

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**“Diseño y construcción de una impresora 3D con el  
objetivo de realizar moldes de piezas mecánicas  
para fundición – Empresa Fainseb”**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**Autores:**

Bach. Arévalo López, Balois Miguel

Bach. Cueva Rodriguez, Ricardo Yonatan

**Asesor:**

Ing. M.Sc. Risco Ojeda, Rusber Alberto

Codigo. ORCID. 0000-0003-0194-169X

**Nuevo Chimbote - Perú**

**2023**

**HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR**

El presente informe de tesis titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON EL OBJETIVO DE REALIZAR MOLDES DE PIEZAS MECÁNICAS PARA FUNDICIÓN – EMPRESA FAINSEB”**, elaborado por los bachilleres.

**AREVALO LOPES BALOIS MIGUEL**

**CUEVA RODRIGUEZ RICARDO YONATAN**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico, ha conestado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.



---

Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto  
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X  
DNI: 32903454  
**ASESOR**

**HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR**

El presente informe de tesis titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON EL OBJETIVO DE REALIZAR MOLDES DE PIEZAS MECÁNICAS PARA FUNDICIÓN – EMPRESA FAINSEB”**, elaborado por los bachilleres.

**AREVALO LOPES BALOIS MIGUEL**

**CUEVA RODRIGUEZ RICARDO YONATAN**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico, Fue revisado y aprobado por el siguiente Jurado Evaluador.



Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier  
COD. ORCID. 000-0001-8586-3021  
DNI: 32763819  
PRESIDENTE



Msc. Calderon Rodriguez, Luis Carlos  
COD. ORCID. 0000-0002-9447-2257  
DNI: 32977058  
SECRETARIO



Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto  
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X  
DNI: 32903454  
INTEGRANTE

## ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

A los diez días del mes de noviembre del año dos mil veintitrés, siendo las 10:30 a.m., el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 376-2023-UNS-CFI, integrado por los docentes: **Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)** y de expedito según Resolución Decanal N° 788-2023-UNS-FI, y en concordancia a lo dispuesto en Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, el Jurado Evaluador, titular, da inicio a la sustentación de la Tesis : : **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON EL OBJETIVO DE REALIZAR MOLDES DE PIEZAS MECÁNICAS PARA FUNDICIÓN – EMPRESA FAINSEB”**, perteneciente a los bachilleres: **CUEVA RODRIGUEZ RICARDO YONATAN**, con código de matrícula N°0201216016 y **AREVALO LOPEZ BALOIS MIGUEL**, código de matrícula N°0201216011, quien fue asesorado por el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, según Resolución Decanal N° 228-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
CUEVA RODRIGUEZ RICARDO YONATAN	17	BUENO

Siendo las 11:30 a.m del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, noviembre 10 de 2023



Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza  
PRESIDENTE



Msc. Luis Carlos Calderon Rodriguez  
SECRETARIO



Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda  
INTEGRANTE

### ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

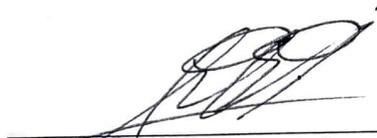
A los diez días del mes de noviembre del año dos mil veintitrés, siendo las 10:30 a.m., el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 376-2023-UNS-CFI, integrado por los docentes: **Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)** y de expedito según Resolución Decanal N° 788-2023-UNS-FI, y en concordancia a lo dispuesto en Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, el Jurado Evaluador, titular, da inicio a la sustentación de la Tesis : : **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON EL OBJETIVO DE REALIZAR MOLDES DE PIEZAS MECÁNICAS PARA FUNDICIÓN – EMPRESA FAINSEB”**, perteneciente a los bachilleres: **CUEVA RODRIGUEZ RICARDO YONATAN**, con código de matrícula N°0201216016 y **AREVALO LOPEZ BALOIS MIGUEL**, código de matrícula N°0201216011, quien fue asesorado por el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, según Resolución Decanal N° 228-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
AREVALO LOPEZ BALOIS MIGUEL	16	REGULAR

Siendo las 12:30 p.m. del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, noviembre 10 de 2023



Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza  
PRESIDENTE



Msc. Luis Carlos Calderon Rodriguez  
SECRETARIO



Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda  
INTEGRANTE



## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: RICARDO YONATAN CUEVA RODRÍGUEZ  
Título del ejercicio: TESIS FINAL  
Título de la entrega: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D  
Nombre del archivo: IFT.\_Cueva\_Ar\_valo.\_07\_12\_2023.pdf  
Tamaño del archivo: 5.19M  
Total páginas: 87  
Total de palabras: 14,086  
Total de caracteres: 78,201  
Fecha de entrega: 07-dic.-2023 10:33a. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega... 2251372573

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA



"Diseño y construcción de una impresora 3D con el  
objetivo de realizar moldes de piezas mecánicas  
para fundición – Empresa Fainseb"

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

Autores:

Bach. Arévalo López, Balois Miguel  
Bach. Cueva Rodriguez, Ricardo Yonatan

Asesor:

Ing. M.Sc. Risco Ojeda, Rusber Alberto  
Codigo. ORCID 0000-0003-0194-169X

Nuevo Chimbote - Perú  
2023

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D

## INFORME DE ORIGINALIDAD

21%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

11%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://tesis.pucp.edu.pe">tesis.pucp.edu.pe</a> Fuente de Internet	7%
2	<a href="https://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	3%
3	<a href="https://repositorio.upa.edu.pe">repositorio.upa.edu.pe</a> Fuente de Internet	3%
4	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.uns.edu.pe">repositorio.uns.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.uptc.edu.co">repositorio.uptc.edu.co</a> Fuente de Internet	1%
7	Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología Trabajo del estudiante	1%
8	Submitted to Universidad Nacional del Santa Trabajo del estudiante	<1%

## **DEDICATORIA**

*Agradezco a Dios por otorgarnos la oportunidad de emprender este proyecto, una parte fundamental de nuestra travesía profesional.*

*Este trabajo está dedicado con profundo amor y gratitud a nuestros padres, quienes nos han guiado con sus enseñanzas y nos han inculcado valores esenciales que han sido fundamentales en nuestra evolución como individuos y profesionales. Su apoyo inquebrantable ha sido la brújula que nos ha guiado en este viaje.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Nacional del Santa por ofrecernos el respaldo indispensable durante todo nuestro trayecto universitario.*

*Queremos extender nuestro reconocimiento y gratitud al Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, nuestro asesor, por su valioso tiempo, apoyo incondicional y la información crucial que nos proporcionó para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. Su orientación ha sido fundamental para nuestro crecimiento académico y profesional.*

## NOMENCLATURA

$\Delta X$ : Variación del Desplazamiento en el Eje X (mm).

$\Delta Y$ : Variación del Desplazamiento en el Eje Y (mm).

$\Delta A$ ,  $\Delta B$ : Variación del Desplazamiento de las Correas en el Motor (mm).

T: Torque (N.m).

$m_{\text{motor}}$ : Masa del Motor de Pasos Nema (g).

I: Momento de Inercia ( $\text{g}\cdot\text{cm}^2$ ).

r: Radio de Giro ( $\text{cm}^2$ ).

F: Fuerza (N).

a: Aceleración del Sistema ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

t: Tiempo para Alcanzar una Velocidad Máxima de 150 mm/s (s).

$V_f$ : Velocidad Final Máxima del Sistema (mm/s).

$V_0$ : Velocidad Inicial del Sistema (mm/s).

$f_s$ : Factor de Servicio.

Q: Torque de Diseño (lb.in).

$\mu$ : Coeficiente de Fricción.

$\alpha$ : Ángulo Radial de la Cuerda (grad).

$\lambda$ : Ángulo de Avance (grad).

L: Avance de la Cuerda.

d: Diámetro (mm)

$S_r$ : Relación de Esbeltez.

l: Longitud del Tornillo de Potencia (mm).

$l_{ef}$ : Longitud Equivalente (mm).

$P_{cr}$ : Carga Crítica (N).

E: Módulo de Young (Pa).}

A: Área ( $\text{mm}^2$ ).

$\gamma_a$ : Taza de Cizallamiento Aparente

Q: Caudal Volumétrico ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )

$\dot{m}$ : Flujo Másico ( $\text{g/s}$ )

T: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho$ : Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ).

V: Volumen ( $\text{m}^3$ ).

$\Delta T$ : Variación de Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$C_p$ : Calor Específico ( $\text{KJ/Kg}^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta P$ : Caída de Presión (con varios subíndices), ( $\text{Pa}$ )

n: Índice de la Ley de Potencia

k: Consistencia del Material

W: Potencia (W)

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
NOMENCLATURA.....	iv
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Formulación del Problema de Investigación .....	16
1.3. Limitaciones de la investigación.....	16
1.4. Objetivos de la Investigación.....	16
1.4.1. Objetivo general.....	16
1.4.2. Objetivos específicos .....	16
1.5. Formulación de la Hipótesis .....	17
1.6. Justificación de la Investigación .....	17
II. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1 Manufactura Aditiva .....	18
2.2 Proceso de Funcionamiento de una Impresora 3D .....	18
2.3 Modelación por deposición fundida .....	19
2.4 Impresoras 3D para FDM .....	20
2.5 Parámetros de impresión.....	22
2.6 Materiales Usados en la Impresión 3D con Tecnología FDM.....	22
2.7 Partes de la Impresora 3D con Tecnología FDM.....	24
2.7.1 Cuerpo Mecánico.....	24
2.7.2 Sistema Electrónico .....	25
2.7.3 Extrusor.....	26
2.8 Sistemas de Estructuras de Impresoras FDM .....	27
2.8.1 Sistema Cartesiano.....	27
2.8.2 Sistema Delta .....	28
2.8.3 Sistema Core XY .....	29

III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1.	Materiales.....	30
3.1.1.	Equipos y servicios.....	30
3.1.2.	Materiales.....	30
3.2.	Método.....	30
3.2.1.	Tipo de Investigación.....	30
3.2.2.	Línea de Investigación.....	30
3.2.3.	Variables.....	31
3.2.6.	Diseño de la Investigación.....	34
3.2.7.	Unidad de estudio.....	34
3.2.8.	Técnicas de procesamiento y análisis.....	34
3.3	Diseño de la investigación.....	35
IV.	CÁLCULOS.....	36
4.1	Diseño Mecánico.....	36
4.1.1	Sistema Core XY.....	36
4.1.2	Tornillo de Potencia en el Eje Z.....	40
4.2	Análisis térmico del extrusor.....	42
4.3	Diseño Eléctrico y Electrónico.....	46
4.3.1	Cálculos de Potencia.....	46
4.3.2	Selección de Componentes.....	47
4.4	Costos.....	50
V.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	50
5.1	Resultados.....	51
5.2	Discusiones.....	53
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
6.1	Conclusiones.....	55
6.2	Recomendaciones.....	56
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
VII.	ANEXOS.....	60
	Anexo A: Descripción de los Componentes.....	60
A.1	Motores.....	60

A.1.1 Servomotor DC .....	60
A.1.2 Motor de Pasos.....	60
A.1.3 Motor de Pasos de Lazo Cerrado .....	60
A.2 Transmisión de Movimiento .....	60
A.2.1 Correas Dentadas (Bandas de Sincronización).....	60
A.2.2 Tornillos de Potencia .....	61
A.3 Guía de Movimiento .....	64
A.3.1 Barras Lisas.....	64
A.3.2 Rieles Lineales.....	65
A.3.3 Ruedas en Perfiles de Aluminio.....	66
A.4 Acoples .....	67
A.4.1 Acoples Rígidos.....	67
A.4.2 Acoples Flexibles.....	68
A.5 Tipos de Extrusores.....	68
A.5.1 Extrusor Tipo Bowden.....	69
A.5.2 Extrusor Directo.....	70
A.6 Partes del Hotend .....	70
A.7 Cama Caliente.....	72
Anexo B: Figuras y Tablas Complementarias .....	73
Anexo C: Matriz de Operacionalización .....	77
Anexo D: Matriz de Consistencia.....	78
Anexo E: Fabricación de la Impresora 3D con Tecnología FDM. ....	79
Anexo D: Planos .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso Genérico de Llevar un Archivo CAD a Imprimir una Pieza 3D .....	19
Figura 2. Impresora Makerbot Tridimensional Replicator 2X .....	21
Figura 3. Pirámide de Materiales Termoplásticos para Impresión 3d con Tecnología FDM .	23
Figura 4. Esquema de Elementos Mecánicos de una Impresora 3d Tipo Core XY .....	24
Figura 5. Componentes Electrónicos de una Impresora 3D .....	25
Figura 6. Esquema del Proceso de Fabricación con la Tecnología FDM .....	26
Figura 7. Esquema del Sistema Cartesiano .....	27
Figura 8. Esquema del Sistema Delta .....	28
Figura 9. Esquema del Sistema Core XY .....	29
Figura 10. Diagrama del Sistema Core XY .....	37
Figura 11. Curvas de Torque y Velocidad del Motor Nema 17 (MS17HD2P4150) .....	38
Figura 12. Proceso General de Material de Extrusión .....	43
Figura 13. Dimensiones del Extrusor MK8 .....	46
Figura 14. Placa Controladora Arduino Mega 2560 R3 .....	51
Figura 15. Cuerdas Cuadradas, Acme y Reforzada .....	63
Figura 16. Estado de Cargas Real durante la Elevación de una Carga W .....	64
Figura 17. Diversas Condiciones y sus Respectivas Longitudes Equivalentes .....	66
Figura 18. Barra Lisa de Acero Cromado .....	67
Figura 19. Rieles Lineales .....	68
Figura 20. Rueda en Perfil V .....	69
Figura 21. Acople Rígido .....	70
Figura 22. Acople Flexible .....	71
Figura 23. Extrusor con Sistema Bowden .....	72
Figura 24. Extrusor con Sistema Directo .....	73
Figura 25. Componentes Principales del Hotend .....	74
Figura 26. Cama Caliente Comerciales .....	75
Figura 27. Diagrama de la Curva entre el % del Torque de Retención de Paso Completo vs los Micropasos por Paso Completo .....	76
Figura 28. Diagrama de la Curva entre el Torque de Diseño vs el Número de RPM del Eje Rápido .....	77
Figura 29. Piezas Fabricadas en PLA y las Varillas de Acero Cromado .....	82
Figura 30. Componente Electrónico – (Ramps 1.4/ Arduino Mega/ Drivers A4899).....	82

Figura 31. Componente Electrónico – (Finales de Carrera y Fuente de 12V).....	83
Figura 32. Montaje del Sistema Core XY.....	83
Figura 33. Impresora 3D Terminada.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencia Consumida de los Componentes Electrónicos a Máxima Carga .....	48
Tabla 2. Selección de los Componentes Electrónicos .....	50
Tabla 3. Lista de Precios de los Componentes Electrónicos .....	52
Tabla 4. Resultados de los Parámetros de Funcionamiento .....	53
Tabla 5. Resultados Calculados para el Motor .....	53
Tabla 6. Resultados Calculados para el Sistema Core XY .....	53
Tabla 7. Resultados Obtenidos para el Tornillo de Potencia en el Eje Z .....	54
Tabla 8. Resultados Obtenidos del Cálculo Térmico del Extrusor .....	54
Tabla 9. Selección de los Componentes Electrónicos .....	54
Tabla 10. Incremento del Torque por Micropasos así como el Número de Micropasos por Aumento de Paso Completo .....	78
Tabla 11. Selección del Ancho de la Correa con Paso de 2mm .....	79
Tabla 12. Propiedades Reológicas de Polímeros .....	79



## RESUMEN

Este trabajo se desarrolló mediante la consulta de catálogos de impresoras 3D, literatura especializada en impresión 3D y la utilización del programa Inventor para crear el modelo tridimensional. Se abordaron tres aspectos clave en el diseño y metodología: el diseño mecánico, la evaluación térmica del extrusor y la selección de componentes eléctricos y electrónicos. En el diseño mecánico, se enfatizó el tornillo de potencia Tr8 x 2 mm de paso, crucial para soportar la carga de la cama de impresión y el filamento fundido, determinando una carga crítica de 174.32 N y una carga máxima elevada de 77 N. La evaluación térmica del extrusor reveló un flujo volumétrico de 103.2 mm<sup>3</sup>/s con un tiempo de preparación del extrusor de 1 minuto y una caída de presión total de 23.42 MPa con una fuerza de deposición de 2.407 N.

**Palabras Claves:** Impresora 3D, Extrusor, tecnología FDM.

## ABSTRACT

This work was developed through consultation of 3D printer catalogs, literature specialized in 3D printing, and the use of the Inventor program to create the three-dimensional model. Three key aspects were addressed in the design and methodology: mechanical design, thermal evaluation of the extruder, and the selection of electrical and electronic components. In the mechanical design, emphasis was placed on the Tr8 x 2 mm lead power screw, crucial for supporting the load of the printing bed and the melted filament, determining a critical load of 174.32 N and a maximum elevated load of 77 N. The thermal evaluation of the extruder revealed a volumetric flow of 103.2 mm<sup>3</sup>/s with an extruder setup time of 1 minute and a total pressure drop of 23.42 MPa with a deposition force of 2.407 N.

**Keywords:** 3D Printer, Extruder, FDM technology.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En el trabajo de Aycardi y Tuirán (2017) titulado "**Diseño y Construcción de una Impresora 3D de Gran Formato con Tecnología de Fabricación con Filamento Fundido (FFF) Tipo Core XY Basada en Arduino**", se llevó a cabo la fabricación y el diseño de una impresora 3D para la empresa 3D Design, Engineering and Architectural Models (3Deam) con sede en Montería. El objetivo era fabricar impresiones con un volumen de hasta 0.16 m<sup>3</sup>, lo que permite el modelado de maquetas y prototipos con un alto nivel de precisión y detalle. La máquina está controlada por una placa electrónica Arduino Mega 2560, y se realizaron simulaciones de carga a la estructura y eje mediante el uso del programa Solidworks para verificar los esfuerzos a los que están sometidos. Se obtuvo una deflexión máxima de 0.068 mm y una tolerancia dimensional de  $\pm 0.44$  mm.

En la investigación de Gamarra Miranda y Parraguez de la Cruz (2019) con el título "**Diseño de una Impresora 3D para Imprimir Piezas con Polímeros de Volumen Máximo de 30 cm x 30 cm x 30 cm para la Universidad Señor de Sipán**", se analizó la diversidad en el diseño de impresoras mediante un patrón de selección para estimar las cargas de diseño para los ejes, guías y soportes mediante cálculos estáticos. Se utilizó una interfaz gráfica de usuario para obtener los diámetros de las barras, velocidad de desplazamiento, tasa de deposición, resolución y potencia general de la máquina. Asimismo, se realizó la simulación de las cargas de las barras y estructuras externas mediante el software Solidworks para optimizar detalles de geometría y material. Entre los resultados, se determinó un diámetro de 8 mm para las barras en los ejes X-Y y una barra de 10 mm para el eje Z. Se seleccionó un material AISI 304 con un factor de seguridad mínimo de 1.2.

En el estudio de Palomino Vásquez (2021) titulado "**Implementación de un Prototipo de Impresora 3D para Fabricación de Piezas en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica, Utcubamba, Amazonas, 2020**", se diseñó y construyó un prototipo de impresora 3D con metodología FDM con el objetivo de reproducir modelos 3D a partir del CAD, utilizando PLA como material de fabricación.

## **1.2. Formulación del Problema de Investigación**

¿Cómo diseñar y construir una impresora 3D para la fabricación de moldes de piezas mecánicas, con el propósito de mejorar la eficiencia y la flexibilidad en los procesos de fundición industrial?

## **1.3. Limitaciones de la investigación**

- La impresora se ha construido para imprimir material PLA, ya que el diseño no cuenta con una cama calefactora.
- la impresora 3D realizará impresiones de acuerdo a su volumen según el diseño si se desea imprimir matrices de tamaños mayores, este se realizará en varias secciones para llegar a las dimensiones solicitadas.

## **1.4. Objetivos de la Investigación**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Diseñar, construir e implementar una impresora 3D que permita la fabricación de moldes de fundición de piezas mecánicas.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Determinar los parámetros de funcionamiento de la impresora y definir las dimensiones generales de la impresora diseñada.
- b. Diseñar los elementos y sistemas mecánicos de la impresora basado en la tecnología FDM de impresión.
- c. Diseñar y evaluar térmicamente el sistema de extrusión que permita descargar filamento PLA a velocidades de impresión entre 100 y 150 mm/s

para alcanzar una temperatura óptima en el depósito de capas del extrusor conservando su calidad en la impresión.

- d. Seleccionar los elementos electrónicos y programar el Arduino que hará funcionar la impresora acorde al requerimiento de procesamiento.

### **1.5. Formulación de la Hipótesis**

El diseño y la construcción correcta de una impresora 3D FDM permite fabricar moldes de piezas mecánicas para fundición con el propósito de mejorar la eficiencia y la flexibilidad en los procesos de fundición industrial.

### **1.6. Justificación de la Investigación**

En el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos industriales son de común uso los prototipos, ya sean partes de maquinarias (como automóviles, prensas, etc.) o modelos a escala. Hasta hace muy poco tiempo las dificultades no permitían que muchos desarrolladores e investigadores tuvieran acceso a una tecnología que les permitiera hacer sus prototipos de forma rápida, sencilla y sobre todo económica, hasta la llegada de la impresión 3D de modelado por deposición fundida (FDM). En este contexto la empresa FAINSEB E.I.R.L., en su aspiración de crecimiento, desea implementar un área de fundición de piezas en bronce y aluminio, por lo que quiere añadir a sus procesos la tecnología de impresión 3D FDM para sus matrices y obtener los beneficios que conlleva. Por este motivo se construirá una impresora 3D con un procedimiento de diseño y fabricación alternativo, más económica de lo que se podría conseguir una del extranjero. Adicionalmente, a nivel teórico, los procedimientos y cálculos realizados servirán como base para el desarrollo tecnológico local y nacional, ya que este campo en la actualidad está muy poco desarrollado. A nivel social y económico, permitirá que la empresa pueda realizar trabajos de forma más rápida y eficiente por lo que aumentará su cuota de trabajo, lo que generará más ingresos que circularan en la economía local, beneficiando a la comunidad. Finalmente, a nivel metodológico, esta tesis servirá como antecedente para nuevas investigaciones.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Manufactura Aditiva

El término formalizado para lo que anteriormente se conocía como creación rápida de prototipos y popularmente como impresión 3D es el proceso de manufactura aditiva (AM). Este método implica la creación de piezas tridimensionales mediante la sobreposición de capas, como se define en la obra de Gibson et al. (2015, p.2).

La impresora 3D se basa en un software de diseño asistido por computadora (CAD) para la creación de piezas complejas o réplicas. Este software no solo facilita el diseño, sino que también se puede utilizar para llevar a cabo procesos de ingeniería inversa, fabricación y mejora de las piezas. El proceso implica la transformación y optimización del diseño, que se ejecuta mediante un programa laminador. Este último configura los parámetros necesarios de impresión para la fabricación tridimensional del objeto.

### 2.2 Proceso de Funcionamiento de una Impresora 3D

La fabricación aditiva (AM) abarca varios pasos, desde el diseño asistido por computadora (CAD) hasta la obtención del modelo físico final. Según Gibson et al. (2015), la aplicación de AM varía en función del tipo de producto, con diferentes niveles de participación y formas de implementación. En productos pequeños y relativamente simples, AM puede emplearse únicamente para crear modelos de representación. En cambio, para productos de gran envergadura y complejidad, con un contenido técnico significativo, la manufactura aditiva puede intervenir en diversas etapas e iteraciones durante el proceso de desarrollo (p.4). La figura 1 ilustra los siguientes pasos.

- Paso 1: Construcción del modelo CAD.
- Paso 2: Conversión al formato STL.
- Paso 3: Transferencia y manipulación de archivos STL/AMF en máquinas AM.

- Paso 4: Configuración y puesta en marcha de la máquina impresora 3D.
- Paso 5: Construcción del modelo (Impresión).
- Paso 6: Retiro y limpieza del modelo.
- Paso 7: Post – proceso del modelo o pieza.
- Paso 8: Aplicación

**Figura 1**

*Proceso Genérico de Llevar un Archivo CAD a Imprimir una Pieza 3D*



*Nota.* Adaptado de Additive Manufacturing Technologies (p. 5), por Gibson et, al, 2015, Springer.

### **2.3 Modelación por deposición fundida**

De acuerdo con la norma ISO ASTM 52900:2015, titulada "Terminología estándar para fabricación aditiva - Principios generales - Terminología", se especifican siete categorías dentro de la fabricación aditiva:

- Binder Jetting (Brinde Jetting)
- Directed Energy Deposition (Deposición de Energía Directa)
- Material Jetting (Material Jetting)

- Powder Bed Fusion (Fusión por Cama de Material en Polvo)
- Sheet Lamination (Manufactura de Objetos Laminados)
- Material Extrusion (Modelación por Deposición Fundida):
- Stereolithography (Estereolitografía)

La Modelación por Deposición Fundida (FDM), también conocida como Fused Deposition Modeling en inglés, es una tecnología de fabricación aditiva que se utiliza para construir objetos o piezas mediante la deposición de capas de termoplásticos. Esta tecnología encuentra diversas aplicaciones, siendo especialmente relevante en campos como la ingeniería y la medicina.

Según la descripción de Gibson, el proceso de modelación FDM se lleva a cabo en seis pasos:

- Carga del Material.
- Licuefacción del Material.
- Extrusión.
- Solidificación.
- Diseño de Soportes.
- Ploteo y Control de Paso.

## **2.4 Impresoras 3D para FDM**

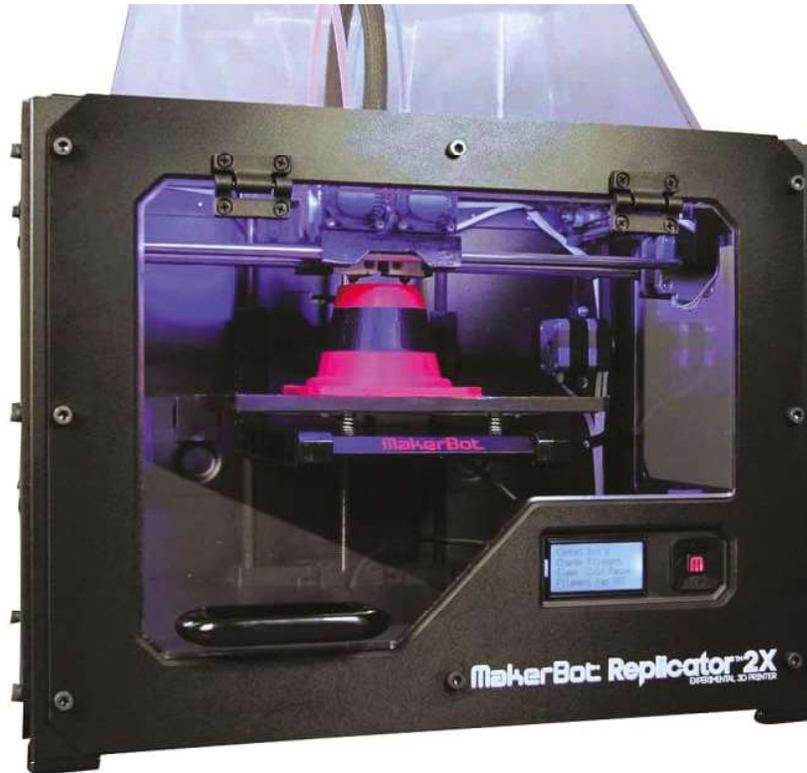
La Modelación por Deposición Fundida (FDM) requiere de una máquina capaz de alimentar el filamento a un sistema mecánico de absorción que posteriormente será extruido, fundido y depositado para construir objetos tridimensionales. Existen diversas variedades de impresoras 3D, y un ejemplo notable es la gama de máquinas Stratasys FDM. Esta gama abarca desde máquinas con especificaciones mínimas, de pequeña escala y bajo costo, hasta máquinas más grandes, sofisticadas y versátiles que son más costosas.

Entre las opciones disponibles, se destaca otra gama de impresoras, la primera subsidiaria, Dimensión, que se centra en máquinas de menor costo. Es importante destacar que la mayoría de las piezas fabricadas con este tipo de máquinas se utilizan como modelos

conceptuales en las primeras etapas del desarrollo del producto, lo que demuestra su versatilidad y utilidad en la investigación de las fases iniciales de diseño y desarrollo.

**Figura 2**

Impresora Makerbot Tridimensional Replicator2X



*Nota.* Adaptado de MakerBot (<https://www.makerbot.com/3d-printers/sketch-classroom/>)

## 2.5 Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión son elementos clave que determinan el tiempo de fabricación, las propiedades mecánicas, los acabados y las cualidades del producto final en la impresión 3D. Estos parámetros, ajustados según las necesidades del operador o cliente, incluyen:

**Temperatura de Impresión:** Influencia en el proceso de fundición del material en el extrusor, siendo proporcional a la velocidad de impresión. Se ajusta según las propiedades viscoelásticas del material. Por ejemplo, para ABS se trabaja entre 220-240 °C a 50 mm/s y para PLA entre 190-210 °C a 60 mm/s, con desviaciones estándar de 0.017-0.037 mm para ABS y 0.010-0.034 mm para PLA (Altinkaynak et al., 2020).

**Orientación de Impresión:** Define la posición o trayectoria del extrusor para fabricar la pieza en 3D. La orientación afecta las propiedades mecánicas y se recomiendan orientaciones específicas, como 0°, 45° y 90°, así como combinaciones como 0-90°, 45-45° o "fast honeycomb" también conocido como panal de abeja.

**Densidad de Impresión o Relleno:** Refiere a la cantidad de material depositado en una pieza por unidad de volumen. Menos vacíos resultan en mayor densidad aparente, resistencia, tiempo de impresión y uso de material.

**Altura de Capa de Impresión:** Cumple un papel crucial en la calidad de impresión. Aumentar la altura de capa reduce el tiempo de impresión, pero puede afectar la calidad superficial. Se ajusta según la precisión requerida para la pieza y el uso previsto del producto final.

## 2.6 Materiales Usados en la Impresión 3D con Tecnología FDM

En la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), se emplean diversos materiales para la impresión 3D. Algunos de estos materiales incluyen:

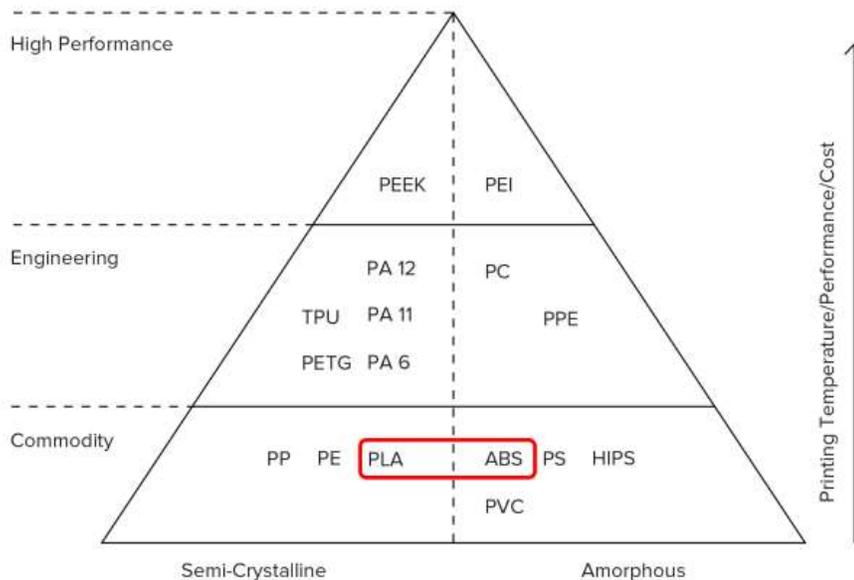
- **Filamentos Termoplásticos:** Plásticos termosensibles que suelen contener carbono y se producen mediante polimerización por adición o condensación.

- **PLA (Ácido Poliláctico):** Material de alto consumo, fácil de imprimir y altamente preciso. Se caracteriza por tener un bajo punto de fusión y ser rígido. La temperatura de procesamiento varía entre 180-220 °C.
- **ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno):** Polímero termoplástico resistente con una vida útil prolongada. Ampliamente utilizado en sectores como la automoción, es frecuente en la impresión 3D debido a su alta dureza y resistencia a temperaturas elevadas. Las temperaturas de proceso oscilan entre 215-250 °C.
- **Nylon:** Material fuerte y flexible, diseñado como filamento especial para impresoras. Sus propiedades mecánicas lo hacen adecuado para aplicaciones específicas.

Estos materiales ofrecen una variedad de opciones para adaptarse a diversas necesidades y aplicaciones en la impresión 3D utilizando la tecnología FDM.

### Figura 3

*Pirámide de Materiales Termoplásticos para Impresión 3D con Tecnología FDM.*



*Nota.* Adaptado de The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications (p. 50), por Ben Redwood et, al, 2017, 3D Hubs.

## 2.7 Partes de la Impresora 3D con Tecnología FDM

Los componentes principales se clasifican en:

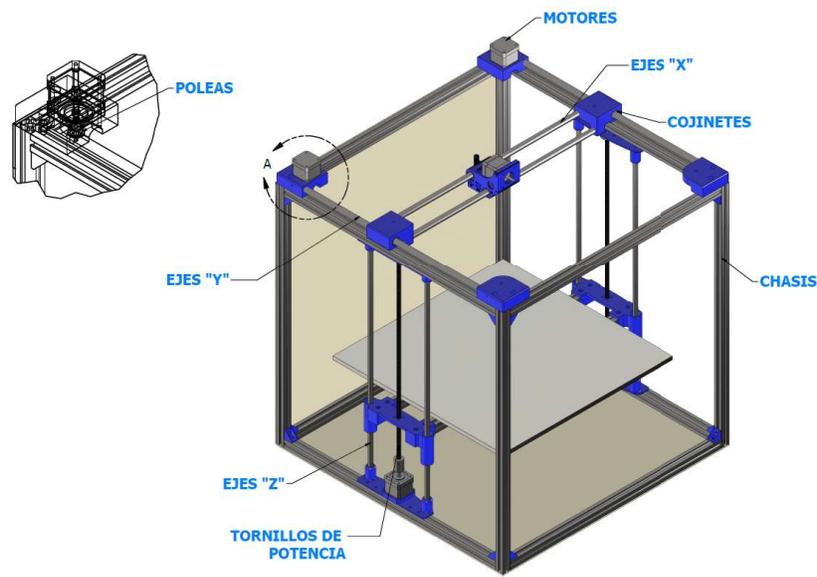
- Cuerpo mecánico.
- Sistema electrónico.
- Extrusor.

### 2.7.1 Cuerpo Mecánico

Se compone de una estructura y un sistema dinámico que posibilitan el movimiento en los ejes X, Y y Z. La movilidad en el eje Z se logra mediante un sistema de elevación impulsado por tornillos de potencia, permitiendo el desplazamiento vertical de la plataforma de impresión. El desplazamiento en los ejes X e Y se consigue a través de un sistema de ejes con rodamientos lineales, los cuales son desplazados por motores acoplados a un sistema de transmisión sincronizado mediante poleas y correas dentadas.

**Figura 4**

*Esquema de Elementos Mecánicos de una Impresora 3D Tipo Core XY*



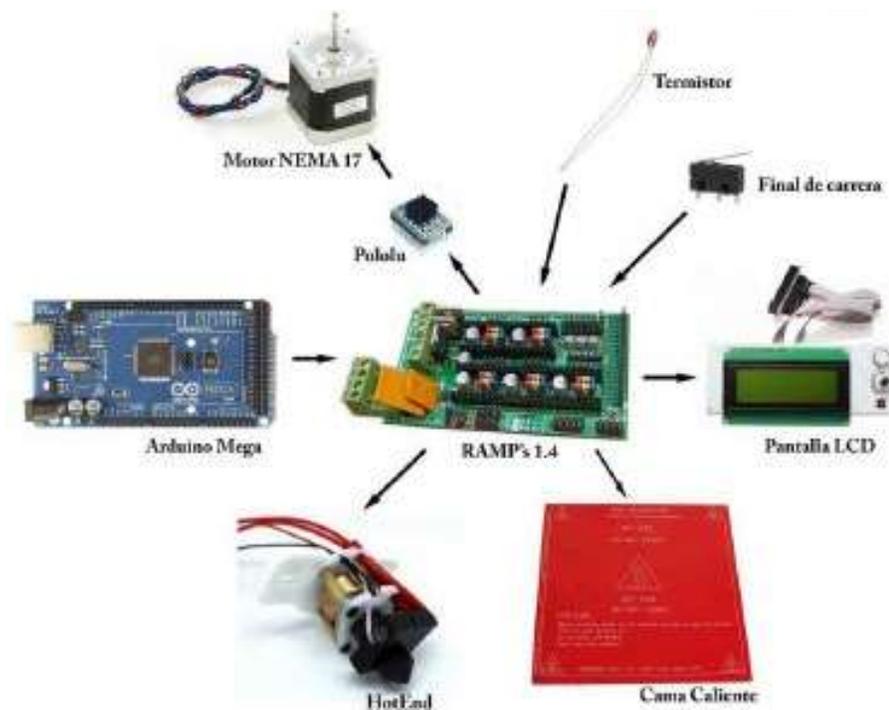
*Nota.* Elaboración Propia

### 2.7.2 Sistema Electrónico

El sistema eléctrico se compone de una placa Arduino conectada mediante pines a una placa de extensión conocida como RAMP (RepRap Arduino Mega Pololu Shields). Esta conexión engloba los motores paso a paso, el extrusor, las resistencias, los termistores, los finales de carrera, el ventilador de electrónica, el ventilador de capa y la pantalla de control. Todos estos elementos reciben alimentación a través de una fuente de poder o un inversor de corriente que convierte 220V de corriente alterna a 24V de corriente continua.

**Figura 5**

*Componentes Mecánicos y Electrónicos de una Impresora 3D.*



Nota. Adaptado de ZonaMaker (<https://www.zonamaker.com>), 2017.

### 2.7.3 Extrusor

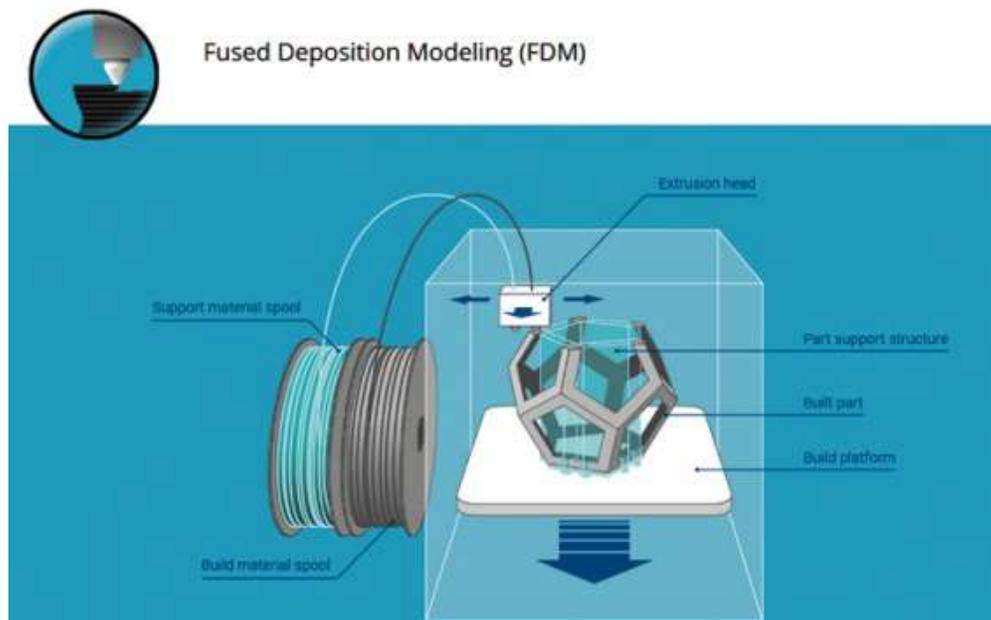
La función principal de este componente es absorber mecánicamente el filamento desde el carrete embobinado hasta el punto final donde se produce la fundición en la boquilla.

La altura de la capa puede ser determinante para la calidad de impresión, siempre y cuando exista estabilidad en el eje Z y una sincronización adecuada entre los ejes X e Y.

Estos aspectos están interrelacionados, ya que el rendimiento de uno depende del otro.

#### Figura 6

*Esquema del Proceso de Fabricación con la Tecnología FDM.*



*Nota.* Adaptado de Additively (<https://www.additively.com/en>), 2015

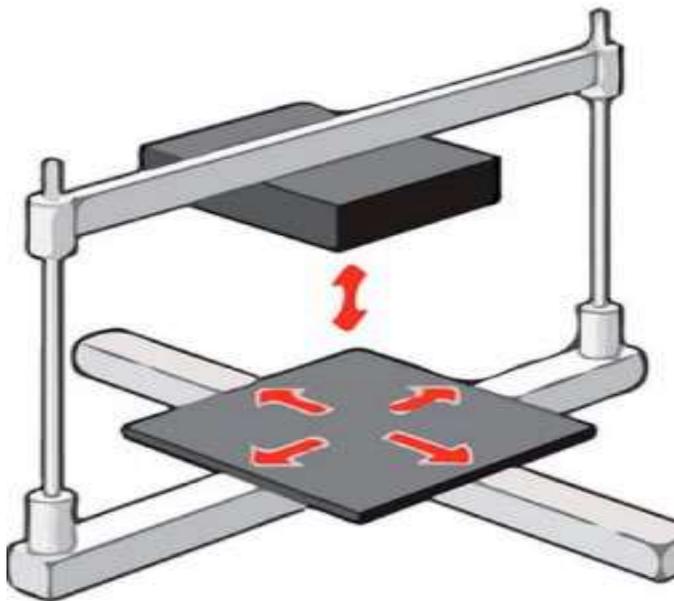
## 2.8 Sistemas de Estructuras de Impresoras FDM

### 2.8.1 Sistema Cartesiano

Este sistema es el más utilizado en las impresoras de escritorio, donde sus motores operan de forma individual para el movimiento en sus respectivos ejes direccionales (X, Y y Z). Es uno de los sistemas más comunes y sencillos debido a que tanto su mecanismo como su software son fáciles de manejar.

#### Figura 7

*Esquema del Sistema Cartesiano*



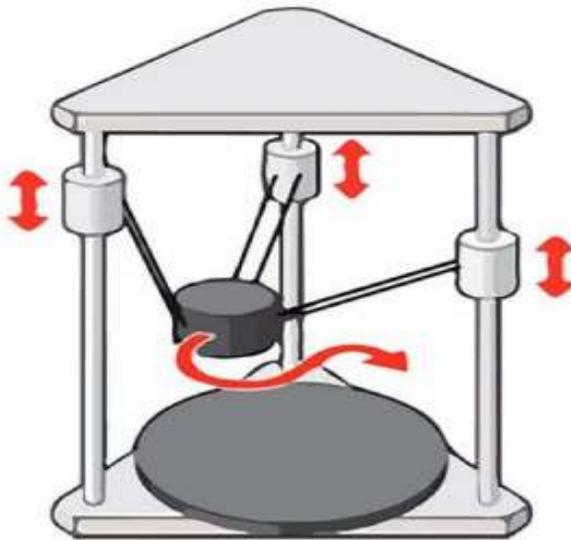
*Nota.* Adaptado de Schmitt, B. et al., 2018

### 2.8.2 Sistema Delta

El diseño de este sistema adopta la forma de un cilindro, donde el cabezal se ubica en el centro de la estructura, conformado por tres brazos que controlan su movimiento, manteniéndose paralelo a la plataforma circular de impresión, como se ilustra en la figura 8. La principal ventaja de este sistema radica en su estabilidad estructural, con motores fijos que permiten que el cabezal sea más ligero, posibilitando alcanzar velocidades elevadas debido a la baja masa inercial. Su configuración única requiere un software más complejo debido a su geometría intrincada (Schmitt, B. et al., 2018).

**Figura 8**

*Esquema del Sistema Delta*



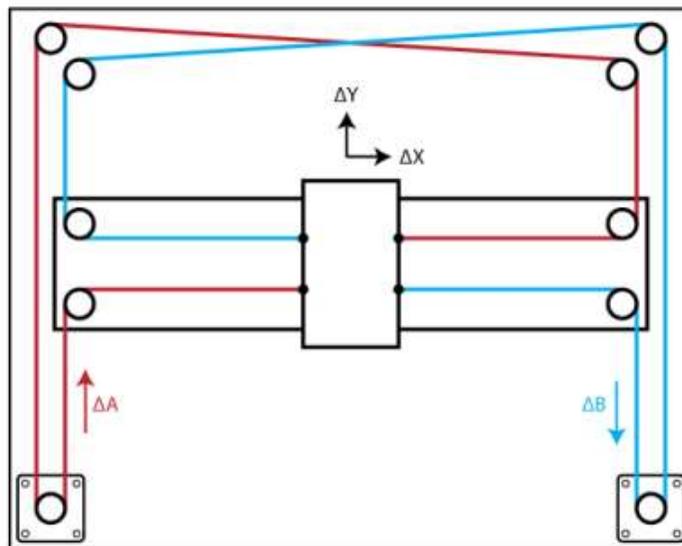
*Nota.* Adaptado de Schmitt, B. et al., 2018

### 2.8.3 Sistema Core XY

El sistema Core XY implica el movimiento de los ejes X e Y con motores fijados en su estructura, reduciendo así el peso en el cabezal. Para lograrlo, se utiliza un sistema de transmisión por correas dentadas. El movimiento en estos ejes depende de la sincronización del sistema XY, como se ilustra en la figura 9. Después de determinar el movimiento en estas dos dimensiones, el eje Z puede desplazar verticalmente el sistema XY como un conjunto o mover la cama de impresión (Moyer, I. 2012).

**Figura 9**

*Esquema del Sistema Core XY*



*Nota.* Adaptado de Moyer, I.( <http://corexy.com/theory.html>), 2012.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Materiales**

##### **3.1.1. Equipos y servicios**

- Laptop HP PAVILION Core i5 e internet
- Memoria USB
- Celular y línea telefónica
- Impresora y fotocopias
- Electricidad y agua
- Transporte

##### **3.1.2. Materiales**

- Libros de ingeniería y papers
- Software (Autodesk Inventor y Fusion 360, Microsoft Office, etc.)
- Materiales de oficina (lapicero, resaltador, regla, etc.)

#### **3.2. Método**

##### **3.2.1. Tipo de Investigación**

- De acuerdo a su enfoque : Cuantitativa
- De acuerdo a su alcance : Explicativa
- De acuerdo a su tipo : Aplicada
- De acuerdo a su diseño : Preexperimental

##### **3.2.2. Línea de Investigación**

Ingeniería Mecánica

### 3.2.3. Variables

#### — Determinación de las variables:

- a) Variable Independiente: Moldes de piezas mecánicas para fundición.
- b) Variable Dependiente: Diseño y construcción de una Impresora 3D.

#### — Definición conceptual de las variables

**Cuadro 1:** *Definición conceptual de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
<b>Independiente:</b> <b>Moldes de piezas mecánicas para fundición.</b>	Objeto o pieza impresa en 3D mediante el proceso de modelado por deposición fundida (FDM) que servirá como matriz para una operación de fundición de una pieza mecánica.
<b>Dependiente:</b> <b>Diseño y construcción de una Impresora 3D.</b>	Método no industrializado (artesanal) para diseñar, calcular y fabricar una impresora 3D FDM que cumpla los requisitos de operación a un menor costo.

#### — Definición operacional de las variables:

**Cuadro 2:** *Definición operacional de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL
<b>Independiente:</b> <b>Moldes de piezas mecánicas para fundición.</b>	Listas de cotejo o guías de dimensiones, pruebas resistencia mecánica, guías de inspección visual acabado superficial, test de resistencia de materia cuadros comparativos.
<b>Dependiente:</b> <b>Diseño y construcción de una Impresora 3D</b>	Revisión bibliográfica, listas de cotejo y cuestionarios sobre perfiles de aluminio y pernería, cables, etc., cuadros comparativos, pruebas de conocimientos de mecánica, electricidad y termodinámica, guías de entrevistas.

— **Indicadores de las variables:**

a) Variable independiente

**Cuadro 4:** Dimensiones e indicadores de la variable independiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADORES
<b>VI = V1</b> <b>Moldes de piezas mecánicas para fundición.</b>	Medidas longitudinales	— Largo.
		— Ancho.
		— Grosor.
		— Diámetro.
	Magnitudes físicas	— Peso.
		— Dureza.
	Acabado superficial	— Altura de capa.

b) Variable dependiente

**Cuadro 3:** Dimensiones e indicadores de la variable dependiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADORES
<b>VD = V2</b> <b>Diseño y construcción de una Impresora 3D</b>	Datos Iniciales	— Volumen de impresión.
		— Velocidad de impresión.
		— Materia prima de impresión
	Sistemas de Impresoras FDM	— Condiciones generales
		— Impresoras Core XY
	Diseño y Calculo	— Mecánico.
		— Eléctrico.
		— Térmico.
	Selección	— Componentes electrónicos.
		— Componentes eléctricos.
— Componentes estructurales.		
Fabricación	— Componentes mecánicos.	
	— Firmware.	
		— Tolerancias dimensionales.

### **3.2.4. Métodos de la investigación**

- Método General : Método científico.
- Métodos Específicos : Método de modelación y experimental.

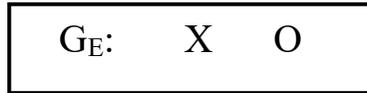
### **3.2.5. Procedimiento de la investigación**

Se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Elaboración del proyecto de investigación: Después de los preparativos preliminares, búsqueda de marco teórico y antecedentes, se elaboró y presentó el proyecto.
- Realización de cálculos y diseño: Después de aprobado el PTI, se aplicó todo lo planificado y se realizaron los cálculos y diseño de la impresora 3D FDM.
- Fabricación de impresora 3D FDM: Con los datos de los cálculos y diseño se fabricó la impresora.
- Medición de parámetros resultantes de la impresora: Después de terminar la fabricación y la puesta en marcha, se tomó la medición de todos los parámetros de funcionamiento.
- Análisis de los resultados y conclusiones: Con los parámetros resultantes se hizo la comparación con los cálculos y diseño.
- Elaboración del informe final: Una vez analizados los datos y llegado a las conclusiones de la investigación se realizó el informe final.
- Sustentación del informe final de investigación: Todo el procedimiento de la investigación, así como los resultados plasmados en el informe final, se sustentó ante un jurado evaluador.

### 3.2.6. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es de tipo preexperimental. Tiene el siguiente esquema de diseño:



Dónde:

- $G_E$  : Grupo Experimental
- X : Aplicación de diseño
- O : Observación o medición de parámetros resultantes

### 3.2.7. Unidad de estudio

- Impresora 3D FDM.

La unidad de investigación es única y no probabilística.

### 3.2.8. Técnicas de procesamiento y análisis

Las técnicas de procesamiento y análisis que se utilizaron fueron:

- Cálculo de potencia eléctrica y amperaje: Se sumó la potencia de todos los componentes eléctricos principales para definir la capacidad de la fuente de alimentación.
- Cálculo de tornillo de potencia: En base al peso de la plataforma, la pieza impresa más pesada y al tornillo comercialmente más usado, se determinó la potencia del motor eléctrico.
- Cálculo de energía del sistema de extrusión: En base a una boquilla comercialmente más usada y los parámetros de uso del material filamento se obtuvo la energía y tiempo necesario para que la impresora entre en funcionamiento.

- Selección de componentes: En base a los cálculos previamente realizados se eligieron los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, estructurales y firmware.
- Fabricación: Una vez ensamblado los componentes se hizo un control de calidad en base a tolerancias dimensionales.

### **3.3 Diseño de la investigación**

El presente trabajo de investigación es de tipo aplicativo, ya que se emplean conocimientos teóricos y convertirlos en conocimientos prácticos para resolver un problema real, transformando dichos conocimientos en tecnología e invenciones. Por esta razón se usarán manuales técnicos de fabricantes, bibliografía relacionada a la tecnología de impresión FDM.

## IV.CÁLCULOS

En este capítulo, se delimitará el alcance del diseño y se establecerán los resultados necesarios para alcanzar una propuesta óptima. Para el diseño de nuestra impresora 3D, se realizarán cálculos basados en los siguientes parámetros:

- Velocidad de impresión: 100 – 200 mm/s
- Material: Se utilizará filamento termoplástico PLA con un diámetro de 1.75 mm.
- Geometría: Las dimensiones del equipo deben ser adecuadas para un volumen de trabajo de 480 x 480 x 480 mm<sup>3</sup>.
- Energía: Se requerirá corriente alterna de 220V, que a través de un inversor de corriente o fuente de poder se convertirá en corriente continua de 12V para alimentar el sistema eléctrico y electrónico del equipo.

En el plano UNS – 001 (Anexo D), se presenta el modelo de la impresora 3D, donde se evaluará el diseño mecánico, la evaluación térmica del extrusor y se describirán los componentes electrónicos utilizados en este proyecto

### 4.1 Diseño Mecánico

En el diseño de la impresora se dividirá en tres secciones: plano XY, eje Z y extrusor. El plano XY corresponde al sistema con movimiento de velocidad elevada, y se utilizará una configuración Core XY, considerando a los ejes X e Y como un conjunto para los cálculos. El eje Z se refiere al movimiento de la plataforma de impresión mediante un tornillo de potencia.

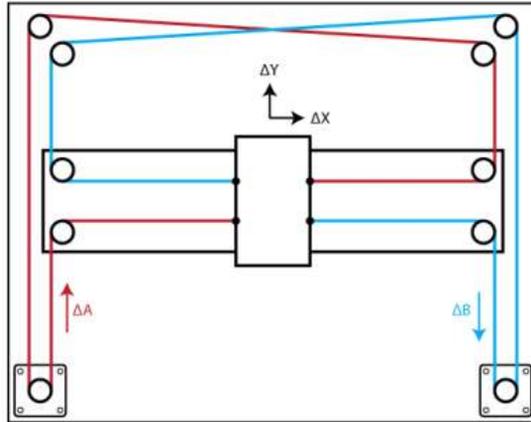
#### 4.1.1 Sistema Core XY

Consta de 02 motores, un sistema de poleas y una correa dentada, como se muestra en la figura 9. En este sistema, es crucial que los motores generen el torque necesario para la velocidad, y que las correas permitan un movimiento estable y fluido.

#### 4.1.1.1 Selección de Motores para el Plano XY

Se tiene la siguiente relación de movimientos de acuerdo al diagrama del sistema Core XY (figura 11).

**Figura 10**



*Diagrama del Sistema Core XY*

*Nota.* Adaptado de Moyer, I. (<http://corexy.com/theory.html>), 2012.

$$\Delta X = \frac{1}{2} * (\Delta A + \Delta B) \quad (1)$$

$$\Delta Y = \frac{1}{2} * (\Delta A - \Delta B) \quad (2)$$

Donde  $\Delta A$  y  $\Delta B$  representan el desplazamiento de las correas dentadas en el motor. El movimiento en el eje X o Y depende de la operación sincronizada de los motores. Además, se establece como condición inicial que el movimiento del eje X corresponde solo al cabezal, mientras que el movimiento en Y comprende el movimiento del eje X, incluyendo el cabezal del extrusor. Por lo tanto, la masa es mayor para el desplazamiento en el eje Y que en el eje X.

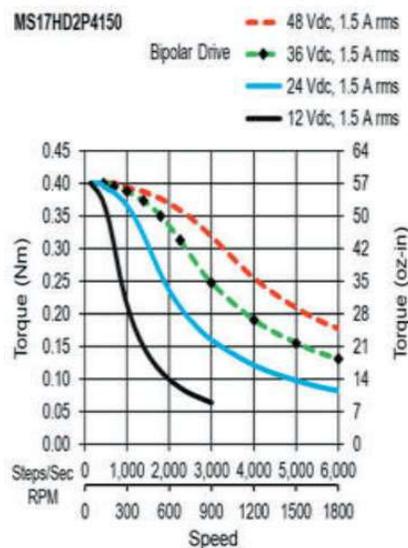
Para calcular la potencia necesaria, se estima una masa en el eje X en función de elementos comerciales, considerando un peso del cabezal de 350 g y el resto

del eje Y como 934 g. Suponiendo una polea con 20 dientes y un paso de 2 mm, se obtiene un radio de giro de 6.37 mm.

El motor de pasos NEMA MS17HD2P4150, en una configuración de 12 V y 1.5 A (según el catálogo de Step Motors del fabricante Moons), tiene un valor de torque de 0.35 N-m para una velocidad de 300 rpm. Este valor es necesario para mover el eje con una velocidad máxima de impresión de 200 mm/s, como se muestra en la figura 11.

**Figura 11**

*Curvas de Torque y Velocidad de Motor Nema 17 (MS17HD2P4150)*



*Nota.* Obtenido del “Catálogo de Step Motors” (p. 35) por Moons’.

El torque encontrado en la gráfica de la figura 11 se ve afectado por los 1/16 micropasos del driver, lo cual para los 16 micropasos el torque se ve reducido al 9.8% (Anexo B). Se tiene el nuevo valor para el torque en la siguiente ecuación:

$$Torque (T) = 0.35 N - m * 9.8\%$$

$$Torque (T) = 0.0343 N - m$$

Teniendo en cuenta la inercia del motor se procede a calcular la masa del motor en la ecuación 3:

$$m_{motor} = \frac{I}{r^2} \quad (3)$$

$$m_{motor} = \frac{I}{r^2} = \frac{57 \text{ gcm}^2}{0.637^2 \text{ cm}^2} = 140.5 \text{ g}$$

Para determinar la tensión en las correas se calcula mediante la ecuación:

$$F = \frac{\text{Torque}}{r} \quad (4)$$

$$F = \frac{\text{Torque}}{r} = \frac{0.0343 \text{ N.m}}{0.00637 \text{ m}} = 5.38 \text{ N}$$

Se evalúa el movimiento en el eje Y, ya que en este movimiento se traslada tanto el cabezal como el eje X juntos. Siendo un sistema de movimiento tipo Core XY, ambos motores trabajan sincronizados para lo cual se calcula la masa total.

$$m_{total} = \text{Cabezal} + \text{eje X} + 2 * m_{motor} = 0.35 + 0.934 + 2 * 0.1405 = 1.565 \text{ kg}$$

De la segunda ley de Newton, calculamos la aceleración máxima del sistema:

$$a = \frac{2 * F}{m} \quad (5)$$

$$a = \frac{2 * F}{m} = \frac{2 * 5.38}{1.565} = 6.875 \text{ m/s}^2$$

Calculamos el tiempo para llegar a la velocidad de 150 mm/s en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{V_f - V_o}{a} \quad (6)$$

$$t = \frac{V_f - V_o}{a} = \frac{0.15 - 0}{6.875} = 0.02 \text{ s}$$

#### 4.1.1.2 Selección de Correas para el sistema XY

Del manual Timing Belt del fabricante Gates, se toma un factor de servicio (fs) de 1.7 para un uso continuo de 16 – 24h diarias para motores de paso y máquinas de impresión 3D, se tiene:

$$Q = 8.85 * \text{Torque} = 8.85 * 0.035 = 0.30975 \text{ lb - in} \quad (7)$$

$$\text{Torque de diseño} = Q * fs = 0.30975 * 1.7 = 0.526 \text{ lb} - \text{in} \quad (8)$$

La elección del sistema de poleas y correas se basa en la intersección del torque de diseño (0.526 lb-in) con una velocidad de 300 rpm, según se muestra en la figura 29 (Anexo B). Aunque la tabla 10 (Anexo B) indica una polea de 12 dientes con una correa de 6 mm de espesor, se opta por poleas de 20 dientes y correas de 6 mm debido a su disponibilidad. Esta configuración proporciona un sistema que soporta tres veces más el torque de diseño a una velocidad de 300 rpm. En consecuencia, se selecciona una correa PowerGrip GT3 de 2 mm de paso y 6 mm de ancho.

#### 4.1.2 Tornillo de Potencia en el Eje Z

Para el diseño del tornillo de potencia se consideró lo siguiente: “el tornillo deberá tener autobloqueo con la fin de que la cama no se desplace negativamente con su peso muerto o en caso de un corte de energía que la posición en Z siempre mantenga la carga en su lugar para luego continuar la impresión sin complicaciones para lo cual se considera la condición de autobloqueo que está relacionada entre el coeficiente de fricción y el ángulo de avance del tornillo” (Robert L. Norton, pg. 732), definida por la siguiente ecuación

$$\mu \geq \frac{L}{\pi d_p} \cos \alpha \text{ o; } \mu \geq \tan \lambda \cos \alpha \quad (9)$$

$$\rho' \geq \lambda \quad (10)$$

Se considera un tornillo tipo Tr8\*2 que es un tipo de cuerda ACME, para lo cual

$\alpha = 14.5^\circ$ ;  $\mu = 0.1$ ;  $d_p = 7$ ; entonces tenemos:

$$\rho' = \tan^{-1} \left( \frac{\mu}{\cos \alpha} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{0.1}{\cos 14.5} \right) = 5.89^\circ \quad (11)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{L}{\pi * d_p} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2}{\pi * 7} \right) = 5.19^\circ \quad (12)$$

$$5.89^\circ \geq 5.19^\circ$$

Por ello, se cumple la condición de autobloqueo de la ecuación 10 para este tornillo.

Para determinar la carga máxima que puede ser elevada se obtendrá a partir de la ecuación de torque de elevación:

$$T_u = T_{Su} + T_C = \frac{F d_p (\mu \pi d_p + L \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha - \mu L)} + \mu_C F \frac{d_C}{2} \quad (13)$$

$$\frac{T_u}{F} = \frac{\tan(\rho' + \lambda) * d_p}{2} + \frac{\mu * d_C}{2} \quad (14)$$

$$\frac{T_u}{F} = \frac{\tan(5.89^\circ + 5.19^\circ) * 7}{2} + \frac{0.1 * 16}{2} = 1.49 \text{ mm}$$

El motor de pasos NEMA 17 en configuración de 12 V y 1.5 A tomado del catálogo de Step Motors del fabricante Moons se tiene un torque de 300 Nmm para una velocidad de 450 rpm. Este torque se ve afectado por los micropasos que usa el driver, para 4 micropasos el torque se ve reducido al 38.27% (Tabla 9 – Anexo B). Por lo tanto, tenemos:

$$T_u = 300 * 0.3827 = 114.81 \text{ Nmm}$$

De la ecuación 14 calculamos la carga máxima que puede ser elevada con la configuración del motor:

$$F = \frac{T_u}{1.49 \text{ mm}} = \frac{114.81 \text{ Nmm}}{1.49 \text{ mm}} = 77.05 \text{ N} \approx 7.85 \text{ Kg}$$

Ahora se determinará la fuerza máxima que soportará el tornillo considerando un factor de seguridad de 7, para lo cual se considerará el tornillo como una columna doblemente empotrada, se calcula la razón de esbeltez en la siguiente ecuación:

$$S_r = \frac{l}{d_m} = \frac{540}{6.2} = 87.09 > 10$$

Por lo tanto, se analizará la carga crítica mediante la ecuación de Euler, donde el factor para una columna doblemente empotrada es de 0.65 (valor teórico Anexo B); se calcula el valor de la longitud equivalente en la siguiente ecuación:

$$l_{ef} = 0.65 l = 0.65 * 540 = 351 \text{ mm}$$

$$S_r = \frac{4 * l_{ef}}{d_m} = \frac{4 * 351}{6.2} = 226.45$$

Entonces la fuerza máxima que soportara el tornillo con un factor de seguridad 7 (según (Paulsen), se debe cumplir que el factor de seguridad sea no menor al recomendado lo cual está en un rango de 6 a 8) en la siguiente ecuación tenemos:

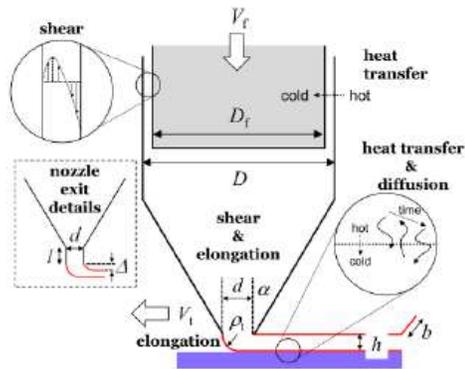
$$P_{cr} = F_{m\acute{a}x} = \frac{\pi^2 * E * A}{S_r^2 * f_s} = \frac{\pi^2 * 2.1 * 10^5 * 30.19}{226.45^2 * 7} = 174.32 \text{ N}$$

## 4.2 Análisis térmico del extrusor

Según Go, et al., 2017, la impresora 3d con metodología de deposición fundida (FDM) depende del sistema mecánico que alimenta el filamento, el bloque térmico y el sistema de movimiento (p.03), como se muestra en la figura 12.

**Figura 12**

*Proceso General de Material de Extrusión.*



*Nota.* El bloque térmico funde el filamento de diámetro  $D_f$  alimentada con una velocidad  $V_f$  en un cilindro de diámetro  $D$ .

El filamento fundido es depositado sobre la plataforma moviendo la boquilla a una velocidad  $V_t$  depositando una capa de altura  $h$  y ancho  $w$ . La fusión hace una interfaz de

curvatura que puede crear un estiramiento. Obtenido de (Mackay, The Importance of Rheological Behavior in the Additive Manufacturing Technique Material Extrusion, 2018). Según Ñauta y Vergara, 2017, los fluidos se clasifican en Newtonianos y No Newtonianos; en la impresora 3d con metodología de deposición fundida se emplean el PLA y ABS que son fluidos no newtonianos independientes del tiempo (p.24).

Según Mackay, (2018), “La transferencia de calor en fluidos no newtonianos es una función de la velocidad de cizallamiento, como es el caso de los fluidos newtonianos, y puede cambiar cuando el comportamiento del flujo cambia” (p.1551). La velocidad de cizallamiento del polímero fundido en la pared capilar se calcula utilizando el caudal de volumen obtenido de la velocidad del pistón y el área transversal de acuerdo a la ecuación, se tiene que la tasa de cizallamiento aparente ( $\gamma_a$ ) es igual:

$$\gamma_a = \frac{32Q^*}{\pi d^3} \quad (15)$$

Para determinar el caudal volumétrico, calcularemos el flujo del material (filamento) mediante la ecuación de la conservación de la masa ( $m_e' = m_s' = \dot{m}$ ). Considerando que la potencia  $\dot{w} = 0$ , y despreciando las pérdidas de energía cinética y potencial. Asumiendo unas pérdidas del 10% en el calor entregado, se obtiene un flujo de calor de 36W hacia los componentes del extrusor, con lo cual realizamos los cálculos para determinar el tiempo necesario para que el polímero esté en condiciones de uso.

La energía necesaria para llevar el disipador a la temperatura deseada ( $T_d = 250^\circ\text{C}$ ), asumiendo una temperatura del medio ambiente ( $T_a = 20^\circ\text{C}$ ); considerando

$$\rho_{PLA} = 1250 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \frac{\pi * (D_e^2 - D_i^2) * L}{4} \quad (16)$$

$$V = \frac{\pi * (0.02^2 - 0.003^2) * 0.013}{4}$$

$$V = 3.992 \times 10^{-6} m^3$$

$$m = \rho * V = 1250 \frac{Kg}{m^3} * 3.992 \times 10^{-6} m^3 = 0.005 Kg$$

Se calcula la energía necesaria mediante la ecuación:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (17)$$

$$Q = 0.005 Kg * 1700 \frac{J}{Kg^\circ K} * 230^\circ K = 1955 J$$

La energía suministrada por el disipador  $\dot{Q} = 36W$ , el tiempo requerido para poner a punto el extrusor está dado mediante la siguiente expresión:

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} \quad (18)$$

$$t = \frac{1955J}{36W} = 54.3 s \approx 1min$$

Entonces el flujo másico de material es:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p * \Delta T} \quad (19)$$

$$\dot{m} = \frac{36W}{1210 \frac{J}{Kg^\circ K} * 230^\circ K} = 0.129 g/s$$

$$Q^* = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (20)$$

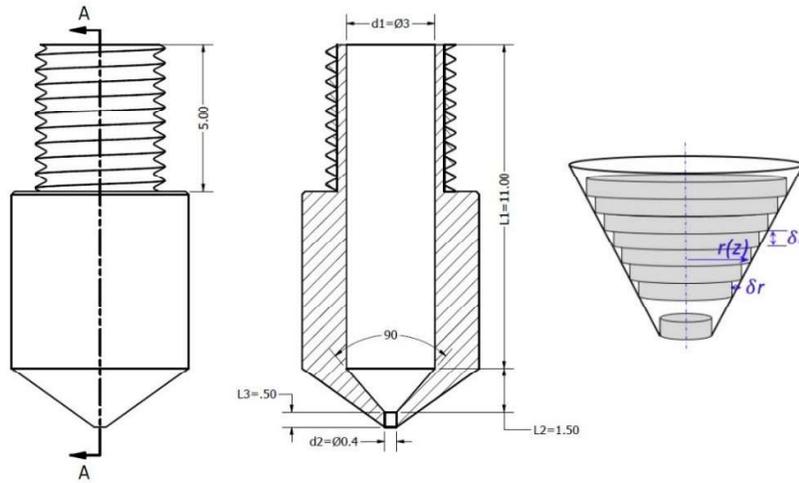
$$Q^* = \frac{\frac{0.129g}{s}}{\frac{1.25g}{cm^3}} = 0.103 \frac{cm^3}{s} = \frac{103.2mm^3}{s}$$

El flujo en una boquilla con metodología de deposición fundida (FFF), a menudo se ve como un flujo impulsado por presión. En la boquilla del extrusor surge una caída de presión la cual dicho flujo es importante describir y comprender el comportamiento del flujo de fusión del polímero. Se han desarrollado diversos modelos analíticos para calcular la caída de presión en función de la tasa de flujo volumétrico o la tasa de corte aparente dentro de una boquilla FFF, la cual se concentra mayormente en la región

cónica cilíndrica y región capilar tal como se muestra en la figura 13. La imagen describe la sección transversal de la boquilla donde se calcula la caída de presión general mediante las siguientes ecuaciones.

**Figura 13**

*Dimensiones del Extrusor MK8.*



*Nota.* Elaboración Propia.

Para determinar los valores de las caídas de presiones se tomaron los valores de la tabla de propiedades reológicas del PLA (Tabla 12 - Anexo B).

$$\Delta P_1 = 2kL_1 \left( \frac{Q \left( \frac{1}{n} + 3 \right)}{\pi R_1^{3+1/n}} \right)^n \quad (21)$$

$$\Delta P_1 = 2 * 41307.32 * 11 * \left( \frac{103.2 * \left( \frac{1}{0.433} + 3 \right)}{\pi * 1.5^{3+\frac{1}{0.433}}} \right)^{0.433} = 3.344 * 10^6 Pa$$

$$\Delta P_2 = \frac{2k \cot \frac{\beta}{2}}{3n} \left( \frac{Q \left( \frac{1}{n} + 3 \right)}{\pi} \right)^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \quad (22)$$

$$\Delta P_2 = \frac{2 * 41307.32 * \cot \frac{90}{2}}{3 * 0.433} * \left( \frac{103.2 * \left( \frac{1}{0.433} + 3 \right)}{\pi} \right)^{0.433} * (0.2^{-3*0.433} - 1.5^{-3*0.433})$$

$$\Delta P_2 = 4.457 * 10^6 Pa$$

$$\Delta P_3 = 2kL_3 \left( \frac{Q \left( \frac{1}{n} + 3 \right)}{\pi R_2^{3+1/n}} \right)^n \quad (23)$$

$$\Delta P_3 = 2 * 41307.32 * 0.5 * \left( \frac{103.2 * \left( \frac{1}{0.433} + 3 \right)}{\pi * 0.2^{3+\frac{1}{0.433}}} \right)^{0.433} = 15.616 * 10^6 Pa$$

Entonces la variación de la caída de presión total es la suma de las caídas de presiones parciales calculadas anteriormente, lo cual se tiene en la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (24)$$

$$\Delta P = (3.344 + 4.457 + 15.616) * 10^6 = 23.417 * 10^6 Pa$$

Según Bellini, et al., 2004, al producirse un cambio brusco de caudal, la temperatura media disminuye y la velocidad aumenta; para calcular la fuerza de deposición ( $F_{dep}$ ) aplicada al filamento para extruir el material se determina con la siguiente ecuación. (p.239).

$$F_{dep} = P_4 * A \quad (25)$$

$$F_{dep} = \left( \frac{D_{ext} - D_2}{2} \right) * \frac{k(T)}{h^{1+\frac{1}{m}}} * \left[ \frac{(m+1)(m+2)V_P}{2} \right]^{\frac{1}{m}} * \frac{\pi d_{fil}^2}{4}; m = \frac{1}{n} \quad (26)$$

$$F_{dep} = \left( \frac{0.75 - 0.4}{2} \right) * \frac{41307.32}{0.2^{1+\frac{1}{2.309}}} * \left[ \frac{(2.309 + 1)(2.309 + 2)60}{2} \right]^{\frac{1}{2.309}} * \frac{\pi 1.75^2}{4}$$

$$F_{dep} = 2.407 N$$

### 4.3 Diseño Eléctrico y Electrónico

Una evaluación detallada de los componentes eléctricos y electrónicos es esencial para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

#### 4.3.1 Cálculos de Potencia

Se asumen los componentes funcionando a su máxima capacidad, así como se muestra en la tabla 1.

#### Tabla 1

*Potencia Consumida de los Componentes Electrónicos a Máxima Carga*

<b>Componente</b>	<b>Potencia (W)</b>
Motores de paso XY y sus drivers	40.8
Calentador cabezal (Extrusor)	70.4
Calentador Cama	-
Motor de paso Z y sus drivers	40.8
Controlador	7.5
Pantalla	7.5
Ventiladores	1.5
Finales de carrera	1
<b>Total</b>	<b>169.5</b>

*Nota.* Elaboración Propia

Para este resultado se necesitará una fuente con un valor mayor a 170W; ya que, esta potencia no es comercial en fuentes de 12V, se utilizará una fuente de 12V 15A que equivale a 180W.

#### **4.3.2 Selección de Componentes**

Se investigo los componentes que son comerciales en el mercado, a continuación, se detallara cada uno de ellos.

##### **4.3.2.1 Requisitos para la interfaz**

- Pantalla táctil de 5 pulgadas que servirá como interfaz de control del usuario.
- Disposición de puerto SD para conectarlo directamente.

##### **4.3.2.2 Requisito para drivers que controlaran los motores de pasos**

- Funcionar a 12V 2A como límite.
- Compatibles para poder instalarlo en la placa madre.
- Debe ser capaz de controlar hasta 500 rpm.

- Tiene que disponer de disipadores para minimizar el calor generado en operación.

#### **4.3.2.3 Requerimientos para los finales de carrera**

- Compatibles para ser instalado en la placa madre.
- Switch mecánico que indique un flanco de subida o bajada sin ruido.

#### **4.3.2.4 Requerimientos para la placa madre**

- Capacidad para controlar 4 motores de paso en los ejes XYZ.
- Puertos para los elementos con sus circuitos de protección.

#### **4.3.2.5 Requerimientos para el hotend**

- Generar un flujo constante de 16 mm<sup>3</sup>/s de extrusión.
- Diseño que permita instalar la resistencia (calentador) y termistores de otros fabricantes.

#### **4.3.2.6 Requerimientos para el calentador del cabezal**

- Ser comercial mercado de las impresoras 3D, para lo cual toma como referencia el modelo MK8 que es muy utilizado en impresoras de mesa.

#### **4.3.2.7 Requisitos para el termistor del cabezal**

- Debe tener una resolución mínima de 1°C.
- Su nivel de medición debe superar los 230°C que es suficiente para poder fundir filamento PLA a mayor caudal.

#### **4.3.2.8 Requerimientos para la plataforma de impresión.**

- La plataforma debe tener rugosidad para tener una mejor adherencia.
- Como se trabajará con filamento PLA, no será necesario utilizar un calefactor.
- Teniendo los requisitos para este trabajo y los cálculos realizados anteriormente se muestra la siguiente lista de componentes en la tabla 2.

**Tabla 2***Selección de los Componentes Electrónicos*

Sistema	Dispositivo	Descripción
Interfaz	Pantalla táctil LCD	Dispone de puerto SD para lecturar datos de impresión.
Eje Z	Motor de pasos	Motor modelo MS17HD2P4150 que opera a 12V y 1.7A.
	A4988	Driver para motor de pasos, opera hasta un máximo de 35V y 2A.
	Sensor final de carrera	Sensor mecánico diseñado para RAMPS 1.4, posee 02 pines de alimentación y uno de señal.
Plano XY	Motor de pasos	Motor modelo MS17HD2P4150 que opera a 12V y 1.7A.
	Sensor final de carrera	Sensor mecánico para placas RAMPS 1.4, posee 02 pines de alimentación y uno de señal.
Placa controladora	RAMPS 1.4	Placa madre con controladores que tiene capacidad para conectar 6 motores de pasos, sensores y calentadores requeridos.
Plataforma	Cama de impresión	Dimensiones de 480 x480mm <sup>2</sup> , material mdf de 9 mm de espesor.

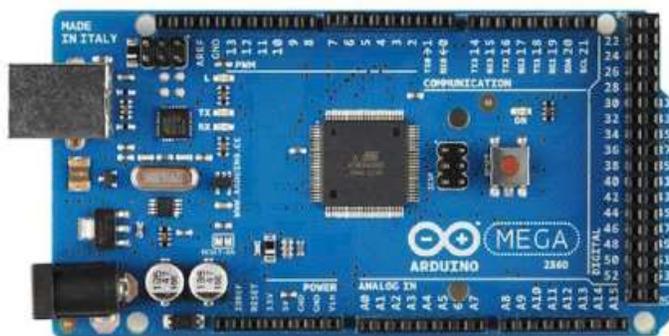
*Nota.* Elaboración Propia.

**4.3.2.9 Software**

Arduino Mega, se seleccionó por sus capacidades de procesamiento y su cantidad de pines de entrada/salida, lo cual es esencial para controlar los distintos componentes de la impresora. Este modelo de Arduino tiene 54 pines digitales, 16 pines analógicos y una memoria flash de 256 KB, proporcionando una plataforma robusta para el control preciso de la impresora 3D

**Figura 14**

*Placa Controladora Arduino Mega 2560 R3*



Nota. Obtenido de <https://arduino.cl/>

#### 4.4 Costos

Los componentes electrónicos que fueron seleccionados en capítulos anteriores se detallan en la tabla 3, la cual se incluyen los precios en soles de cada componente.

**Tabla 3**

*Lista de Precios de los Componentes Electrónicos*

Componente	Precio Unitario (PEN)	Cantidad	Precio Total (PEN)
Panel de control LCD 12864	80	1	80
Arduino Mega 2560 R3	100	1	100
Ramps 1.4	50	1	50
Drivers A4988	20	5	100
Motores de pasos	60	5	300
Kit extrusor	95	1	95
Calentador 12V	38	1	38
Termistor T-D500	42	1	42
Ventiladores	10	3	30
Plataforma de impresión	15	1	15
Fuentes 12V 15A	68	1	68
Poleas	7	16	112
Sensores finales de carrera	9.5	3	28.5
Tornillo TR8*2	42	1	42
Tornillería			130
Materiales y fabricación de piezas			830
<b>Monto global de fabricación</b>			<b>2060.5</b>

Nota. Elaboración Propia

El monto total de fabricación de la impresora es de 2060.5 soles aproximadamente.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

## 5.1 Resultados

- a) Parámetros de funcionamiento y dimensiones

**Tabla 4**

*Resultados de los Parámetros de Funcionamiento*

Parámetros	Valor
Velocidad de impresión	100 – 200 mm/s
Material	PLA de $\phi=1.75\text{mm}$
Densidad del material	1250 Kg/m <sup>3</sup>
Volumen de trabajo	480*480*480 mm <sup>3</sup> (0.11 m <sup>3</sup> )
Voltaje	12 V

*Nota.* Elaboración Propia

- b) Valores obtenidos en el cálculo para la selección de los componentes mecánicos

**Tabla 5**

*Resultados Calculados para el Motor*

Descripción	Valor
Torque del motor (T)	0.0343 N.m
Tipo de motor	NEMA MS17HD2P4150
Masa del motor ( $m_{\text{motor}}$ )	140.5 g

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 6**

*Resultados Calculados para el Sistema Core XY*

Descripción	Valor
Fuerza ejercida por las correas (F)	5.38 N
Masa total del sistema core XY ( $m_{\text{total}}$ )	1.565 kg
Aceleración máxima del sistema (a)	6.875 m/s <sup>2</sup>
Tiempo para alcanzar la velocidad de impresión de 150 mm/s (t)	0.02s
Torque de diseño	0.526 lb.in
Número de dientes de la polea (Z)	20
Espesor de la correa (e)	6 mm
Paso de la correa (p)	2 mm

*Nota.* Elaboración Propia

**Tabla 7**

*Resultados Obtenidos para el Tornillo de Potencia en el Eje Z*

Descripción	Valor
-------------	-------

Torque de elevación ( $T_u$ )	114.81 N.mm
Carga máxima que puede ser elevada (F)	7.85 Kg
Tipo de columna para calcular la carga crítica	Doblemente empotrada
Razón de esbeltez ( $S_r$ )	226.45
Carga crítica que soporta el tornillo ( $P_{cr} = F_{m\acute{a}x}$ )	5.32 N

*Nota.* Elaboración Propia

- c) Valores obtenidos en el cálculo del comportamiento térmico del extrusor para una tecnología FFF

**Tabla 8**

*Resultados Obtenidos del Cálculo Térmico del Extrusor*

Descripción	Valor
Temperatura deseada ( $T_d$ )	250°C
Temperatura ambiental ( $T_a$ )	20°C
Volumen de PLA que ingresa al extrusor (V)	$3.992 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Masa del material (m)	0.005 Kg
Energía necesaria (Q)	1955 J
Tiempo para poner a punto el extrusor (t)	1 min
Flujo másico del material ( $\dot{m}$ )	0.129 g/s
Flujo volumétrico ( $\dot{Q}$ )	103.2 mm <sup>3</sup> /s
Caída de presión 1 ( $\Delta P_1$ )	$3.344 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Caída de presión 2 ( $\Delta P_2$ )	$4.457 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Caída de presión 3 ( $\Delta P_3$ )	$15.616 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Caída de presión total ( $\Delta P_{tot}$ )	$23.417 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Fuerza de deposición ( $F_{dep}$ )	2.407 N

*Nota.* Elaboración Propia

- d) Descripción de los componentes electrónicos

**Tabla 9**

*Selección de los Componentes Electrónicos*

Componente	Descripción
Placa Controladora	Arduino Mega 2560 R3 y RAMPS 1.4
Extrusor	Tipo Bowden MK8
Cama Caliente	Placa de 480 x 480 mm a 12 V
Driver	Pololu A4988
Final de Carrera	Endstop tipo Makerbot
Pantalla	LCD Full Graphic Smart Controller 128*64
Fuente de Alimentación	YXDY 12V, 15A

## 5.2 Discusiones

- a) La impresora 3D desarrollada en este proyecto destaca por su elección consciente de materiales y parámetros de operación. La utilización del filamento PLA, un polímero biodegradable y poco tóxico, refleja una preocupación por la sostenibilidad ambiental. La estructura de aluminio, seleccionada para reducir el peso, apunta a la eficiencia energética durante el proceso de impresión. Con un volumen de trabajo de  $0.11 \text{ m}^3$  y una velocidad de impresión de 100–200 mm/s, estos parámetros fueron adaptados específicamente para la fabricación de piezas mecánicas, en contraste con trabajos anteriores que se centraban en maquetas y prototipos más grandes.

En relación con la fabricación de matrices para moldes, la impresión 3D emerge como una alternativa prometedora para optimizar los tiempos de producción. La capacidad de la impresora 3D para crear geometrías complejas a gran escala es destacada. La ventaja clave radica en la posibilidad de imprimir estas geometrías en secciones, que pueden ensamblarse posteriormente para obtener la matriz final del molde. Este enfoque no solo acelera el proceso de fabricación, sino que también ofrece flexibilidad en la creación de matrices con formas intrincadas. En última instancia, la integración de la impresora 3D en la fabricación de matrices abre nuevas perspectivas en el diseño y la producción de moldes, ofreciendo eficiencia y versatilidad en la creación de componentes mecánicos detallados.

- b) Los cálculos que se realizaron para el dimensionamiento de los componentes mecánicos se desarrollaron mediante análisis conceptuales para sistemas estáticos con la finalidad de obtener un diseño más adecuado y confiable en comparación a los diseños de impresoras 3D que se mencionaron en los antecedentes, de la cual los valores calculados se muestran desde la tabla 5 hasta la tabla 7. Uno de los componentes

críticos en el diseño de la impresora 3D es el tornillo de potencia ya que este elemento tiene que soportar la carga de la cama de impresión y la materia de impresión, dentro de los cálculos realizados se determinó que la carga crítica que soporta el tornillo es de 174.32 N , este valor en comparación de lo que determina Aycardi en su modelo de estudio es relativamente cercano a su valor, ya que hay una variación del 0.2%; esto es debido a que el volumen de impresión y la cama de impresión del trabajo de Aycardi es de mayor capacidad con el de nuestro modelo.

- c) Los resultados obtenidos en la evaluación térmica del sistema de extrusión que permita depositar PLA a velocidades de impresión entre 100 y 150 mm/s para alcanzar la temperatura óptima de 250°C se calculó el tiempo necesario de un minuto para poner a punto el extrusor, esto garantiza una geometría más uniforme y un mejor acabado superficial de impresión. Además, con respecto a la geometría de la boquilla del extrusor, el flujo volumétrico máximo del extrusor es de 103,2 mm<sup>3</sup>/s, a partir de este valor se determinó las caídas de presiones en cada fase de la boquilla tal como se muestra en la figura 14, obteniendo así caída de presiones de 3.344, 4.457 y 15 .616 MPa. Como se puede apreciar en los resultados de la tabla 8, la caída de presión en el punto 3 resulta mayor que las dos restantes ya que a medida que el filamento va ser deposita de necesita una presión a un mayor para obtener así un acabado uniforme, logrando así una fuerza de deposición para el extrusor de 2.407 N, que es la fuerza necesaria que se necesita para depositar el filamento en la cama de impresión.
- d) Para seleccionar los componentes eléctricos y electrónicos se partió de la potencia total consumida que es de 169.5 W (Tabla 1), en base a este resultado y a los catálogos de los fabricantes se seleccionó una fuente de alimentación de 12 V y 15 A, que es la que se necesita para alimentar a cada uno de los componentes.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- a) Se determinaron los parámetros y componentes para el diseño y construcción de una impresora 3D con un volumen máximo de impresión de  $0.11 \text{ m}^3$ , tal como se muestra los resultados en la tabla 4. Estos parámetros coinciden con los trabajos de los antecedentes mencionados, por lo tanto, es aceptable en esta investigación.
- b) Con los cálculos realizados se tiene que, el proyecto funciona en un rango de velocidades de  $100 - 150 \text{ mm/s}$ , teniendo así un diseño de la estructura óptimo ya que garantiza estabilidad, rigidez y estabilidad al momento de imprimir. En cuanto a la selección de los componentes mecánicos se concluye que el tornillo de potencia es el componente mecánico principal en el diseño, se seleccionó un tornillo tr 8 de paso 2mm ya que es el más comercial y permite soportar las cargas aplicadas, el motor seleccionado fue del tipo NEMA 17 MS17HD2P4150, y un sistema de bandas de correa tipo GT3 de paso 2mm.
- c) Se llegó a diseñar un extrusor con mecanismos que permitan extruir el material y fundirlo con un flujo de  $103.2 \text{ mm}^3/\text{s}$ , que corresponde a una velocidad de impresión de  $150 \text{ mm/s}$ . También se determinó la caída de presión total de  $23.417 \text{ MPa}$  y una fuerza de deposición de  $2.41 \text{ N}$ .
- d) Se logró diseñar un sistema eléctrico y electrónico mediante cálculos de potencia mecánica y requerimientos dinámicos para los motores y cálculos de potencia eléctrica para la selección de la fuente. Además, se seleccionó para el firmware, el Arduino Mega 2560 R3, la pantalla, los finales de carreras y drivers, las cuales permitieron garantizar el correcto funcionamiento de la impresora 3D de tecnología FFF.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar perfiles de aluminio V para la estructura, ya que brinda una mayor estabilidad y rigidez, además de utilizar piezas y soportes en filamento ya sea del tipo PLA o ABS, con la finalidad de hacerlo más ligero, y reducir costos.
- Se recomienda la utilización de finales de carrera con lógica Normalmente Cerrada ya que estos pueden actuar como dispositivos de seguridad, puesto que al desconectarse o al haber un corte del fluido eléctrico, o al averiarse un final de carrera de este tipo, la máquina para automáticamente.
- La disposición de las correas para el sistema de transmisión de movimiento sea totalmente a dos niveles para evitar el desgaste prematuro de las correas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbas, O. E., Hira, O., Hervan, S. Z., Samankan, S., & Altinkaynak, A. (2020). Dimensional Accuracy of FDM - Printed Polymer Parts. *Rapid Prototyping Journal*, 26(2), 288-298.
- Aycardi Salgado, L. C., & Tuirán Moreno, H. J. (2017). Diseño y Construcción de una Impresora 3D de Gran Formato con Tecnología de Fabricación con Filamento Fundido (FFF) Tipo Core XY Basada en Arduino. *Tesis de Licenciatura*. Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
- Bellini, A., Guceri, S., & Bertoldi, M. (2004). Liquefier Dynamics In Fused Deposition. *Manufacturing Science and Engineering*, 126, 237-246.
- Gamarra Miranda, Á. B., & Parraguez de la Cruz, L. J. (2019). Diseño de una Impresora 3D para Imprimir Piezas con Polímeros con Volumen Máximo de 30 cm x 30 cm x 30 cm para la Universidad Señor de Sipán. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (Second ed.). New York: Springer.
- Go, J., Schiffres, S. N., Stevens, A. G., & Jhon Hart, A. (August de 2017). Rate Limits of Additive Manufacturing by Fused Filament Fabrication and Guidelines for High - Throughput System Design. *Additive Manufacturing*, 16, 1-11.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.007>
- Mackay, M. (2018). The Importance of Rheological Behavior in the Additive Manufacturing Technique Material Extrusion. *Journal of Rheology*, 62, 1549-1561.  
doi:<https://doi.org/10.1122/1.5037687>

- Mackay, M., Swain, Z., & Banbury, C. (2017). The Performance of the Hot End in a Plasticating 3D Printer. *The Society of Rheology*.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1122/1.4973852>
- Madeira Schmitt, Betina; Fraga Zirbes, Christiano; Bonin, Cassiano; Lohman , Daniel; Castoldi Lencina, Diovani; da Costa Sabino Netto, Aurelio. (5 de Febrero de 2018). A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1039>
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales* (Quinta ed.). México: Pearson Educación.
- Moyer, I. E. (2012). *Core (X,Y)*. Obtenido de <http://corexy.com/theory.html>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas: Un Enfoque Integrado* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- Ñauta Ñauta, A. E., & Vergara Idrovo, M. R. (2017). Simulación de Termofluidos de PLA Natural y ABS en el Proceso de Impresión en 3D. *Tesis de Maestría*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Palomino Vásquez , G. (2021). Implementación de un Prototipo de Impresora 3D para Fabricación de Piezas en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica, Utcubamba, Amazonas, 2020. *Tesis de Licenciatura* . Universidad Politécnica Amazónica, Bagua Grande, Perú.
- Paulsen, K. F. (s.f.). *Elementos de Máquinas 1 - Tornillos de Traslación*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Redwood, B., Filemon , S., & Garret, B. (2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V.
- Spotts, M. (1999). *Elementos de Máquinas* (Séptima ed.). México: Pearson Educación.

Tapia Cabrera, J. E. (2019). Evaluación de las Propiedades de Amortiguamiento de Materiales Fabricados por Impresión 3D y Reforzados con Nanotubos y Fibras de Carbono. *Tesis de Licenciatura*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

## VII.ANEXOS

### **Anexo A: Descripción de los Componentes.**

#### **A.1 Tipos de Motores**

Se describirán los tipos de motores usados en impresoras FDM/FFF.

##### ***A.1.1 Servomotor DC***

Los servomotores DC son ampliamente utilizados en robótica estudiantil e industrial debido a su control preciso de posición angular, velocidad y aceleración. Estos motores suelen incorporar un sensor codificador para registrar el ángulo y la velocidad de giro. El costo de estos motores varía según la aplicación específica.

##### ***A.1.2 Motor de Pasos***

Los motores de pasos son los más comunes en impresoras 3D FDM/FFF debido a su alta precisión. Tienen valores típicos de pasos de  $1.8^\circ$  y  $0.9^\circ$ , lo que significa que dan 200 pasos en una vuelta completa de  $360^\circ$ . Son adecuados para aplicaciones que requieren movimientos precisos.

##### ***A.1.3 Motor de Pasos de Lazo Cerrado***

Estos motores de pasos incorporan un codificador y se utilizan en aplicaciones específicas. La presencia del codificador permite un control más preciso del movimiento, similar a los servomotores DC con codificador.

#### **A.2 Transmisión de Movimiento**

Se presentan los sistemas de transmisión más usados en impresoras 3D FDM/FFF.

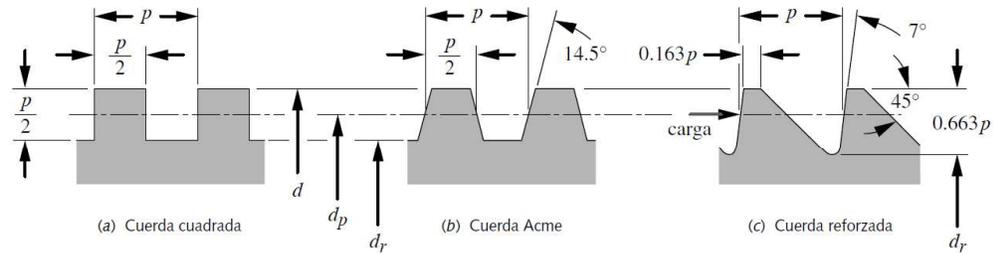
##### ***A.2.1 Correas Dentadas (Bandas de Sincronización)***

Su sistema de transmisión es usado con mayor frecuencia en las impresoras 3D FDM debido a su fácil instalación a través de poleas y al emplearlo en un sistema de

impresión 3D permiten movimientos rápidos y una carga relativamente baja. (Budynas y Nisbett pg. 873).

**Figura 15**

*Cuerdas Cuadradas, Acme y Reforzada*



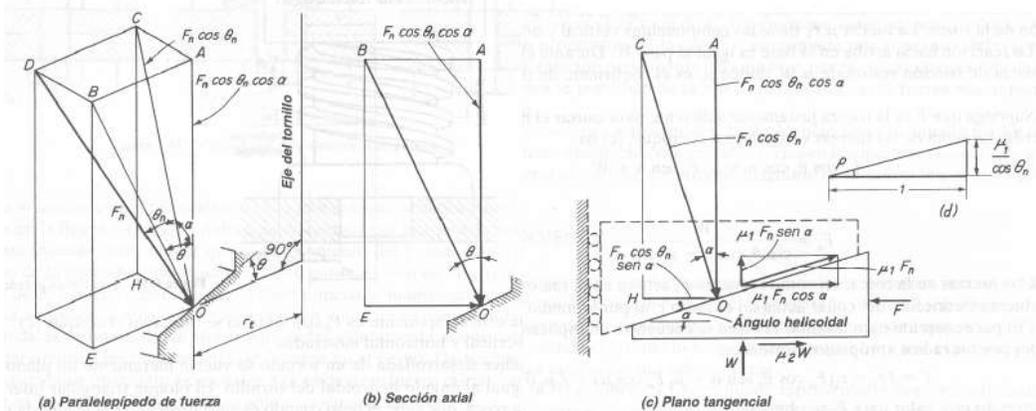
*Nota.* Adaptado de Elementos de Maquinas (p.308), por MF. Spotts, 1999, Pearson Educación.

**A.2.2 Tornillos de Potencia**

Estos tornillos transforman el movimiento rotacional en movimiento lineal para las máquinas de producción, manufactura, impresoras 3D, y otras aplicaciones. Tienen grandes ventajas mecánicas; por ende, pueden elevar o mover grandes cargas.

**Figura 16**

*Estado de Cargas Real durante la Elevación de una Carga W.*



*Nota.* Adaptado de Diseño de Maquinas: Un enfoque Integrado (p. 728), Robert L. Norton, 2017.

En aplicaciones de tornillo de potencia donde el avance es relativamente grande y el rozamiento es bajo, pueden darse situaciones donde la carga desciende por si sola, simulando el comportamiento de un objeto sobre un plano inclinado, haciendo que el tornillo gire sin ninguna acción externa. En tales casos el momento torsional para bajar la carga es negativo o nulo. Se llama tornillo irreversible o autoasegurante, aquel que requiere un momento torsional positivo para hacer descender la carga; lo cual tiene que cumplir la siguiente condición de irreversibilidad para un tornillo de rosca Acme o unificada:

$$\mu_1 > \frac{1}{\pi dp \sec \theta}$$

Se evalúa el sistema de tornillo de potencia como una columna sometida a cargas de compresión. Para este caso de columnas a compresión, las ecuaciones de carga axial no pueden ser suficientes para determinar que carga aplicar es segura para este miembro, ya que puede fallar por pandeo que por compresión.

#### **A.2.2.1 Razón de Esbeltez**

Factor usado para caracterizar las columnas, si esta columna es corta o larga.

Una columna corta fallara por carga axial y la máxima carga axial que podrá soportar estará dada por su esfuerzo; mientras que en el caso de las columnas largas estas fallaran primero por pandeo que, por fluencia, la relación de esbeltez se define como:

$$Sr = \frac{l}{k}$$

Columnas cortas

Es aquella cuya razón de esbeltez es ligeramente menor a 89 ( $Sr < 89$ ). En este caso aplicara el límite elástico del material a compresión como factor limite,

con la finalidad de compararlo con el esfuerzo calculado a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_x = \frac{P}{A}$$

Columna larga

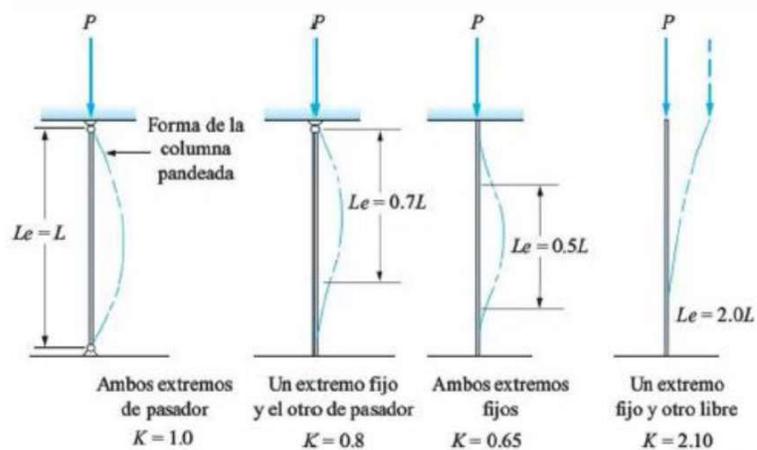
Esta requiere del cálculo de su carga crítica. Se expresa mediante la columna desarrollada por Euler, donde la carga crítica ( $P_{crit}$ ) está en función del área de la sección transversal de la columna, su radio de giro, y el módulo de elasticidad del material; la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{L}{k}\right)^2}$$

Por eso la necesidad de establecer la longitud efectiva ( $le$ ) apropiada para obtener la razón de esbeltez correcta a utilizar en cualquiera de las siguientes condiciones tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 17**

*Diversas Condiciones Terminales y sus Respectivas Longitudes Equivalentes.*



*Nota.* Adaptado de Resistencia de Materiales (p. 606), por R.L. Mott, Pearson Educación.

## A.3 Guía de Movimiento

### A.3.1 Barras Lisas

Estas en conjunto con los rodamientos lineales o con cilindros de material auto lubricado son una manera económica y efectiva de guiar el movimiento en línea recta. Según de la aplicación se requerirá 02 barras por eje y el diámetro dependerá de la capacidad de carga y el pandeo que deba soportar.

#### Figura 18

*Barra Lisa de Acero Cromado*



*Nota.* Obtenido de <https://centralsteelsac.com/producto/barras-cromadas/>

### ***A.3.2 Rieles Lineales***

Es muy común verlas en las maquinas CNC limitan el movimiento a un solo grado de libertad, pueden usar el contacto metal-metal o usar rodamientos especiales que facilitan el desplazamiento.

**Figura 19**

*Rieles Lineales*



*Nota.* Obtenido de <https://moviltronics.com/tienda/guia-lineal-400mm-eje-con-carro-maquinas-cnc-impresora-3d-maquinas-cnc-copia/>

### ***A.3.3 Ruedas en Perfiles de Aluminio***

Es un componente mecánico que utiliza rodamientos radiales con una cubierta de teflón diseñada para seguir la trayectoria del perfil de aluminio en V; suelen trabajarse en conjunto con correas dentadas.

**Figura 20**

*Rueda en Perfil V*



*Nota.* Obtenido de <https://sistema.roboticsbay.com.ar/shop/product/ruedas-ruleman-perfil-aluminio-2020-impresora-3d-cnc-45>

## A.4 Acoples

### A.4.1 Acoples Rígidos

Es el acople más simple y se usa teniendo en cuenta que exista una perfecta colinealidad entre el eje del motor y el tornillo a utilizar, son de material metálico y en el extremo de sus lados tienen un diámetro distinto dependiendo de los diámetros de los ejes a unir (Ruiz, J., 2010).

**Figura 21**

*Acople Rígido*



*Nota.* Obtenido de <https://www.rw-acoplamiento.lat/productos/acoples-de-precision/acoples-de-elastomero/>

#### ***A.4.2 Acoples Flexibles***

Hay dos categorías de estos elementos: uno que incorpora resortes y otro con elastómeros. El primero está diseñado para ajustarse a pequeñas desviaciones en la alineación de los ejes, mientras que el segundo evita el desplazamiento axial, eliminando la necesidad de componentes adicionales como cojinetes en situaciones de carga leve (Ruiz, J., 2010).

#### **Figura 22**

*Acople Flexible*



*Nota.* Obtenido de <https://www.rw-acoplamientos.lat/productos/acoples-de-precision/acoples-de-elastomero/>

#### **A.5 Tipos de Extrusores**

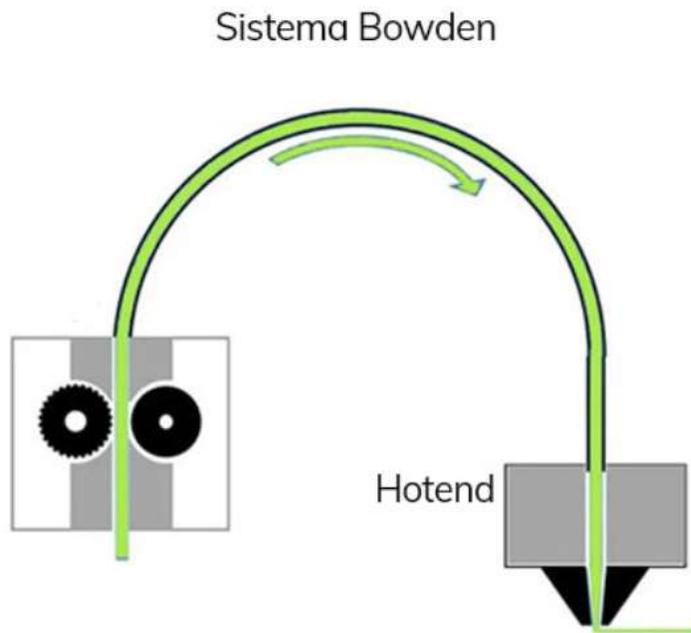
En el ámbito de las impresoras, existen dos variantes de extrusores: los del tipo Bowden, caracterizados por tener el extrusor y el hotend de forma separada, conectados por un tubo de teflón; y los de sistema directo, en los cuales el extrusor y el hotend vienen ensamblados juntos en el mismo cabezal.

### ***A.5.1 Extrusor Tipo Bowden***

Este sistema cuenta con una disposición en la que el motor y el mecanismo de empuje del cabezal están separados. Esta configuración específica contribuye a la reducción del peso del cabezal, permitiendo alcanzar velocidades elevadas sin comprometer la calidad visual de la impresión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que debido a la considerable trayectoria que sigue el filamento antes de llegar al cabezal, se genera un cierto tiempo de traslado del material. Esta característica puede limitar la capacidad de lograr un control preciso en la extrusión del material, según señala Boichut (2019).

**Figura 23**

*Extrusor con Sistema Bowden*



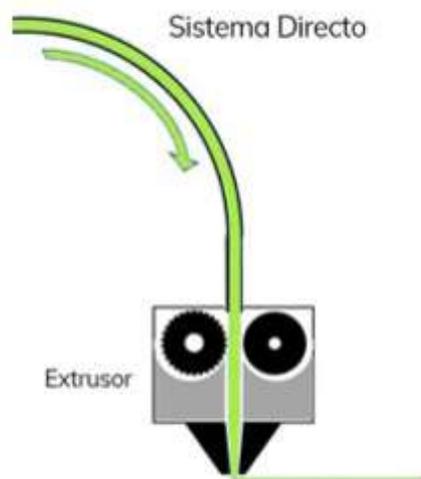
*Nota.* Obtenido de <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-extrusores-para-impresoras-3d/>

### A.5.2 Extrusor Directo

En este diseño, el extrusor se encuentra directamente en el cabezal, lo que proporciona un control más preciso en la entrada del filamento. Este tipo de configuración se utiliza comúnmente en impresoras que buscan alcanzar velocidades de impresión elevadas. En este caso, el peso del motor y el sistema de empuje en el cabezal no representa una limitación, pero es crucial que la impresora cuente con una buena estabilidad para garantizar un rendimiento eficiente, según lo indicado por Boichut (2019).

**Figura 24**

*Extrusor con Sistema Bowden*



*Nota.* Obtenido de <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-extrusores-para-impresoras-3d/>

### A.6 Partes del Hotend

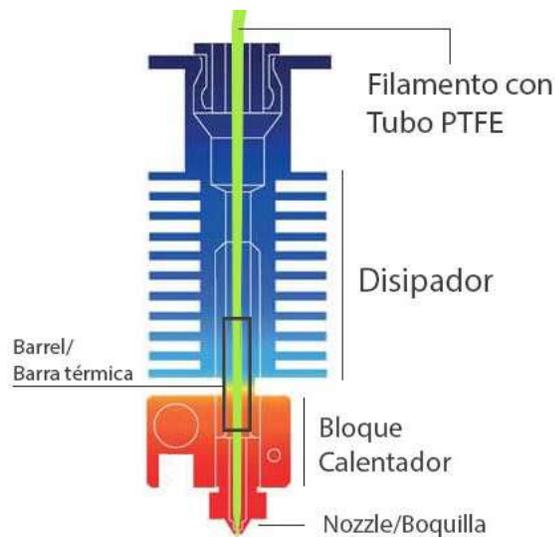
El hotend es el principal componente del cabezal y su función es fundir el filamento y depositarlo en la plataforma de impresión, está compuesto por los siguientes componentes:

- Boquilla: También conocidas por sus siglas en inglés como nozzle es una tobera que su función es depositar el filamento fundido el cual es llamado como ancho de línea, tienen un diámetro de salida de 0.4 mm que es el más común y comercial.

- Bloque de calor: Este tiene la forma de un cubo en su mayoría es de material de aluminio tiene la función de recibir el calor de la resistencia tipo cartucho en un volumen para así mantener fundido el material a depositar.
- Rompedor de calor: Sirve como conducto para el filamento antes de llegar a la zona caliente, debido a altas temperaturas del bloque de calor, el rompedor de calor debe ser capaz de transmitir lo menos posible el calor.
- Disipador: Su función es disipar el calor que el rompedor de calor transmite hacia arriba del cabezal, este debe trabajar en conjunto con un ventilador para mejorar en enfriamiento.
- Cartucho de calor: Es una resistencia que cumple la función de calentar el bloque de calor.
- Sensor de temperatura: este componente electrónico controla la temperatura del cartucho de calor.

### Figura 25

#### *Componentes Principales del Hotend*



*Nota.* Obtenido de <https://filament2print.com/es/>

## A.7 Cama Caliente

Existen de varios tipos, los más comerciales son:

- Cama de PBC (printer circuit board): circula la corriente por caminos en forma de laberinto de cobre, el cual tiene la función de una resistencia la cual calentara a la plataforma de manera uniforme.
- Cama de PBC recubierta con aluminio: tiene la misma función, la única diferencia es que esta tiene más rigidez.

**Figura 26**

*Cama Caliente Comerciales*



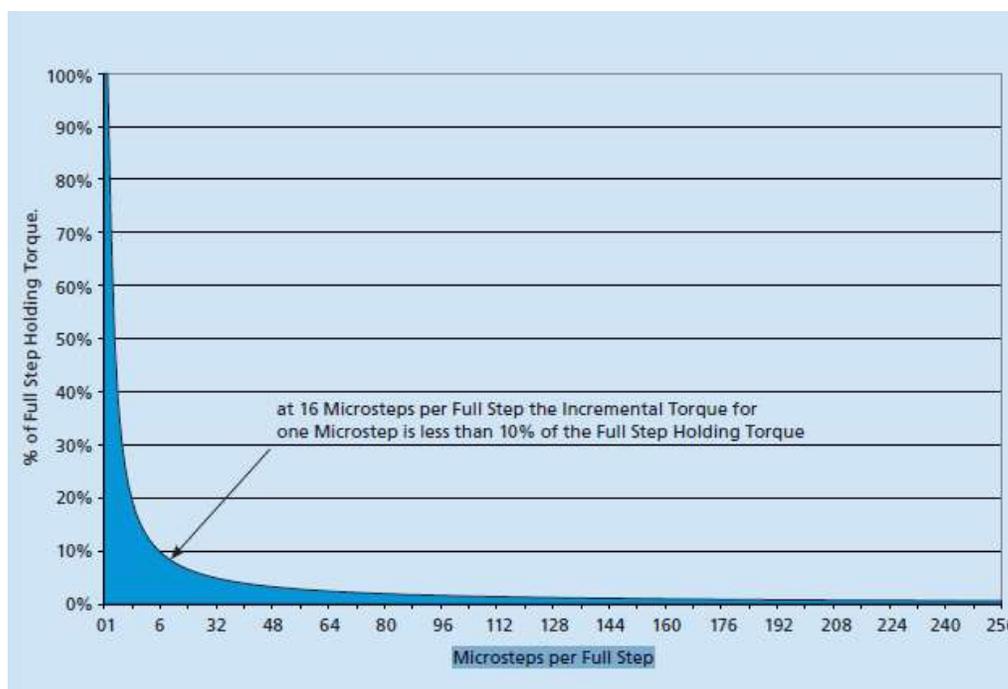
- a. Cama Caliente de PCB.    b. Cama caliente de PCB recubierta de Aluminio.

*Nota.* Obtenido de <https://naylorlampmechatronics.com/>

## Anexo B: Figuras y Tablas Complementarias

**Figura 27**

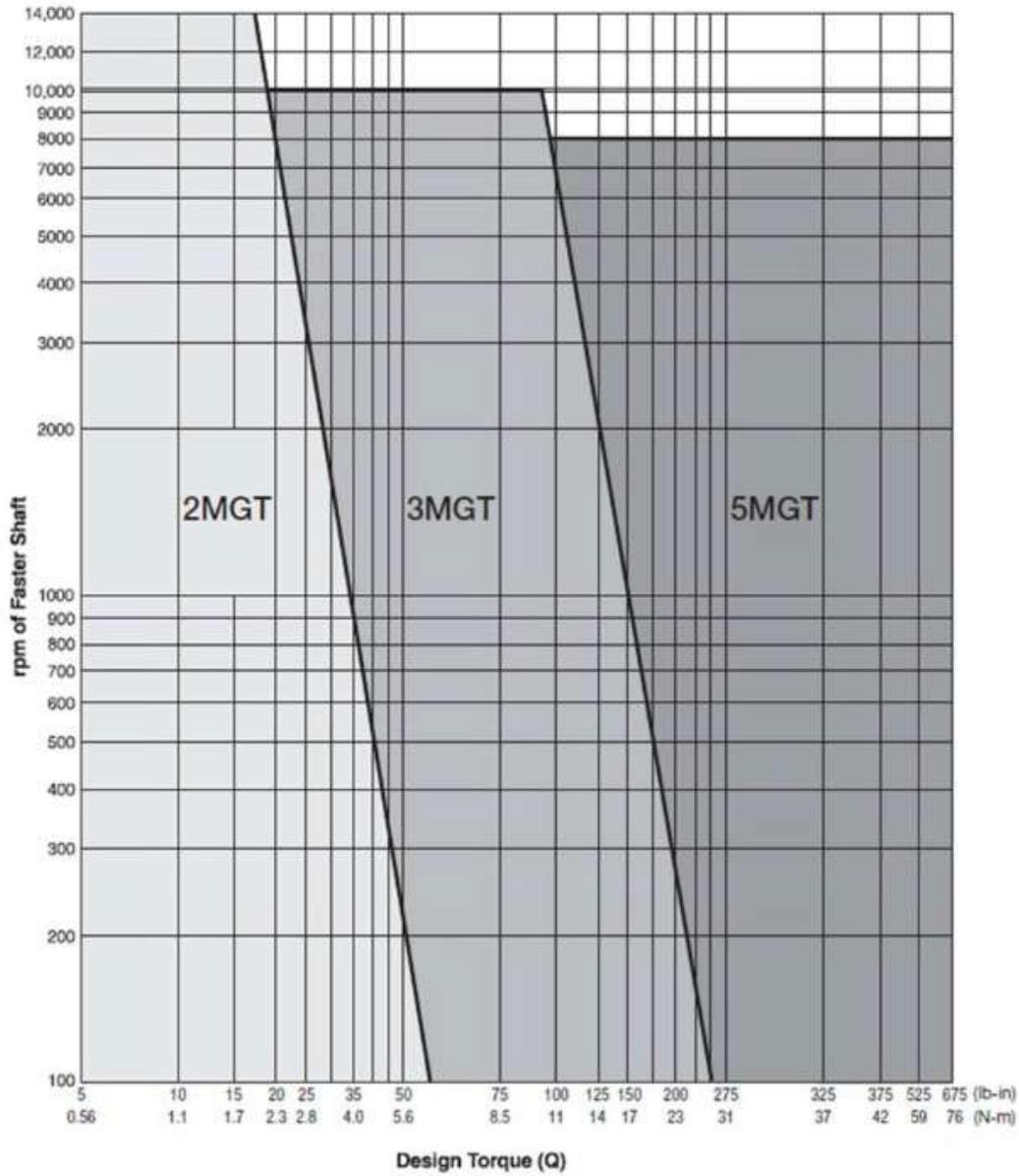
*Diagrama de la Curva entre el % del Torque de Retención de Paso Completo vs los Micropasos por Paso Completo*



*Nota.* Obtenido de "Stepper Motor Technical Norte: Microstepping Myths and Realities" (p.4) por FaulHaber

**Figura 28**

*Diagrama de la Curva entre el Torque de Diseño vs el Número de RPM del Eje Rápido.*



*Nota.* Se seleccionará el tipo de polea en base al torque de diseño calculado y los rpm del eje del motor. Obtenido del “Manual de selección de correas” (p.17). Adaptado de Gates ([www.gates.com/drive/design](http://www.gates.com/drive/design)).

**Tabla 10**

*Incremento del Torque por Micropasos así como el Número de Micropasos por Aumento de Paso Completo.*

Microsteps/full step	% Holding Torque/Microstep
1	100.00%
2	70.71%
4	38.27%
8	19.51%
16	9.80%
32	4.91%
64	2.45%
128	1.23%
256	0.61%

*Nota.* Esta tabla cuantifica los valores del diagrama de la figura como el impacto significativo en el incremento del torque por micropaso como una función del número de micropasos por paso completo. Obtenido de “Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities” (p.4) por Faulhaber

**Tabla 11**

*Selección del Ancho de la Correa con Paso de 2mm*

**Belt Width Selection Tables – 2mm PowerGrip® GT®3 Belts**

The following table represents the torque ratings for each belt in its base width at the predetermined number of grooves, pitch diameters and rpm. These ratings must be multiplied by the appropriate width factor and applicable belt length factor to obtain the corrected torque rating. (See Step 4 of Drive Selection Procedure on Page 12.)

Belt Width (mm)	4	6	9	12
Width Multiplier	0.60	1.00	1.64	2.32

2MGT Rated Torque (lb-in) for Small Sprocket - 6mm Belt Width																			
Number of Grooves	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	34	38	45	50	56	62	74	80	
Pitch (mm)	7.64	8.91	10.18	11.45	12.72	13.99	15.29	16.56	17.83	19.10	21.84	24.18	28.65	31.82	35.66	39.47	47.11	50.93	
Diameter (in)	0.301	0.351	0.401	0.451	0.501	0.551	0.602	0.652	0.702	0.752	0.852	0.952	1.128	1.253	1.404	1.554	1.855	2.005	
r	10	7.75	9.17	10.6	12.0	13.3	14.7	16.0	17.4	18.7	20.0	22.6	25.1	29.5	32.6	36.2	39.8	46.9	50.4
p	20	7.12	8.44	9.74	11.0	12.3	13.5	14.8	16.0	17.2	18.4	20.8	23.1	27.2	30.0	33.3	36.6	43.1	46.2
m	40	6.50	7.72	8.91	10.1	11.2	12.4	13.5	14.7	15.8	16.9	19.0	21.2	24.8	27.4	30.4	33.4	39.2	42.1
	60	6.14	7.29	8.43	9.54	10.6	11.7	12.8	13.9	14.9	16.0	18.0	20.0	23.5	25.9	28.7	31.5	37.0	39.6
	100	5.68	6.76	7.81	8.852	9.87	10.9	11.9	12.9	13.8	14.8	16.7	18.5	21.7	23.9	26.6	29.1	34.1	36.6
	200	5.05	6.03	6.98	7.92	8.84	9.74	10.6	11.5	12.4	13.2	14.9	16.6	19.4	21.3	23.7	25.9	30.3	32.4
	300	4.69	5.60	6.50	7.37	8.23	9.07	9.92	10.7	11.5	12.3	13.9	15.4	18.0	19.8	22.0	24.0	28.0	30.0
	400	4.43	5.30	6.15	6.98	7.80	8.60	9.40	10.2	10.9	11.7	13.2	14.6	17.1	18.8	20.8	22.7	26.4	28.3
	500	4.23	5.07	5.88	6.68	7.46	8.23	9.00	9.74	10.5	11.2	12.6	14.0	16.3	17.9	19.8	21.7	25.2	26.9
	600	4.06	4.88	5.67	6.44	7.19	7.93	8.67	9.38	10.1	10.8	12.1	13.4	15.7	17.2	19.0	20.8	24.2	25.8
	800	3.81	4.57	5.32	6.05	6.76	7.46	8.15	8.82	9.48	10.1	11.4	12.6	14.7	16.2	17.8	19.5	22.6	24.1
	1000	3.61	4.34	5.05	5.75	6.43	7.09	7.75	8.39	9.01	9.63	10.8	12.0	14.0	15.3	16.9	18.4	21.4	22.8
	1200	3.44	4.15	4.83	5.50	6.15	6.79	7.42	8.03	8.63	9.22	10.4	11.5	13.4	14.6	16.1	17.6	20.4	21.7
	1400	3.30	3.99	4.65	5.29	5.92	6.53	7.15	7.73	8.31	8.87	9.97	11.0	12.8	14.1	15.5	16.9	19.5	20.7
	1600	3.18	3.85	4.49	5.11	5.72	6.31	6.91	7.47	8.03	8.57	9.63	10.7	12.4	13.6	14.9	16.2	18.7	19.9
	1800	3.08	3.72	4.35	4.96	5.55	6.12	6.69	7.24	7.78	8.31	9.33	10.3	12.0	13.1	14.4	15.7	18.1	19.2
	2000	2.98	3.61	4.22	4.81	5.39	5.95	6.50	7.04	7.56	8.07	9.06	10.0	11.6	12.7	14.0	15.2	17.5	18.6
	2400	2.82	3.42	4.00	4.57	5.11	5.65	6.18	6.68	7.18	7.66	8.60	9.50	11.0	12.0	13.2	14.3	16.5	17.5
	2800	2.68	3.26	3.82	4.36	4.88	5.39	5.90	6.38	6.85	7.31	8.20	9.06	10.5	11.5	12.6	13.6	15.6	16.6
	3200	2.56	3.12	3.66	4.18	4.68	5.17	5.66	6.12	6.57	7.01	7.86	8.68	10.0	11.0	12.0	13.0	14.9	15.7
	3600	2.45	3.00	3.52	4.02	4.51	4.98	5.44	5.89	6.32	6.75	7.56	8.34	9.64	10.5	11.5	12.4	14.2	15.0
	4000	2.36	2.89	3.39	3.88	4.35	4.80	5.25	5.68	6.10	6.51	7.29	8.04	9.28	10.1	11.1	11.9	13.6	14.4
	5000	2.16	2.65	3.12	3.58	4.01	4.44	4.85	5.25	5.63	6.00	6.72	7.40	8.52	9.26	10.1	10.9	12.3	13.0
	6000	1.99	2.46	2.90	3.33	3.74	4.13	4.52	4.89	5.24	5.59	6.25	6.87	7.89	8.56	9.31	10.0	11.2	11.8
	8000	1.73	2.16	2.56	2.94	3.31	3.66	4.00	4.32	4.63	4.93	5.50	6.03	6.89	7.43	8.04	8.58	9.51	9.90
	10000	1.53	1.92	2.29	2.64	2.97	3.28	3.59	3.88	4.15	4.42	4.92	5.37	6.09	6.54	7.02	7.44	8.09	8.32
	12000	1.37	1.73	2.07	2.39	2.69	2.98	3.26	3.51	3.76	3.99	4.43	4.82	5.43	5.79	6.16	6.45	6.85	6.95
	14000	1.23	1.56	1.88	2.18	2.45	2.72	2.97	3.20	3.42	3.63	4.01	4.35	4.85	5.13	5.39	5.58		6.95

Nota. Obtenido del “Manual de Selección de Correas” (p.17). Adaptado de Gates (www.gates.com/drive/design).

**Tabla 12**

*Propiedades Reológicas de Polímeros*

Polymer	$K_{ref}$ (Pa s <sup>n</sup> )	$\eta_T$ (Pa s)	$a_T^*$
	$n$	$T_g$ (K)	
ABS	$1.04 \times 10^4$	$6.77 \times 10^{-10}$	2.79 (210)
	0.493	10 700	1.77 (220)
			1 (230)
			0.732 (240)
PLA	$3.54 \times 10^4$	$6.27 \times 10^{-13}$	3.49 (150)
	0.433	12 400	1.83 (160)
			1 (170)
			0.277 (280)
PLAPHA	$1.50 \times 10^4$	$3.37 \times 10^{-18}$	1 (170)
	0.569	17 800	0.399 (180)
			0.176 (190)
	$C_p$ (kJ/kg K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (J/m s K)
ABS	2.1	1.15	0.21
PLA	1.7	1.25	0.13
PLAPHA	1.6	1.25	0.13

\*The number in parentheses indicates the temperature in °C.

Nota. Obtenido de Mackay, Swain y Colby(2017)

## Anexo C: Matriz de Operacionalización

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>VI = V1</b> <b>Moldes de piezas mecánicas para fundición</b>	Objeto o pieza impresa en 3D mediante el proceso de modelado por deposición fundida (FDM) que servirá como matriz para una operación de fundición de una pieza mecánica.	Listas de cotejo o guías de dimensiones, pruebas de resistencia mecánica, guías de inspección visual de acabado superficial, test de resistencia de materiales, cuadros comparativos.	Medidas longitudinales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largo</li> <li>• Ancho</li> <li>• Grosor</li> <li>• Diámetro</li> </ul>
			Magnitudes físicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso</li> <li>• Dureza</li> </ul>
<b>VD = V2</b> <b>Diseño y construcción de la impresora 3D</b>	Método no industrializado (artesanal) para diseñar, calcular y fabricar una impresora 3D de moldes de piezas mecánicas para fundición, que cumpla los requisitos de operación a un menor costo.	Revisión bibliográfica, electricidad y termodinámica, guías de entrevistas. Guías de observación y recomendación de datos iniciales. Uso de catálogos de selección de perfiles de aluminio, perfiles de acero, componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos. Cálculos de verificación de tornillos de potencia, amperaje y potencia, energía del sistema de extrusión. Lista de cotejo de tolerancias dimensionales.	Acabado superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de capa</li> </ul>
			Datos iniciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen de impresión</li> <li>• Velocidad de impresión</li> <li>• Materia prima de impresión</li> <li>• Dimensiones y propiedades de componentes y miembros</li> </ul>
			Sistemas de impresoras FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones generales</li> <li>• Impresoras Core XY</li> </ul>
			Diseño y cálculo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mecánico</li> <li>• Eléctrico</li> <li>• Térmico</li> </ul>
			Selección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes electrónicos</li> <li>• Componentes eléctricos</li> <li>• Componentes estructurales</li> <li>• Componentes mecánicos</li> <li>• Firmware</li> </ul>
		Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerancias dimensionales</li> </ul>	

Nota. Elaboración Propia.

**Anexo D: Matriz de Consistencia.**

TÍTULO Y PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	VARIABLES	MUESTRA Y TÉCNICAS
<p>“Diseño y construcción de una impresora 3D con el objetivo de realizar moldes de piezas mecánicas para fundición – empresa FAINSEB”</p> <p><u>PROBLEMA:</u> ¿Cómo diseñar y construir una impresora 3D para la fabricación de moldes de piezas mecánicas, con el propósito de mejorar la eficiencia y la flexibilidad en los procesos de fundición industrial?</p>	<p><u>OBJETIVO GENERAL</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseñar, construir e implementar una impresora 3D que permita la fabricación de moldes de fundición de piezas mecánicas.</li> </ul> <p><u>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar los parámetros de funcionamiento de la impresora y definir las dimensiones generales de la impresora diseñada.</li> <li>Diseñar los elementos y sistemas mecánicos de la impresora basado en la tecnología FDM de impresión.</li> <li>Diseñar y evaluar térmicamente el sistema de extrusión que permita descargar filamento PLA a velocidades de impresión entre 100 y 150 mm/s para alcanzar una temperatura óptima en el depósito de capas del extrusor conservando su calidad en la impresión.</li> <li>Seleccionar los elementos electrónicos y programar el Arduino que hará funcionar la impresora acorde al requerimiento de procesamiento.</li> </ul>	<p>El diseño y la construcción correcta de una impresora 3D permite fabricar moldes de piezas mecánicas para fundición con el propósito de mejorar la eficiencia y la flexibilidad en los procesos de fundición industrial.</p>	<p><u>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo a su enfoque: Cuantitativa</li> <li>De acuerdo a su alcance: Explicativa</li> <li>De acuerdo a su tipo: Aplicada</li> <li>De acuerdo a su diseño: preexperimental</li> </ul> <p><u>DISEÑO:</u> El diseño del experimento es de tipo preexperimental.</p> <p>GE:    X    O</p> <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>GE: Grupo experimental</li> <li>X: Aplicación de diseño</li> <li>O: Observación o medición de parámetros resultantes</li> </ul>	<p><b>VI = V1</b> <b>Moldes de piezas mecánicas para fundición</b></p>	<p><u>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN</u> Impresora 3D FDM. (La unidad de investigación es única y no probabilística)</p> <p><u>TÉCNICAS DE ANALISIS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cálculo de potencia eléctrica y amperaje</li> <li>Cálculo de tornillo de potencia</li> <li>Cálculo de energía del sistema de extrusión</li> <li>Selección de componentes</li> <li>Fabricación</li> </ul>
				<p><b>VD = V2</b> <b>Diseño y construcción de la impresora 3D</b></p>	

Nota. Elaboración Propia.

## Anexo E: Fabricación de la Impresora 3D con Tecnología FDM.

**Figura 29**

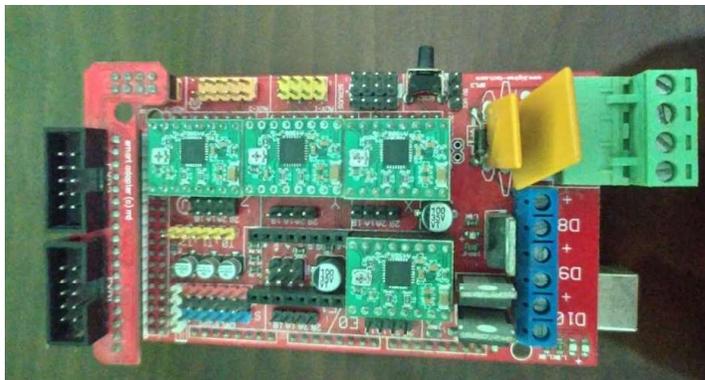
*Piezas Fabricadas en PLA y las Varillas de Acero Cromado*



*Nota.* Elaboración Propia.

**Figura 30**

*Componente Electrónico – (Ramps 1.4/Arduino Mega/Drivers A4899)*



*Nota.* Elaboración Propia.

**Figura 31**

*Componente Electrónico – (Finales de Carrera y Fuente de 12V)*



*Nota. Elaboración Propia*

**Figura 32**

*Montaje del Sistema Core XY*



*Nota. Elaboración Propia*

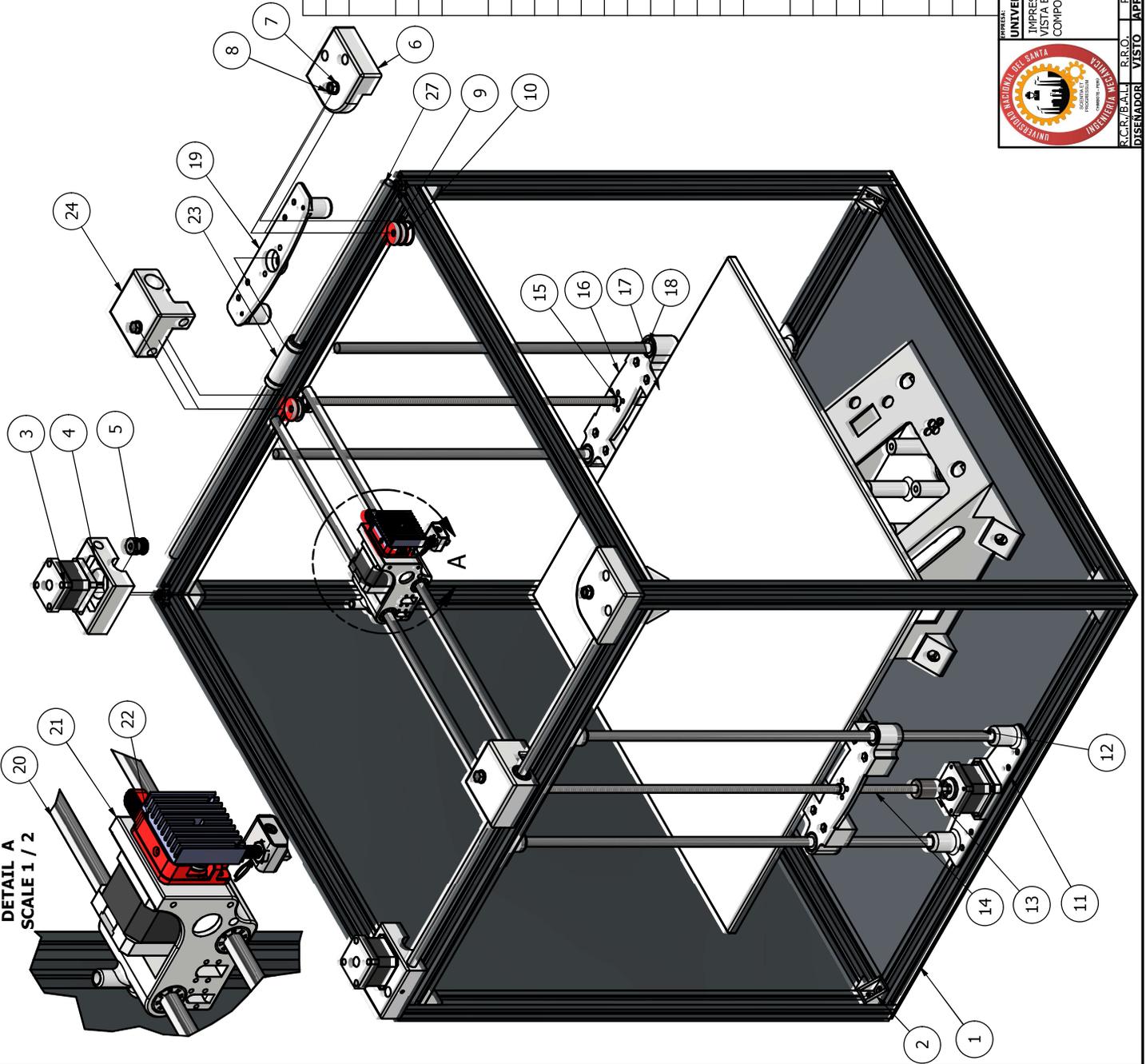
**Figura 33**

*Impresora 3D Terminada*



Nota. Elaboración Propia

DETAIL A  
SCALE 1 / 2



PARTS LIST

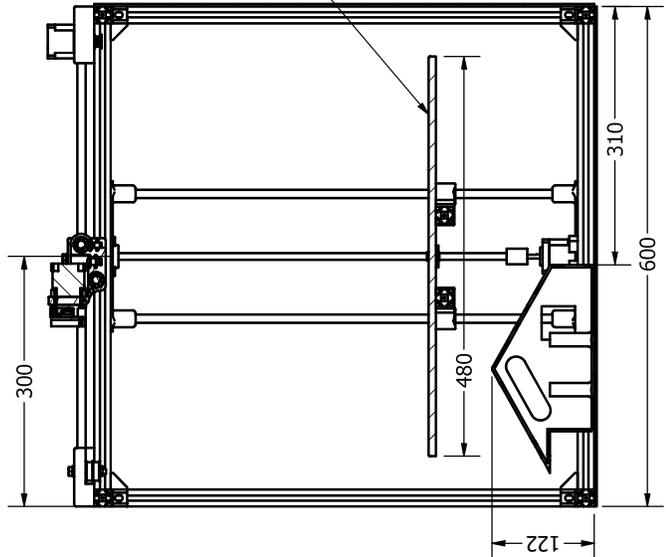
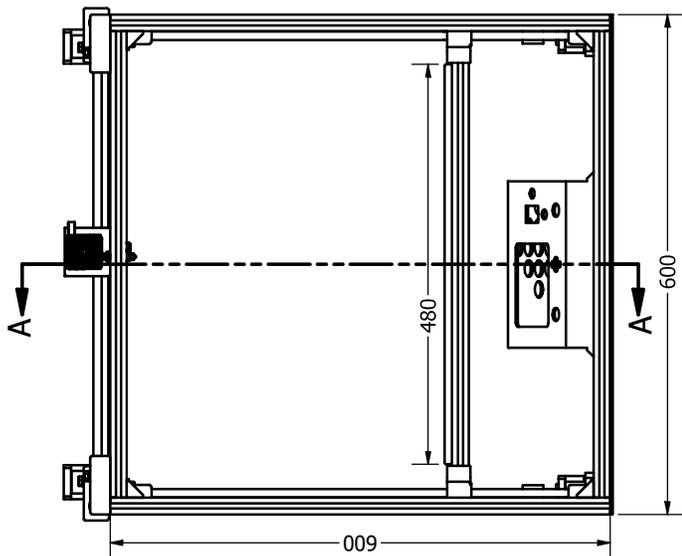
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Marco Estructural	Perfil de Aluminio en V 20x20mm
2	16	Cartela	
3	5	Motor NEMA 17	
4	2	Soporte Motor y Polea	
		Dentada	
5	2	Polea Dentada (Z=20)	
6	2	Soporte de Rodamientos	
7	2	Perno M6 x 40	
8	2	Arandela AS 1237 - 6 mm	
9	10	Anillo Separador	
10	6	Rodamiento 626	
11	2	Soporte Inferior Eje Z	
12	4	Varilla Cromada Eje Z	
13	2	Acoplamiento	
14	2	Tornillo Tr8 x2	
15	2	Tuerca de Tr8 x 2	
16	2	Soporte del perfil de la Cama	
17	2	Base de la Cama	
18	4	Rodamiento Lineal LMU 10	
19	2	Soporte Superior Eje Z	
20	2	Varilla Cromada Eje X	
21	1	Soporte de Extrusor y Hotend	
22	1	Extrusor y Hotend MK8	
23	2	Casquillo Iguis	
24	2	Soporte Sistema Core XY	

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
IMPRESORA 3D  
VISTA EXPLOSIONADA DE LOS  
COMPONENTES PRINCIPALES

COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)		VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)					
0	6	315	1000	2000	4000	8000	12000
0	30	120	315	2000	4000	8000	15000
±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2 ±3 ±4 ±5							

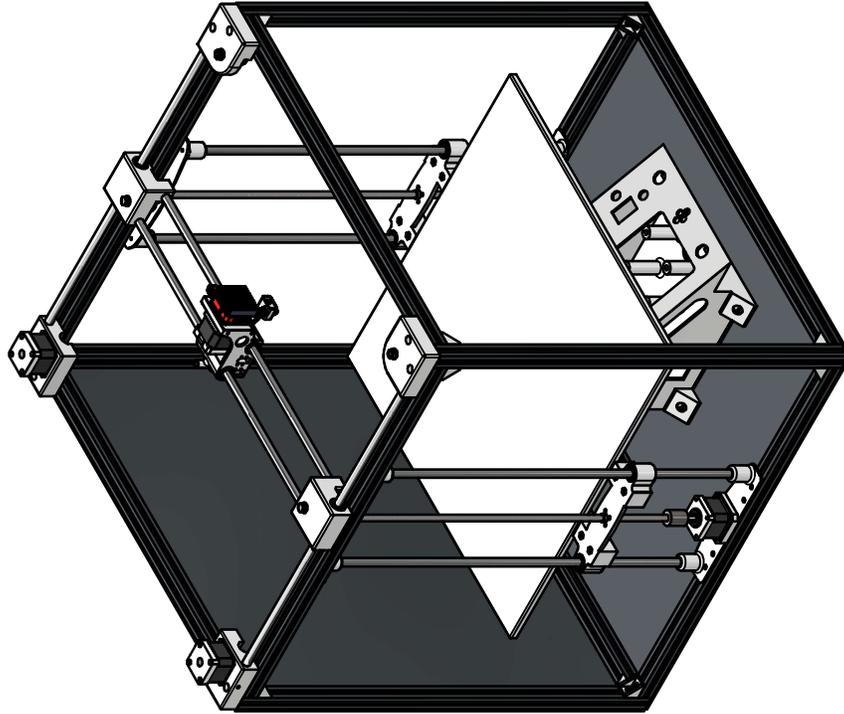
R.C.R./E.A.L.I. R.R.O. 25/07/2023 N° DE PLANO: UNS-001  
DISEÑADOR VISTO APROBADO FECHA TAMAÑO DE FORMATO: A3

ESC. INDICADA



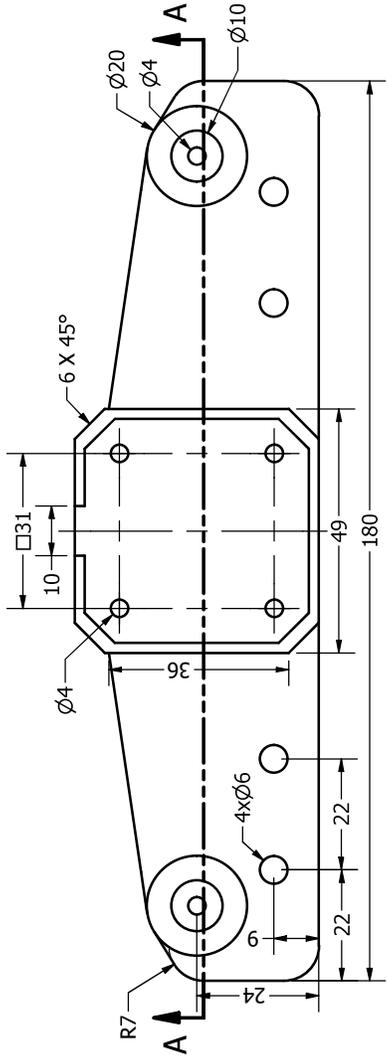
SECTION A-A  
SCALE 1 / 6

Cama de Impresión

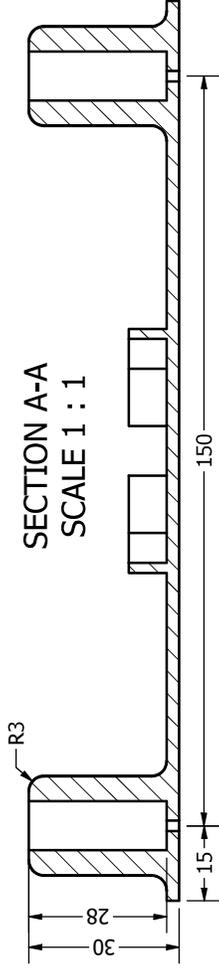
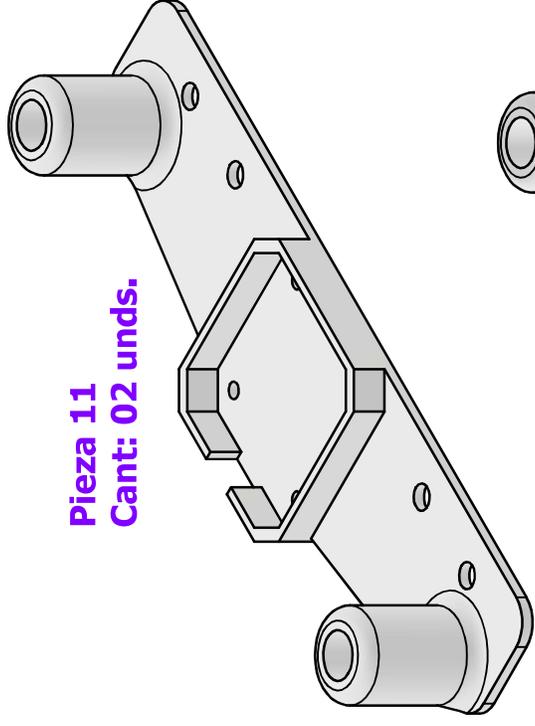


	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	0	6	30	120	315	1000	2000	4000	8000	12000	15000	
	IMPRESORA 3D	$\frac{0}{6}$	6	30	120	315	1000	2000	4000	8000	12000	15000	
Dimensiones Generales		$\pm 0,1$		$\pm 0,2$		$\pm 0,3$		$\pm 0,5$		$\pm 0,8$		$\pm 1,2$	
		COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)		VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)									
DISEÑADOR	R.C.R./E.A.L.I.	R.R.O.	R.R.O.	25/07/2023	Nº DE PLANO:	UNIS-002	TAMANO DE FORMATO: A3						ESCALA INDICADA

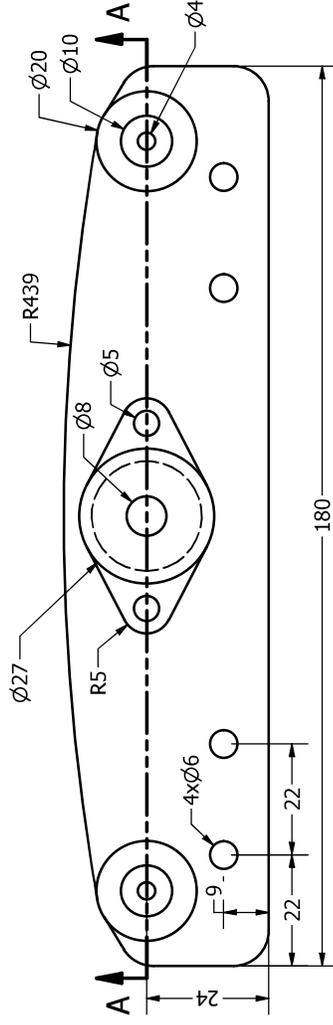




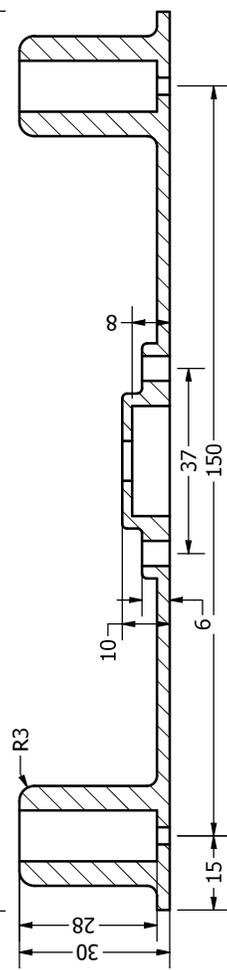
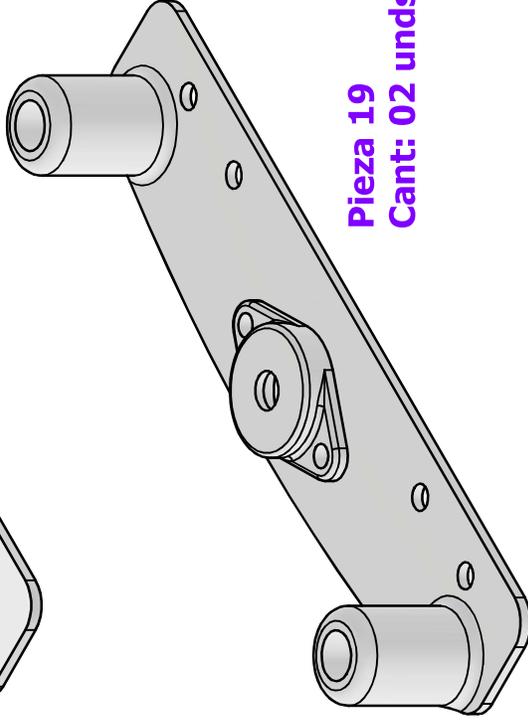
**Pieza 11**  
**Cant: 02 unds.**



**SECTION A-A**  
**SCALE 1 : 1**

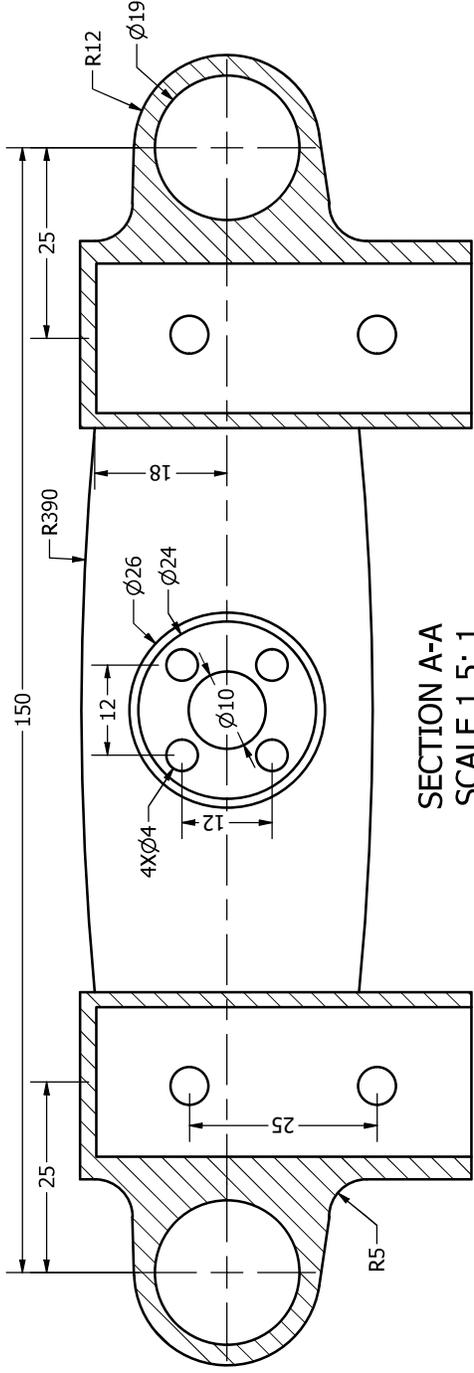


**Pieza 19**  
**Cant: 02 unds.**

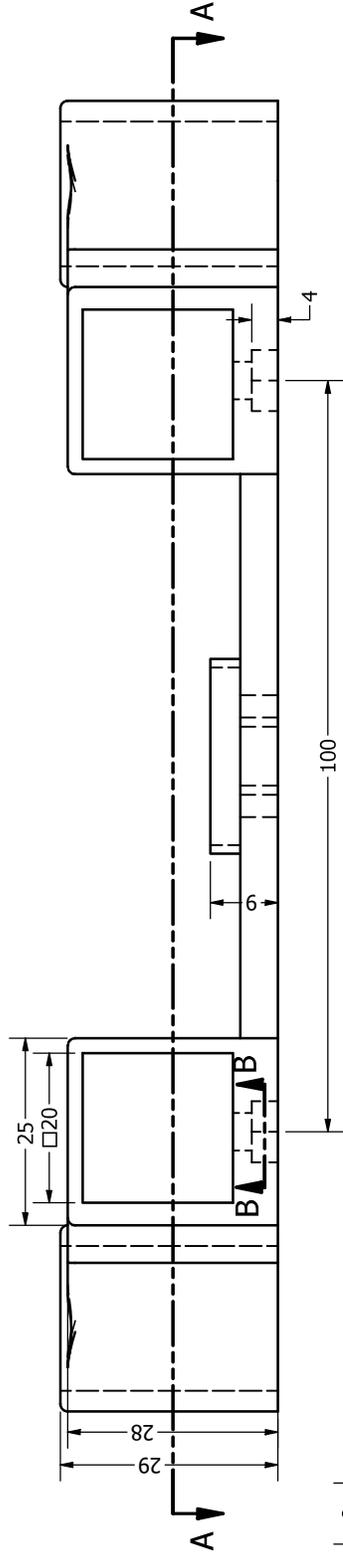


**SECTION A-A**  
**SCALE 1 : 1**

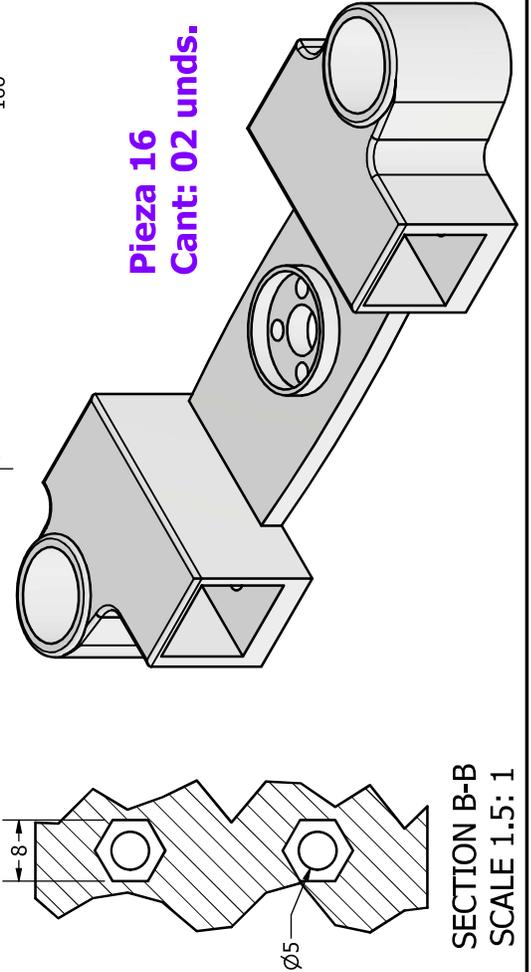
PARTS LIST											
ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS							
11	2	Soporte Inferior Eje Z	PLA	0,035 kg							
19	2	Soporte Superior Eje Z	PLA	0,033 kg							
		UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	0	315	120	2000	4000	8000	12000		
		IMPRESORA 3D	0	315	120	2000	4000	8000	12000	15000	
		Componentes del eje Z	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±5	
		COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)	VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)								
		R.C.R./E.A.L.I	R.R.O.	25/04/2023	Nº DE PLANO: LUNS-004						
		DISEÑADOR	APROBADO	FECHA	TAMANO DE FORMATO: A3						
										ESQ. INDICADA	



SECTION A-A  
SCALE 1.5: 1



SECTION B-B  
SCALE 1.5: 1



Pieza 16  
Cant: 02 unds.

PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	MATERIAL	MASS																				
16	2	Soporte del perfil de la cama	PLA	0,066 kg																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA</th> <th>2000</th> <th>4000</th> <th>8000</th> <th>12000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>315</td> <td>1000</td> <td>2000</td> <td>4000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> <td>2000</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> <td>2000</td> </tr> </tbody> </table>					UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	2000	4000	8000	12000	0	315	1000	2000	4000	6	120	315	1000	2000	30	120	315	1000	2000
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	2000	4000	8000	12000																				
0	315	1000	2000	4000																				
6	120	315	1000	2000																				
30	120	315	1000	2000																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)</th> <th>±2</th> <th>±3</th> <th>±4</th> <th>±5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2</td> <td>±2</td> <td>±3</td> <td>±4</td> <td>±5</td> </tr> </tbody> </table>					VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)	±2	±3	±4	±5	±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2	±2	±3	±4	±5										
VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)	±2	±3	±4	±5																				
±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2	±2	±3	±4	±5																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)</th> <th>±0,1</th> <th>±0,2</th> <th>±0,3</th> <th>±0,5</th> <th>±0,8</th> <th>±1,2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes del eje z</td> <td>±0,1</td> <td>±0,2</td> <td>±0,3</td> <td>±0,5</td> <td>±0,8</td> <td>±1,2</td> </tr> </tbody> </table>					COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	Componentes del eje z	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2						
COTAS SIN TOLERANCIA INDICADA (mm)	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2																		
Componentes del eje z	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)</th> <th>±2</th> <th>±3</th> <th>±4</th> <th>±5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes del eje z</td> <td>±2</td> <td>±3</td> <td>±4</td> <td>±5</td> </tr> </tbody> </table>					VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)	±2	±3	±4	±5	Componentes del eje z	±2	±3	±4	±5										
VALORES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EM Ra, NORMA ABNT 8404 (ISO 468)	±2	±3	±4	±5																				
Componentes del eje z	±2	±3	±4	±5																				



DISEÑADOR: VISTO: APROBADO: FECHA: 25/07/2023 N° DE PLANO: LUN5-005 TAMAÑO DE FORMATO: A3 ESC: INDICADA

