho x largo

<b>Propiedades Mecánicas</b>	Límite de Fluencia (kg/mm <sup>2</sup> )	24 min.
	Resistencia a la Tracción (kg/mm <sup>2</sup> )	41 min
	Alargamiento (%) en 50 mm	18 min.

NORMA TÉCNICA	GRADO B				
	C	Mn	P	S	Si
A36	0.25	0.8-1.2 máx	0.040 máx	0.050 máx	0.40 máx

Espesor		Ancho		Largo		Peso Teórico
mm	pulg	mm	pie	mm	pie	Kg/plancha
1.5	1/16	1200	4	2400	8	33.91
2.0	5/64	1200	4	2400	8	44.05
2.5	3/32	1200	4	2400	8	55.55
3.0	1/8	1200	4	2400	8	67.08
		1500	5	3000	10	109.2
4.5	3/16	1200	4	2400	8	100.50
		1500	5	3000	10	164.5
6.0	1/4"	1200	4	2400	8	134.81
		1500	5	3000	10	212.00
		1500	5	6000	20	423.90
8.0	5/16"	1200	4	2400	8	180.60
		1500	5	6000	20	565.20
		2400	8	6000	20	904.32
9.0	3/8"	1200	4	2400	8	203.26
		1500	5	3000	10	318.00
		1500	5	6000	20	635.85
		2400	8	6000	20	10173.36
12.0	1/2"	1200	4	2400	8	279.90
		1500	5	3000	10	424.00
		1500	5	6000	20	847.80
		2400	8	6000	20	1356.48
16	5/8"	3000	10	6000	20	1695.60
		1200	4	2400	8	363.74
		1500	5	6000	20	1130.40
		2400	8	6000	20	1808.64
19	3/4"	3000	10	6000	20	2260.80
		1200	4	2400	8	433.60
		1500	5	3000	10	671.175
		1500	5	6000	20	1342.35
25	1"	2400	8	6000	20	2147.76
		1500	5	6000	20	1766.25
		2400	8	6000	20	2826.00
		3000	10	6000	20	3532.50
32	1 1/4"	1500	5	6000	20	2260.80
		2400	8	6000	20	3617.28
		3000	10	6000	20	4521.60
		1500	5	6000	20	2684.70
38	1 1/2"	2400	8	6000	20	4295.52
		3000	10	6000	20	5369.40
		1500	5	6000	20	3532.50
		2400	8	6000	20	5652.00
50	2"	3000	10	6000	20	7065.00
		1500	5	6000	20	3532.50

\* Equivalencias de conversión son aproximadas.

\* Fotos y datos referenciales. No aceptamos responsabilidad por usos incorrectos o mal interpretaciones de estos datos.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**ANEXO II**

**FICHA TÉCNICA ACERO AISI 316**

28/8/24, 3:28

AISI 316 Stainless Steel, Austenitic

**AISI 316 Stainless Steel, Austenitic**

**Categories:** [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Stainless Steel](#); [Cast Stainless Steel](#); [T 300 Series Stainless Steel](#)


**Material:** 18Cr-12Ni-Mo STAINLESS STEEL BARS FOR GENERAL APPLICATION (SUS 316-B)

**Notes:** Creep and rupture data provided by [NIMS](#)

**Key Words:** UNS S31600; JIS G4303(91) SUS 316-B

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.03 g/cc	0.290 lb/in <sup>3</sup>	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	187	187	
Tensile Strength, Ultimate	520 MPa	75400 psi	
Tensile Strength, Yield	205 MPa	29700 psi	
Elongation at Break	40 %	40 %	
Rupture Strength 	21.0 - 22.0 MPa @Temperature 750 °C, @Temperature 1380 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	3050 - 3190 psi	
	21.0 - 28.0 MPa @Temperature 725 °C, @Temperature 1340 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	3050 - 4060 psi	
	27.0 - 37.0 MPa @Temperature 700 °C, @Temperature 1290 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	3920 - 5370 psi	
	35.0 - 49.0 MPa @Temperature 675 °C, @Temperature 1250 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	5080 - 7110 psi	
	46.0 - 65.0 MPa @Temperature 650 °C, @Temperature 1200 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	6670 - 9430 psi	
	66.0 - 85.0 MPa @Temperature 625 °C, @Temperature 1160 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	9570 - 12300 psi	
	97.0 - 114 MPa @Temperature 600 °C, @Temperature 1110 °F, Time 3.60e+8 sec Time 100000 hour	14100 - 16500 psi	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.080 %	<= 0.080 %	
Chromium, Cr	16 - 18 %	16 - 18 %	
Iron, Fe	61.845 - 72 %	61.845 - 72 %	
Manganese, Mn	<= 2.0 %	<= 2.0 %	
Molybdenum, Mo	2.0 - 3.0 %	2.0 - 3.0 %	
Nickel, Ni	10 - 14 %	10 - 14 %	
Phosphorus, P	<= 0.045 %	<= 0.045 %	
Silicon, Si	<= 1.0 %	<= 1.0 %	
Sulfur, S	<= 0.030 %	<= 0.030 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**ANEXO III**

**FICHA TÉCNICA ACERO AISI 1020**



### 1020 Low Carbon Steel

AISI 1020 steel is a carbon (non-alloy) steel formulated for primary forming into wrought products.

It has a fairly high electrical conductivity and can have a moderately low tensile strength among wrought carbon or non-alloy steels.

**Related Specifications**

China	GB	20
Germany	DIN	C22
	DIN EN#	1.0402
USA	AISI	1020
Japan	JIS	G1020
		S20C

\* Note that materials compared are the nearest available grade and might have slight variation in actual chemistry

Stocked Materials Supplied in Condition	Typical Hardness
Cold Drawn	135 - 165 HB

**Typical Mechanical Properties**

Condition	Cold Drawn
Ultimate Tensile Strength (MPa)	460
Yield Strength (MPa)	190
Elongation (%)	17
Hardness (HB)	135 - 165 HB

**Chemical Composition**

Carbon Steel-1020	Mn		C		S		P		Si		Cr		Ni		Cu		
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
STAR Standard 1020	0.3%	0.6%	0.18%	0.23%	-	0.05%	-	0.04%									

\*\* Star believes the information provided is accurate and reliable. However no warranty of accuracy, completeness or reliability is given, nor will any responsibility be taken for errors or omissions. Please request for specified test certificate if critical for end use.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**ANEXO IV**

**PROGRAMACIÓN DEL  
MICROCONTROLADOR**

```
#include <SPI.h>
#include <math.h>
#include <RBDdimmer.h>
#include "Nextion.h"

#define outputPin1 8
#define outputPin2 7
#define outputPin3 6

#define zerocross 2

#define ENA 10
#define STEP 12 // pin STEP de A4988 a pin 4
#define DIR 11 // pin DIR de A4988 a pin 5

dimmerLamp dimmer1(outputPin1);
dimmerLamp dimmer2(outputPin2);
dimmerLamp dimmer3(outputPin3);

NexText tmk1 = NexText(2,15,"t0");
NexText tmk2 = NexText(2,16,"t1");
NexText tmk3 = NexText(2,17,"t2");
NexText ret1 = NexText(2,18,"t3");
NexText ret2 = NexText(2,19,"t4");
NexText ret3 = NexText(2,20,"t5");
NexText msm = NexText(2,21,"leyenda");

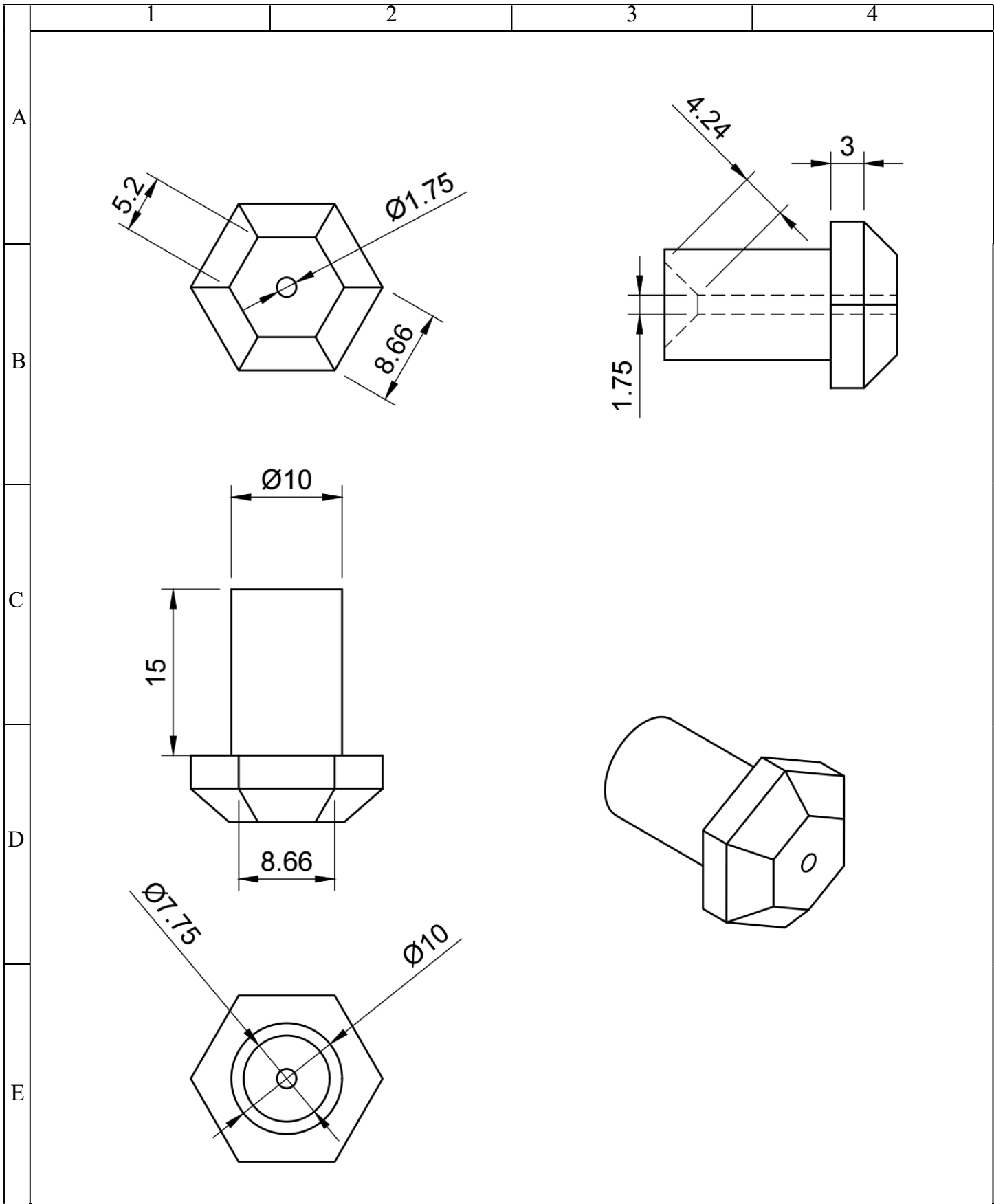
//Define Variables we'll be connecting to
double Setpoint1, Input1, Output1;


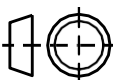
//Specify the links and initial tuning parameters
double Kp1=2, Ki1=3, Kd1=0.25;
PID myPID1(&Input1, &Output1, &Setpoint1, Kp1, Ki1, Kd1, DIRECT);

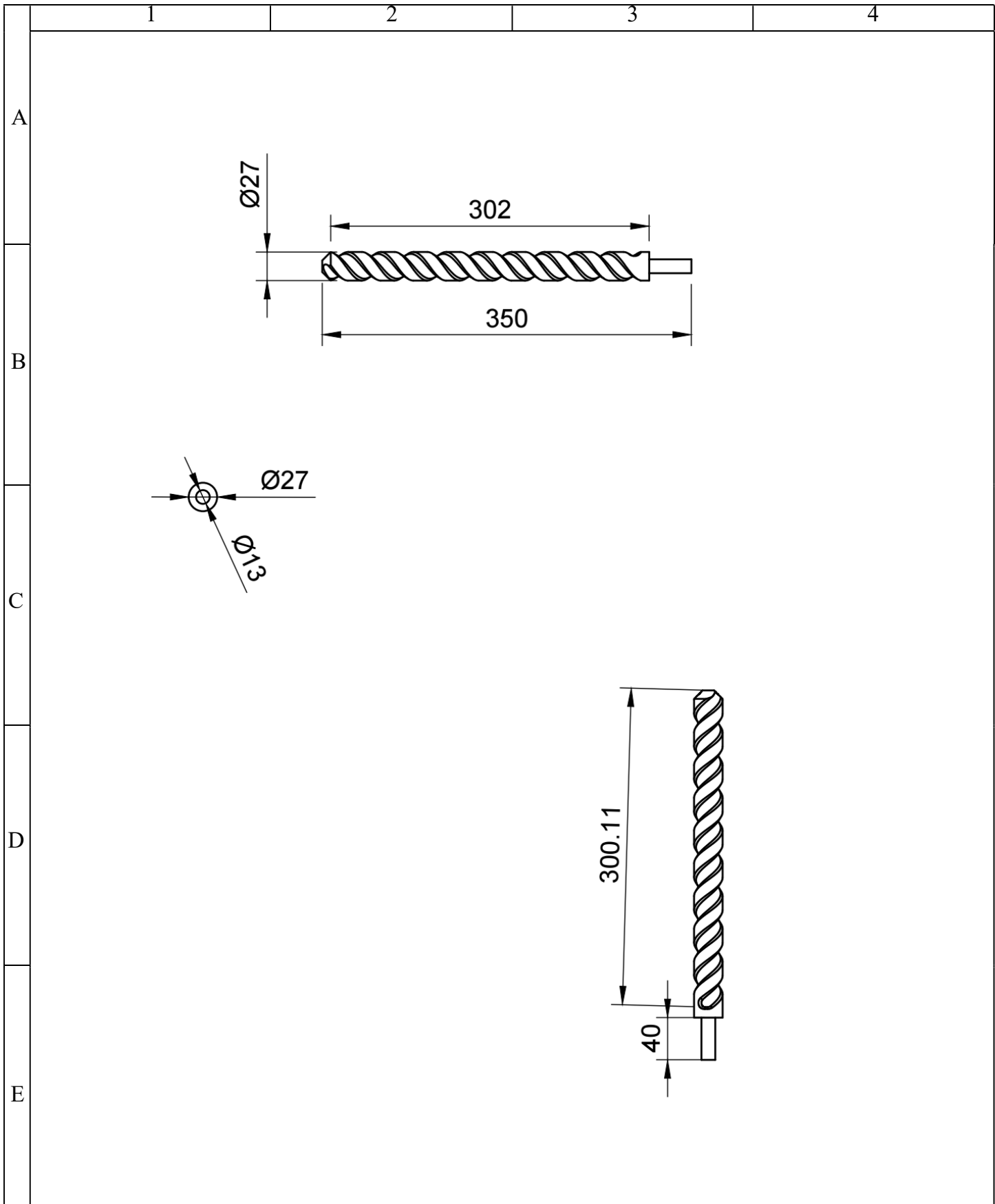
//Define Variables we'll be connecting to
double Setpoint2, Input2, Output2;



//Specify the links and initial tuning parameters
double Kp2=2, Ki2=3, Kd2=0.25;
PID myPID2(&Input2, &Output2, &Setpoint2, Kp2, Ki2, Kd2, DIRECT);

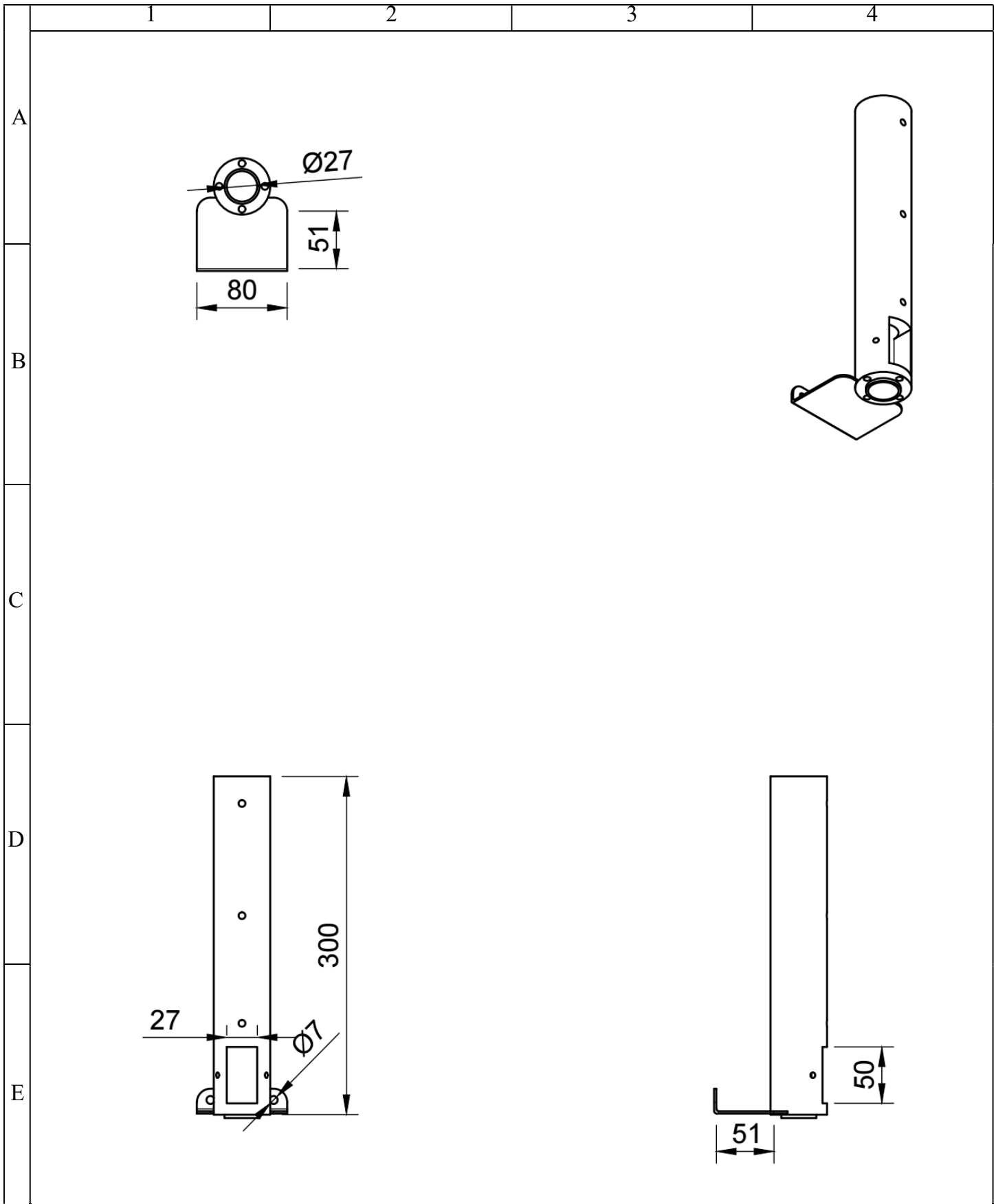
//Define Variables we'll be connecting to
double Setpoint3, Input3, Output3;
```


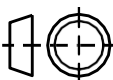


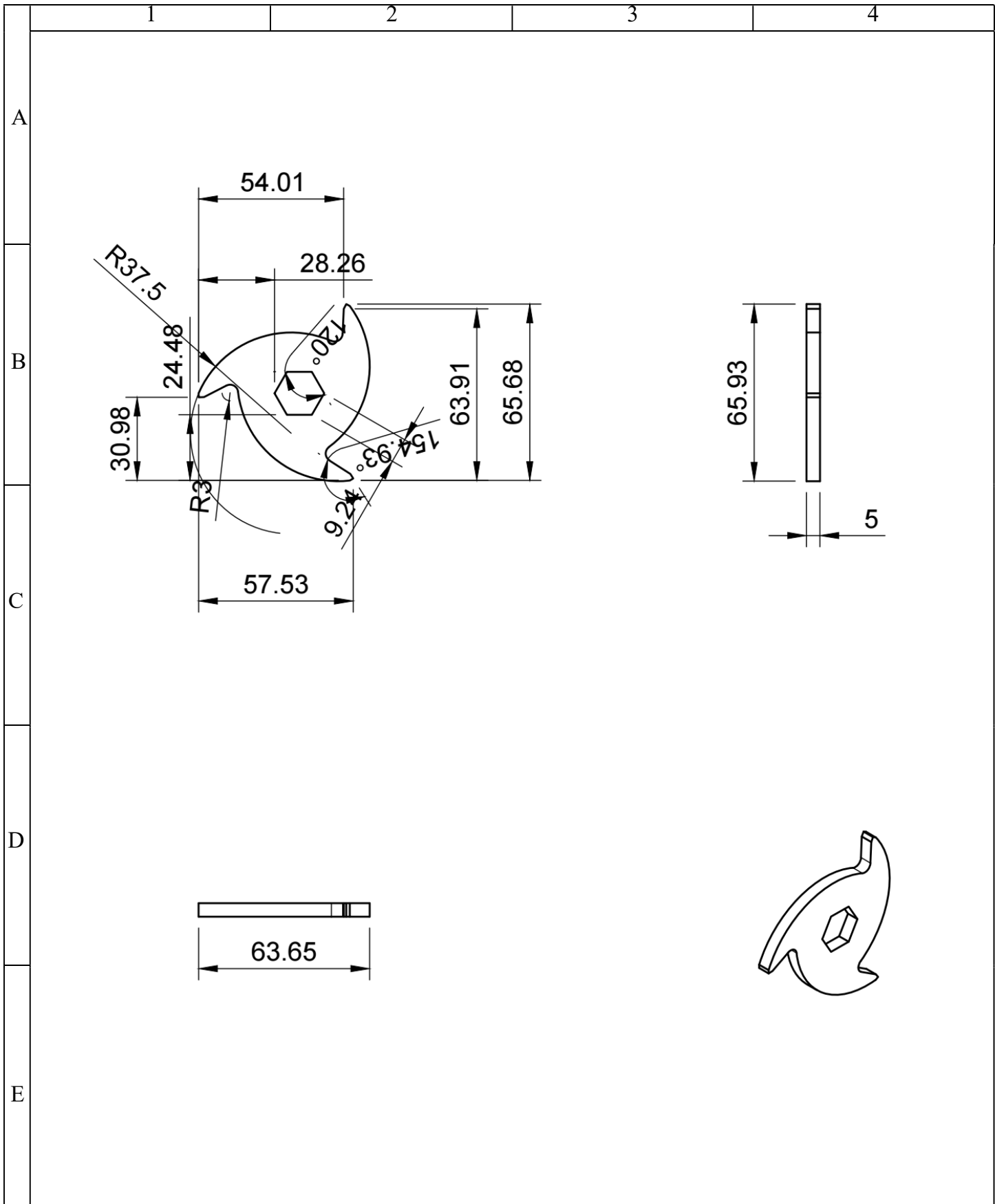
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.2mm	0.016 kg	ACERO ASTM A36	
				Dib.	Fecha	Nombre	Denominación
				Rev.	12/08/2024	Willian Laguatasig	BOQUILLA ESTRUSION
				Apro.		Ing. Luis Navarrete	
							Escala
							2.1
							Número de Dibujo
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	 Universidad Técnica de Cotopaxi		Ingeniería Electromecánica UTC 	





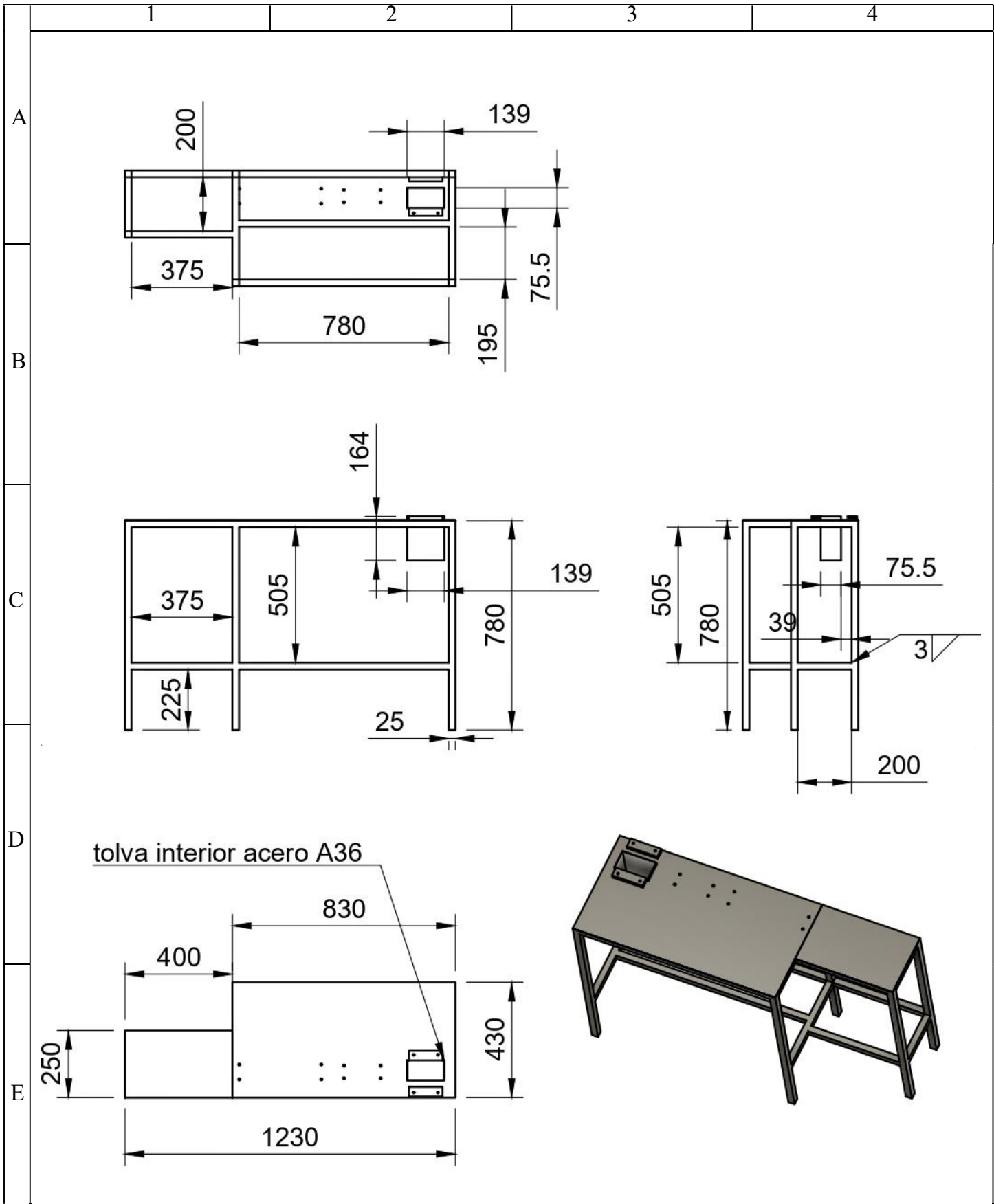
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.10mm	1.045kg	<b>CARBURO DE TUNGSTENO</b>	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	12/08/2024	Willian Laguatasi	<b>BROCA TORNILLO</b>
				Rev.		Ing. Luis Navarrete	
				Apro.		Ing. Luis Navarrete	
							Número de Dibujo
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	 Universidad Técnica de Cotopaxi		Ingeniería Electromecánica UTC	
							


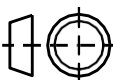


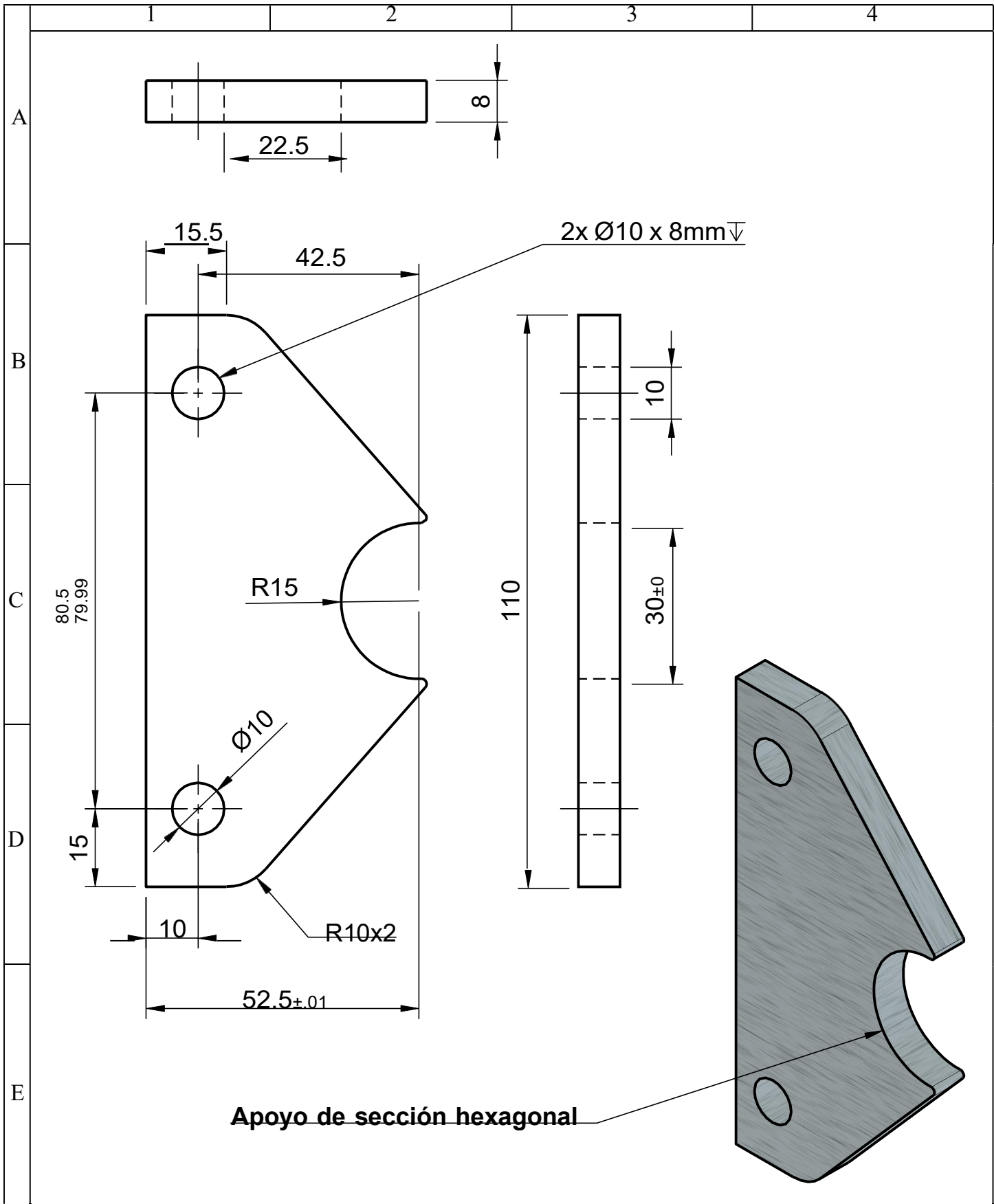
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.10mm		<b>AISI 1020</b>	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
			Dib.	12/08/2024	Willian Laguatasing		
			Rev.		Ing. Luis Navarrete		
			Apro.		Ing. Luis Navarrete		
				 Universidad Técnica de Cotopaxi		Número de Dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Ingeniería Electromecánica UTC	


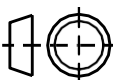


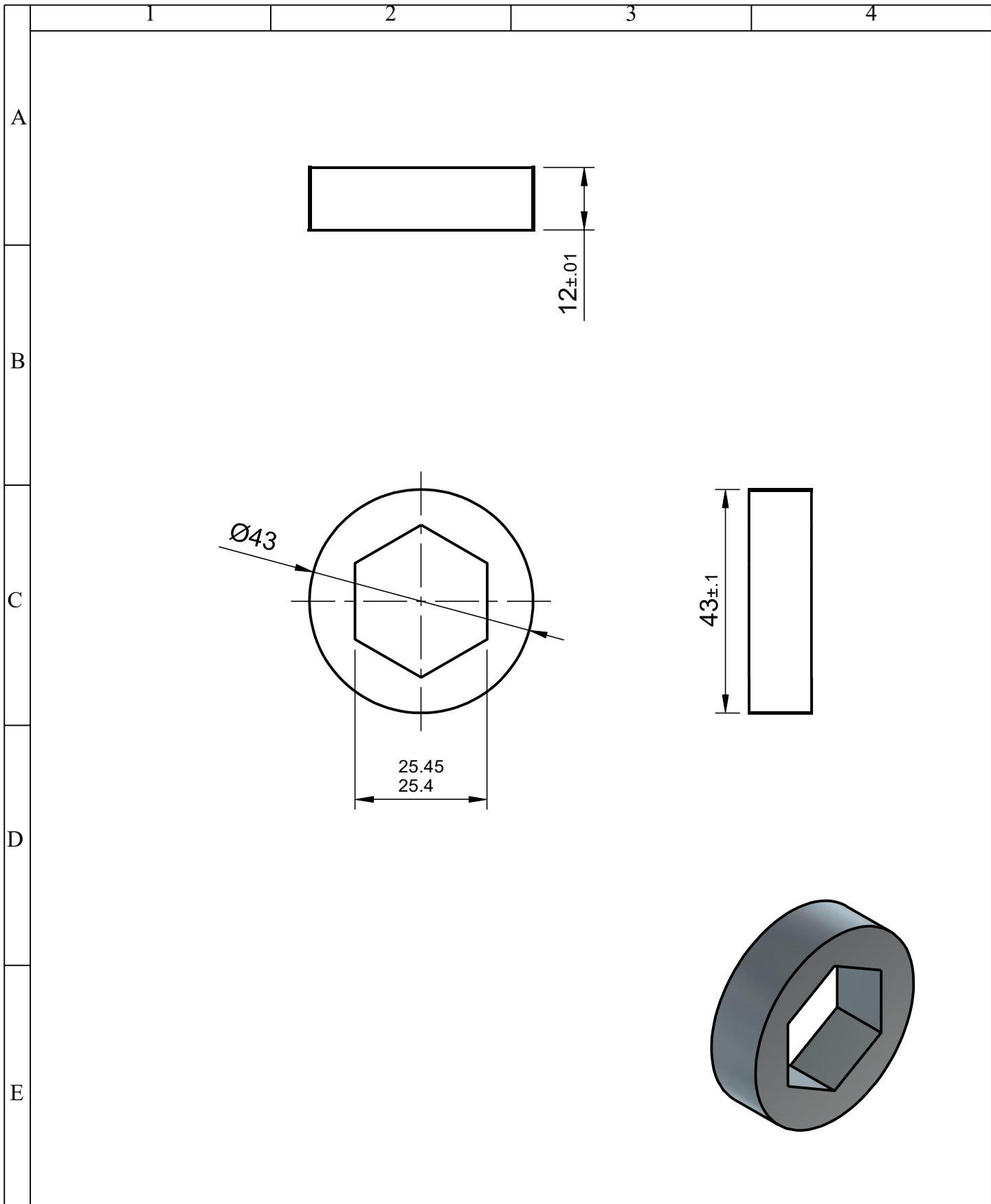
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.2mm	0.0793 kg	ACERO ASTM A36	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	12/08/2024	Willian Laguatasig	CUCHILLA DE 3 FILOS
				Rev.		Ing. Luis Navarrete	
				Apro.		Ing. Luis Navarrete	
							Escala
							1.2
							Número de Dibujo
							Ingeniería Electromecánica UTC
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	 Universidad Técnica de Cotopaxi			


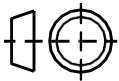


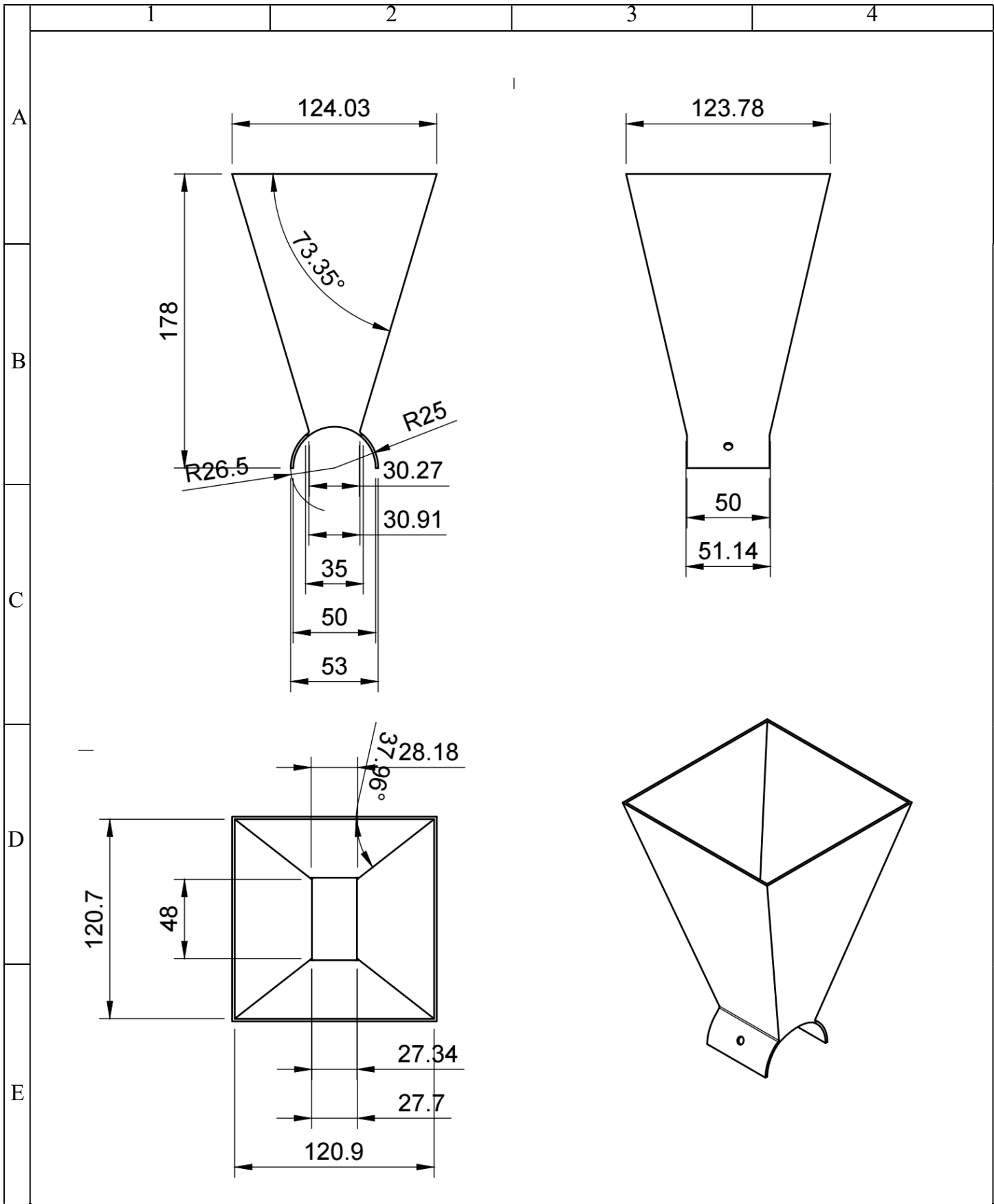
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.2mm	0.83kg	ACERO ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
			Dib.	12/08/2024	Willian Laguatasig		
			Rev.		Ing. Luis Navarrete		
			Apro.		Ing. Luis Navarrete		
				 Universidad Técnica de Cotopaxi		Número de Dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Ingeniería Electromecánica UTC	





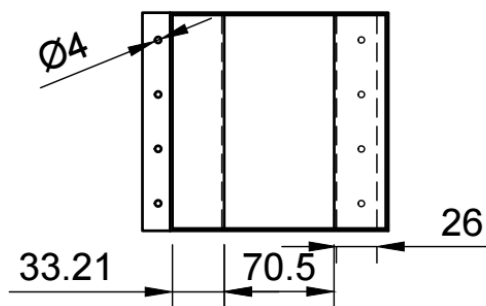
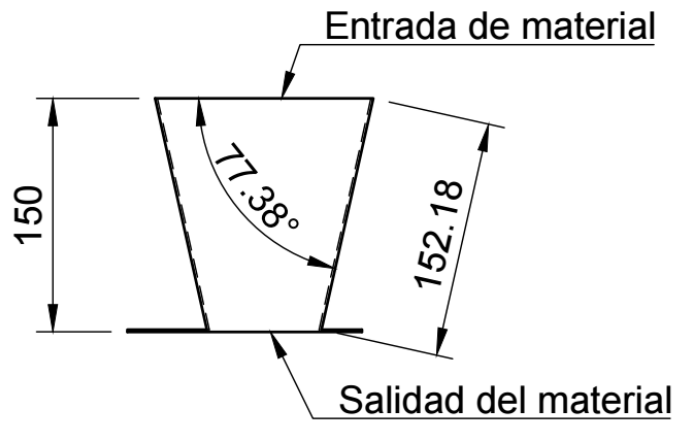
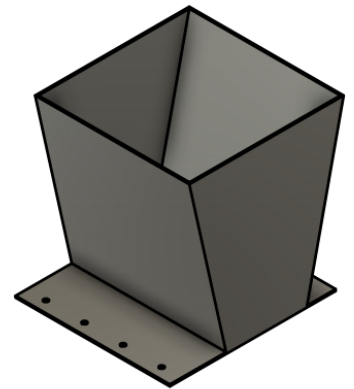
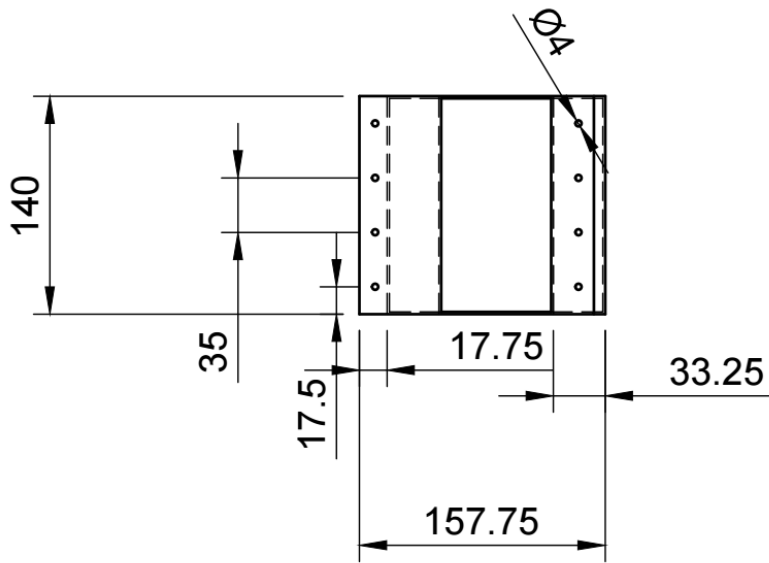
				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.5mm	2.50kg	ACERO ASTM A36	
				Dib.	Fecha	Nombre	Denominación
					12/08/2024	Willian Lagutasig	SEPARADOR DE PARED Y CUCHILLAS
				Rev.		Ing. Luis Navarrete	
				Apro.		Ing. Luis Navarrete	
							Número de Dibujo
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	 Universidad Técnica de Cotopaxi		Ingeniería Electromecánica UTC	
							 Escala <b>1.1</b>





				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.04mm	0.82kg	ACERO ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
			Dib.	12/08/2024	Willian Lagutasig		
			Rev.		Ing. Luis Navarrete		
			Apro.		Ing. Luis Navarrete		
						Número de Dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Universidad Técnica de Cotopaxi	Ingeniería Electromecánica UTC		



				Tolerancias	(Peso)	Materiales	
				±0.10mm	0.644 kg	ACERO ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
			Dib.	12/08/2024	Willian Laguatasig		
			Rev.		Ing. Luis Navarrete		
			Apro.		Ing. Luis Navarrete		
				 Universidad Técnica de Cotopaxi		Número de Dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Ingeniería Electromecánica UTC	



				Tolerancias ±0.10mm	(Peso) 0.997kg	Materiales <b>ACERO ASTM A36</b>		
						Denominación <b>TOLVA DE TRITURADO</b>	Escala <b>1.5</b>	
				Dib.	Fecha 12/08/2024			Nombre Willian Lagutasig
				Rev.				Ing. Luis Navarrete
				Apro.		Ing. Luis Navarrete		
				 Universidad Técnica de Cotopaxi		Número de Dibujo		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Ingeniería Electromecánica UTC		